Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи
для освітнього ступеня «МАГІСТР»
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»
на тему:

Дослідження кінематичної структури промислових роботів із знаходженням найбільш доцільних їх варіантів

Investigation of the kinematic structure of industrial robots with the aim of finding the most appropriate variants

Виконавець: ст. гр. ПМ-22М-3
_____ Дмитро БАЛАКЛЕЄНКО
Керівник: к.т.н., доцент
_____ Максим ГОДУНКО
Рецензент: к.т.н., доцент
_____ Дмитро БОГАТИРЬОВ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

Кропивницький – 2024

АНОТАЦІЯ

на випускну кваліфікаційну роботу здобувача гр. ПМ-22М-3

Балаклеєнка Дмитра Олександровича

Кваліфікаційна робота на тему: “Дослідження кінематичної структури промислових роботів із знаходженням найбільш доцільних їх варіантів” містить 76 сторінок та 10 листів графічного матеріалу.

У роботі виконано обгрунтування кінематики промислових роботів та методики формування кінематичних схем роботів.

Головна задача: визначити найбільш доцільні варіанти кінематичних схем роботів, виключивши з загальної кількості варіантів кінематичних схем нереалізуємі, недоцільні, мало доцільні та подібні варіанти при двох, трьох і чотирьох ступенях рухомості для окремих груп. Визначаючи варіанти кінематичних схем, поєднуємо кінематичні пари п’ятого класу, які виконують поступовий рух (П – з прямою ланкою, П′- з вигнутою ланкою) і кінематичні пари п’ятого класу, які виконують обертальний рух (О – із співпадаючою віссю обертання, О′ - з неспівпадаючою віссю обертання) та напрямки їх розміщення (/ - співвісно , // - паралельно, ⊥ - перпендикулярно, Х - перехресно).

Кінцевий результат: алгоритм знаходження кількості найбільш доцільних варіантів кінематичних схем промислових роботів та виведена формула за даним алгоритмом, виконані графічно кінематичні схеми окремо по групам, розроблена програма для визначення структурних формул найбільш доцільних варіантів.

Ключові слова: кінематичні схеми, промислові роботи, пари п’ятого класу, доцільні варіанти

ABSTRACT

for the final qualifying work of the applicant gr. PM-22M-3

Balakleenko of Dmytro Oleksandrovych

The qualification work on the topic: "Investigation of the kinematic structure of industrial robots with the finding of the most appropriate options" contains 76 pages and 10 sheets of graphic material.

The paper provides a rationale for the kinematics of industrial robots and the method of forming kinematic schemes of robots.

The main task: to determine the most expedient variants of kinematic schemes of robots, excluding from the total number of variants of kinematic schemes impracticable, impractical, hardly expedient and similar variants with two, three and four degrees of mobility for individual groups. Determining the variants of kinematic schemes, we combine kinematic pairs of the fifth class that perform gradual movement (P – with a straight link, P′ - with a curved link) and kinematic pairs of the fifth class that perform rotational movement (O – with a coincident axis of rotation .

The final result: an algorithm for finding the number of the most appropriate options for kinematic schemes of industrial robots and a derived formula according to this algorithm, graphically executed kinematic schemes separately by group, a program for determining the structural formulas of the most appropriate options was developed.

Key words: kinematic schemes, industrial works, pairs of the fifth class, expedient options

Зміст

Вступ..... 5

Розділ 1 Постановка задачі дослідження, огляд науково-технічної і патентної інформації

1.1 Постановка задачі та методи її вирішення……...…. 6

1.2 Огляд попередніх досліджень та обгрунтування актуальності поставленої задачі……..…… 8

Розділ 2 Струкутурний аналіз та синтез кінематики промислових роботів

2.1 Структурний аналіз побудови промислових роботів, вихідні дані для вирішення поставленої задачі..... 14

2.2 Кількість теоретично можливих схем промислових роботів..... 17

2.3 Поділ теоретично можливих схем на групи по ступіні доцільності…... 19

2.4 Визначення кількості практично нереалізуємих схем роботів..... 22

2.5 Визначення кількості недоцільних схем роботів..... 32

2.6 Визначення кількості мало доцільних схем промислових роботів..... 45

2.7 Визначення кількості доцільних схем промислових роботів..... 53

2.8 Визначення кількості найбільш доцільних схем промислових роботів.. 60

2.9 Поділ кінематичних схем по системах координат..... 65

2.10 Висновки..... 67

Розділ 3 Визначення економічної ефективності модернізації робота “KUKA KR-10” для використання в роботизованому комплексі токарним верстатом HAAS SL-10

3.1 Визначення ціни базового та нового обладнання..... 68

3.2 Розрахунок допоміжних показників..... 70

3.3 Розрахунок капіталовкладень споживача..... 74

3.4 Собівартість обробки річного об’єму випуска деталей..... 75

Загальні висновки..... 76

Список літератури..... 78

Вступ

Промислові роботи – це складні механіко-кібернетичні системи, основне функціональне призначення полягає в забезпеченні необхідних рухів виконуючих механізмів роботів, що потрібно для реалізації різних технологічних операцій (складання, зварювання, фарбування та ін.), а також допоміжних переходів (завантаження та розвантаження устаткування, транспортування деталей, їх упорядковане розміщення і т.п.).

У даній магістерській роботі розглядається кінематика промислових роботів та методика формування кінематичних схем роботів. Головна задача : визначити найбільш доцільні варіанти кінематичних схем роботів , виключивши з загальної кількості варіантів кінематичних схем нереалізуємі, недоцільні, мало доцільні та подібні варіанти при двох, трьох і чотирьох ступенях рухомості для окремих груп. Визначаючи варіанти кінематичних схем, поєднуємо кінематичні пари п’ятого класу, які виконують поступовий рух (П – з прямою ланкою, П′- з вигнутою ланкою) і кінематичні пари п’ятого класу, які виконують обертальний рух (О – із співпадаючою віссю обертання, О′ - з неспівпадаючою віссю обертання) та напрямки їх розміщення (/- співвісно , //- паралельно, ⊥-перпендикулярно, Х - перехресно). Кінцевий результат: алгоритм знаходження кількості найбільш доцільних варіантів кінематичних схем промислових роботів та виведена формула за даним алгоритмом, виконані графічно кінематичні схеми окремо по групам.

Розділ 1. Постановка задачі дослідження, огляд науково-технічної і патентної інформації

1.1. Постановка задачі та методи її вирішення

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження кінематичних схем промислових роботів, розробка методики знаходження найбільш доцільних поєднань кінематичних пар 5 класу та створення на їх основі кінематичних схем роботів.

Актуальність теми

Виходячи із основного цільового призначення промислових роботів, вони повинні забезпечувати траекторію руху із затиснутою в захватному пристрої деталлю з врахуванням конструктивних особливостей основного технологічного обладнання. Також певну траекторію руху необхідно виконувати і при виконанні основних технологічних операцій самим роботом (встановлення, з'єднання, запресовування деталей, фрезерування та ін.). Сам прцес транспортування та позиціонування повинен здійснюватись з дотриманням слідуючих вимог: максимально- доцільною швидкістю або прискоренням; необхідною точністю; мінімальними силовими навантаженнями на захват та конструкцію робота; необхідною якістю виконання операції; мінімальними енергетичними потребами; дотриманням необхідних вимог по безпеці виконання операцій та ін.

Окрім цього захватні пристрої роботів повинні бути достатньо універсальними, щоб мати можливість працювати з різними деталями за формою і розмірами, а також виконувати обслуговування різного обладнання, працюючи з різними пристроями і ін. Тому варто враховувати ще й кінематику кисті, а також ступень ввільності самої кисті. Бо іноді дуже важливо здійснювати локальні руки в робочій зоні верстата саме кистю.

Об'єкт дослідження

Кінематичні пари 5 го класу промислових роботів та їх поєднання у кінематичні схеми за ступенню доцільності їх використання у конструкціях роботів, а також можливістю виготовлення конструкції робота згідно кінематичної схеми.

Предмет дослідження

Промислові роботи та їх кінематична структура, яка при поєднанні кінематичних пар створює безліч варіантів поєднань кінематичних пар, які у свою чергу приводять до створення конструкції роботів із певною робочою зоною та відповідною кількістю ступенів рухомості.

Мета роботи

Визначення теоретичної кількості доцільних кінематичних схем промислових роботів. А також розподіл по ступеням доцільності кінематичних схем із врахуванням особливостей функціонування робота та надання відповідних рекомендацій.

Завдання

1. Розробити математичні передумови для визначення загальної кількості кінематичних схем відповідно докількості їх рухомостей.

2. Вивести рівняння для визначення кількості нереалізуємих кінематичних схем роботів.

3. Вивести рівняння для визначення кількості недоцільних кінематичних схем роботів.

4. Вивести рівняння для визначення кількості малодоцільних кінематичних схем роботів

3. Вивести рівняння для визначення кількості доцільних кінематичних схем роботів.

4. Надати відповідні висновки та рекомендації.

Методи дослідження

Поставлені завдання вирішуються із застосуванням методів теоретичної і прикладної механіки, теорії робототехнічних систем, обчислювальної математики і систем управління.

Наукова новизна

У процесі проведення теоретичних досліджень в роботі отримані наступні нові наукові результати: обгрунтовано підходи до розподілу кінематичних схем промислових роботів по ступені їх доцільності; виведено рівняння для визначення кількості нереалізуємих, недоцільних, малодоцільних та доцільних схем роботів.

Достовірність результатів

Основні наукові результати кваліфікаційної роботи отримані на основі фундаментальних положень і методів теоретичної механіки, динаміки машин, експериментальних методів дослідження.

Практична цінність

У роботі запропоновано методику розподілу кінематичних схем промислових роботів за ступенню їх доцільності із врахуванням особливостей їх функціонування, а також виведено формули для знаходження кількості схем відповідно по ступеням доцільності.

Апробація кваліфікаційної роботи

Основні положення роботи докладалися на: студентсько-викладацькій науковій конференції ЦНТУ.

1.2 Огляд попередніх досліджень та обгрунтування актуальності поставленої задачі

Промислові роботи є одним із нових і перспективних засобів автоматизації [1]. Під промисловими роботами (універсальними маніпуляторами) розуміють автоматичні пристрої з програмним управлінням, які за допомогою рук забезпечують захват, просторове переміщення та орієнтування різних деталей. Основною відмінною особливістю промислових роботів від інших, подібних за призначенням пристроїв є висока їх кінематична рухливість і наявність програмного управління, що дозволяє оперативно автоматизувати різні виробничі процеси. Промислові роботи знаходять практичне застосування в багатьох країнах. Наприклад, у США ще в 1970 р. у виробництві експлуатувалося близько 200 роботів. За прогнозами спеціалістів США парк робіт до кінця XX століття [2] повинен досягти 40—60 тис. Практика використання промислових роботів доводить, що вони можуть успішно замінити працю людини, виконуючи його роботу ефективніше. Найбільш часто роботи застосовуються для виконання вантажно-розвантажувальних і транспортних операцій при обслуговуванні металоріжучого, ковальсько-пресового, ливарного, термічного, складального та

іншого обладнання. Роботи часто застосовуються для виконання складних контурів переміщення виконавчих механізмів, наприклад, зварювальної головки при автоматичному зварюванні або пульверизатора для покраски. Виконання позначених і інших операцій у значній мірі залежить від кінематики роботів, оціненої загальною кількістю ступенів вільних рухів, їх вигляду (обертальні або поступальні рухи відносно різних координатних осей) та їх кінематичної послідовності. Крім цього, кінематику роботів слід розділити на кінематичні (структурні) групи, які відрізняються між собою як своїм функціональним призначенням, так і належністю до певної виконавчої ланки роботів. Кінематичну структуру промислових роботів можна представити такої, що складається з трьох груп: кінематики основи, кінематики рук і кінематики кісти (захватної головки). Усі ступені свободи руху, що забезпечують можливість переміщення самого робота (рухомість основи), містять кінематику основи. Як за технологічним призначенням, так і за конкретними прикладами існуючих конструкцій роботів вважається достатньо, якщо кінематична основа володіє одним ступенем свободи, надаючи роботу робочі або установочі переміщення. Степені свободи руху, що забезпечують просторове переміщення кінця рук із захоплюючим пристроєм при нерухомій основі робота, складають кінематику рук робота. На вибір кінематики руки основний вплив визначає величина і характер необхідних деталей переміщення, особливості їх орієнтування при переміщеннях і установках. Переміщення деталей у просторово-об'ємній робочій зоні можливі вже при наявності трьох ступенів свободи руху рук. Більше збільшення кількості ступенів свободи дозволяє тільки покращити маневренність, але не змінює характер робочої зони. Найбільш прийнятними є кінематичні схеми з різними по виду руху ступенями свободи.

Варіанти кінематичних схем рук роботів з трьома різними ступенями свободи показані на рис. 1. Кінематичні схеми тільки з поступальними рухами (рис.1, а) дозволяють маніпулювати рукою 1 із захватним пристоєм 2 в об'ємно-прямокутній робочій зоні (рис.2, а). Така кінематика доцільна в тому випадку, якщо положення деталі до і після розвантаження знаходиться між роботом і обслуговуваним обладнанням. Кінематичні схеми тільки з обертальними рухами

(рис.1, б) дозволяють рукі переміщати вироби по зовнішньому контуру сферичної зони (рис.2, б). Неможливість переміщення деталей у просторовій зоні обмежує доцільність застосування таких схем. У даних і наступних схемах прийнято допущення, що обертальні рухи здійснюються в межах 360°. У кінематичних схемах з двома поступальними і одним обертальним рухом (рис.1, в) захоплювальний пристрій руки може переміщатися в плоскій зоні (рис.2, в), якщо рух здійснюється відносно різних координатних осей, що є суттєвим недоліком такої схеми. У всіх інших випадках такі схеми передбачають переміщення деталей в об'ємно-циліндричній робочій зоні з горизонтальною або вертикальною нерухомою (рис.2, г) або рухомою віссю (рис.2, д).

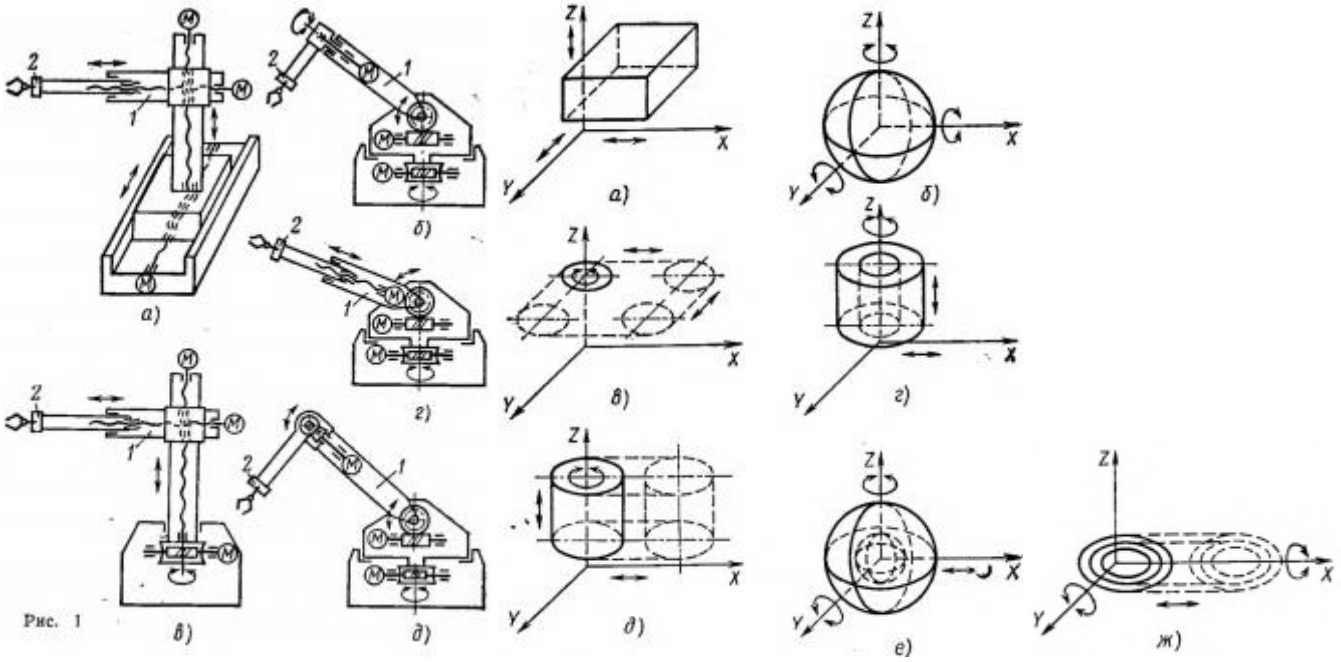


Рис.2. Конструктивно-кінематичні схеми роботів та їх робоча зона

Існуючі конструкції промислових роботів в основному виконані на основі таких кінематичних схем: наприклад, роботи відчизняного виробництва і зарубіжного, наприклад типу Версатран (рис. 3).

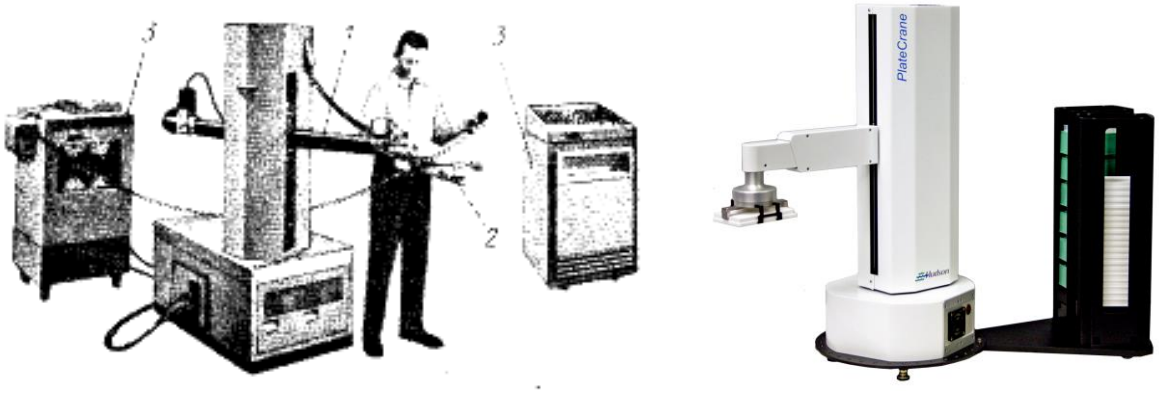


Рис.3 Промисловий робот Версатран та його сучаний аналог

Кінематика Версатран дозволяє захвату (2) руки (1) переміщуватися в горизонтальному і вертикальному напрямках, а також обертатися навколо вертикальної осі. Усі рухи виконавчих органів у цій роботі здійснюються від гідравлічного приводу з дистанційним програмним управлінням (3). У кінематичних схемах з двома обертовими й одним поступальним рухом (рис.1, г) рука має можливість переміщати захват з деталлю в об'ємно-сферній зоні з нерухомою віссю сфери (рис.2, е) або рухомою (рис.2, ж). Промислові роботи з такою кінематикою руки також отримали значне поширення (наприклад, роботи типу Юнімейт - рис. 4). У цьому роботі рука 1 із захватом 2 може обертатися навколо вертикальної і горизонтальної осей і поступово переміщуєтьсяся уздовж своєї осі від гідравлічного приводу.

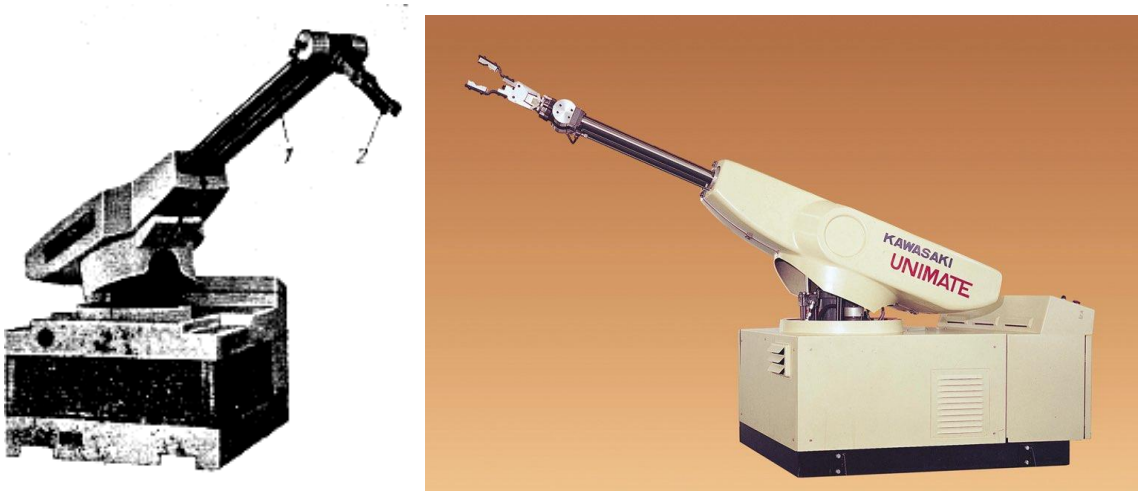


Рис.4 Робот Юнімейт та його сучаний аналог

Рух самого захвату здійснюється від пневматичного приводу, що дозволяє роботу працювати із заготовками в умовах високих температур. З наведеного

аналізу випливає, що деякі варіанти кінематичних схем руки робота з трьома різними за видом руху ступенями свободи не мають практичного інтересу, тому що не забезпечують переміщення деталей в об'ємній робочій зоні. Перевагу слід віддавати кінематичним схемам, що забезпечують циліндричні (див. рис.1, о) або сферичні (див. рис.1, г) обємні робочі зони. Такі схеми допускають більш високу універсальність просторових переміщень, а виконані на їх основі конструкції характеризуються більшою компактністю. Крім розглянутих варіантів кінематичних схем руки робота з трьома ступенями свободи, можуть бути й інші варіанти, у яких деякі види рухів повторюються. З них значний інтерес представляють кінематичні схеми з повторюючимися обертальними рухами, наприклад, нематична схема (див. рис.1, з), що забезпечує об'ємну сферичну робочу зону, аналогічно наведеної на рис. 2, е. Наступною кінематичною ланкою робота є кінематика кисті (захоплювального пристрою). Усі ступені свободи руху, які дозволяють змінювати орієнтацію деталі без зміни положення кінця руки слід відносити до кінематики кисті. Вибір кінематики кисті певною мірою залежить від кінематики руки, тобто від характеру переміщення деталі з вихідного положення до кінцевого. Переміщення деталей за допомогою обертальних рухів зазвичай призводить до зміни їх кутової орієнтації. Таким чином, скільки різних обертальних ступенів свободи містить кінематика руки, стільки можливо кутових переорієнтувань деталі при її просторовому переміщенні. Для підтримки постійного кутового становища чи в процесі її переміщення необхідно, щоб кисть мала стільки ж обертальних ступенів свободи щодо тих самих координатних осей, що й рука. Для роботів з двома поступальними та одним обертальним рухами руки (див. рис. 1, в) підтримка вихідної кутової орієнтації деталі в кінцевому положенні можливо, якщо кисть (рис. 5, а) має одну ступінь свободи обертального руху. Для роботів з одним поступальним та двома обертальними рухами (див. рис. 1, г) необхідно мати рухливість кисті руки навколо двох координатних осей (рис. 5,6). Кисть руки повинна забезпечувати не тільки збереження вихідної орієнтації деталі, а й дозволяти виконувати спеціальні її повороти. Більшість випадків ці рухи необхідні для здійснення переустановки деталі в технологічному процесі її обробки чи складання. Враховуючи, що деталі на металорізальному верстаты та іншому

технологычному устаткуванні в основному встановлюються з горизантальним або вертикальним розташуванням їх осей, досить універсальною слід вважати таку кінематику кисті, яка має дві ступені свободи обертання навколо цих осей.

Роботи, що працюють з неорієнтованими деталями (із накопичувального пристрою), повинні мати кінематику кисті з трьома обертальними ступенями свободи. Кисть руки робота зазвичай містить привід захватів, який забезпечує затиск і розтиск деталей. Привід захватів доцільно не включати до загальної кількості ступенів свободи руху роботів, так як він не забезпечує зміни просторового положення або орієнтування деталі та може мати як механічне, так і немеханічне (вакуумне, електромагнітне та ін) виконання.

Таким чином, кінематичну структуру промислових роботів можна оцінювати наступною структурною формулою: $p = p_o+p_p+p_к$, де p – загальна кількість ступенів свободи руху робота; p_o, p_p, $p_к$ - відповідно кількість ступенів свободи, кінематики основи, руки та кисті. Слід вважати, що досить універсальними будуть такі роботи, які мають 5-7 ступенів свободи руху з наступним структурним розподілом їх за кінематичними групами: $5\text{-}7 = (0\text{-}1)_o + З_Р+(2\text{-}З)_к$.

Отже, до універсальних промислових роботам можуть бути віднесені роботи як стаціонарного, так і рухливого виконання, з трьома ступенями свободи руху руки та двома-трьома ступенями свободи руху кисті. Промислові роботити з меншою кількістю ступенів свободи зазвичай є роботами спеціального або спеціалізованого призначення. Роботи з великою кількістю ступенів свободи будуть особливо універсальними та високо команевреними.

Розділ 2 Струкутурний аналіз та синтез кінематики промислових роботів

2.1 Структурний аналіз побудови промислових роботів, вихідні дані для вирішення поставленої задачі

2.1.1 Структурний аналіз промислових роботів

Структурний аналіз промислових роботів включає в себе дослідження вибраних варіантів по визначенню їх реальних можливостей функціонування від вибраних параметрів та характерних признаків структурної будови.

Структурний синтез промислових роботів зводиться до пошуку доцільних варіантів кінематичних схем по критеріях виконання необхідних рухів (типу робочої зони, характеру її утворення, набору необхідних рухів і т.ін.), які потрібні для функціонування робота. Конкретне вирішення цієї задачі полягає у визначенні кількості робочих органів та рухомих ланок робота, класу кінематичних пар, виду їх рухів, порядку розміщення пар та ін.

Структурні дослідження дозволяють визначити можливі варіанти вирішення проблеми, а по відповідних критеріях встановити найбільш доцільні виконання. Це особливо важливо при розробці дороговартісних проектів, до яких відносяться і промислові роботи, де початкові помилки вибору необхідних варіантів приводять до значних втрат.

2.1.2 Класифікація промислових роботів

Промислові роботи класифікуються по наступним признакам: рівень спеціалізації, вантажність, кількість ступенів рухомості, тип системи координат, тип привода, вид керування (залежить від рівня досконалості), кількість захватів, кількість рук, точність, система керування, призначення.

Найбільш важливими для виконання даної роботи є такі класифікації (т.к. вони є частиною вихідних даних):

- по кількості ступенів рухомості промислові роботи поділяють на:

  роботи з двома ступенями рухомості;

  роботи з трьома ступенями рухомості;

  роботи з чотирма ступенями рухомості;

роботи зі ступенями рухомості більше чотирьох;

- по виду системи координат промислові роботи поділяються на роботи, які працюють в :

прямокутній (декартовій) системі координат;

циліндричній системі координат;

сферичній системі координат;

кутовій системі координат;

інших системах координат.

1.1.3 Кінематична структура промислових роботів

В структурі промислового робота можуть використовуватися кінематичні пари п'ятого класу, які забезпечують поступальні ($П$ або $П'$) чи обертові ($О$ або $О'$) рухи. Якщо поєднувати кінематичні пари і напрямки їх руху в різних комбінаціях, є можливість створити промислові роботи з потрібними робочими зонами і які зможуть працювати у визначених системах координат:

– прямокутній;

– сферичній;

– циліндричній;

– кутовій та ін.

Загальна кінематична структура будови робота :

$n = n_o + n_p + n_k + n_{ло} + n_з$

n – загальна кількість ступенів рухомості ;

no- ступені рухомості основи робота ;

np-ступені рухомості руки робота ;

nk- ступені рухомості кисті робота ;

nло-локально-операційні ступені рухомості ;

nз- ступені рухомості захвата робота.

Кінематична структура промислових роботів і їх рухомі можливості визначаються видом і послідовністю розміщення кінематичних пар. Отже в якості вихідних даних для розрахунків у поставленій задачі потрібно використати ступінь рухомості робота, вид кінематичних пар і послідовність їх розміщення. Цих данних достатньо, щоб провести структурний аналіз побудови промислових роботів.

Здійснення більшості технологічних операцій та допоміжних переходів необхідні достатньо універсальні промислові роботи, які мють 5…7 ступенів рухомості із слідуючим структурним розподілом їх по кінематичних групах:

$$5\ldots7 = (\ 0\ldots1\ )о + 3р + (\ 2\ldots3\ )к$$

Тобто, до універсальних промислових роботів можуть бути віднесені роботи, як стаціонарного, так і рухомого виконання з трьома ступенями рухомості руки і двома-трьома ступенями рухомості кисті. Роботи, які мають меншу кількість ступенів рухомості , виконуються спеціалізованого або спецільного призначення, а з більшою рухомістю є високоманеврені широкоуніверсальні.

Найбільш поширені кінематичні схеми таких роботів, які працюють в типових системах координат, приведені на (рис.1). При цьому врахована загальноприйнята умова, що формування робочої зони здійснюється ступенями рухомості руки робота, яка призначена для забезпечення основних регіональних (співпадаючих з розмірами робота) рухів по переміщенню робочого органу. Рухи кисті носять локальний характер і при визначенні виду системи координат і форми робочої зони не враховуються. При наявності в промисловому роботі ступенів рухомості основи робота, які забезпечують глобальні переміщення всього робота, їх доцільно враховувати при розгляді вказаних характеристик. Це особливо важливо, якщо рух основи робота призначений для виконання робочого циклу, а не установчих його переміщень (наприклад, переміщення робота від верстата до верстата). На цих схемах прийняті слідуючі позначення :

По , Оо , Пр , Ор , Пк , Ок – поступальні чи обертальні рухи кінематики основи, руки і кисті робота.

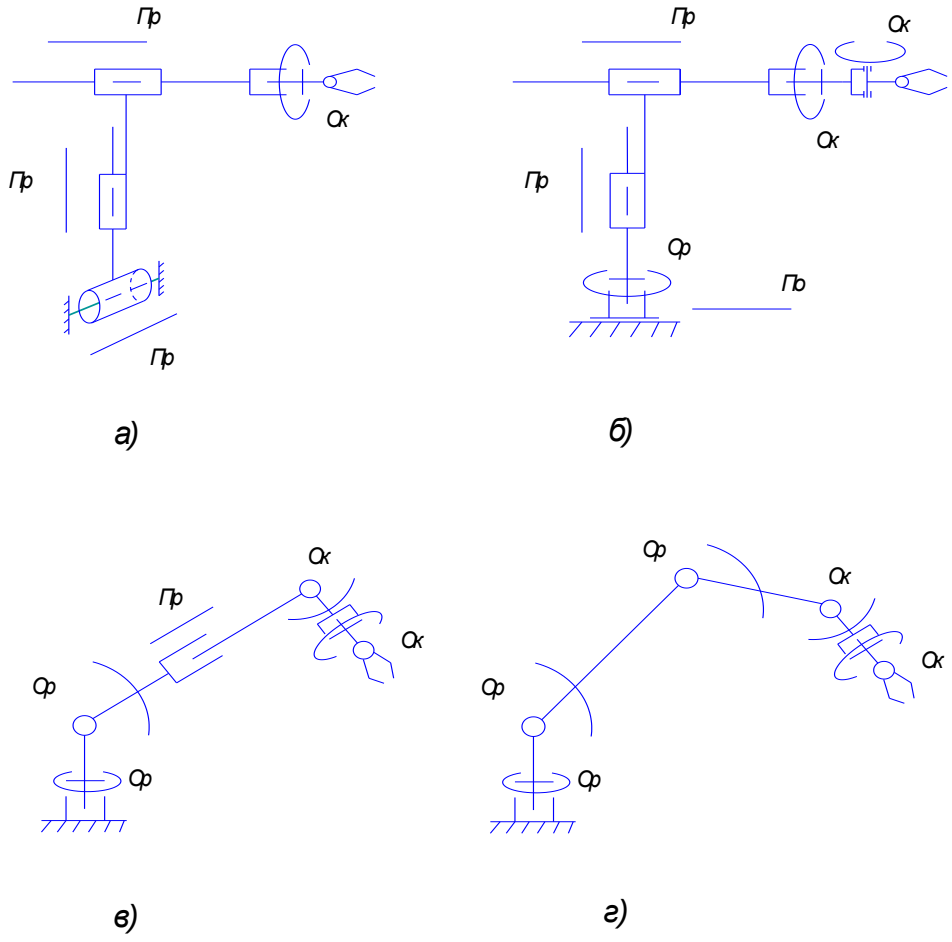


Рис.1 Типові кінематичні схеми однорукіх промислових роботів

2.2 Кількість теоретично можливих схем промислових роботів

Кінематичні схеми промислових роботів складаються з кінематичних пар V-го класу. Вони відтворюють поступальні (П) і обертальні (О) рухи ланок робота.

Загальна кількість таких варіантів: $n_в = 2^n$

де n – кількість ступенів рухомості робота.

По конструктивному виконанню пари V-го класу поділяються на :

- поступальні пари з прямими (П) і вигнутими (П') ланками;
- обертові із співпадаючою віссю обертання (О) і не співпадаючою (О').

Кількість їх дорівнює : $n_к = 2^n$

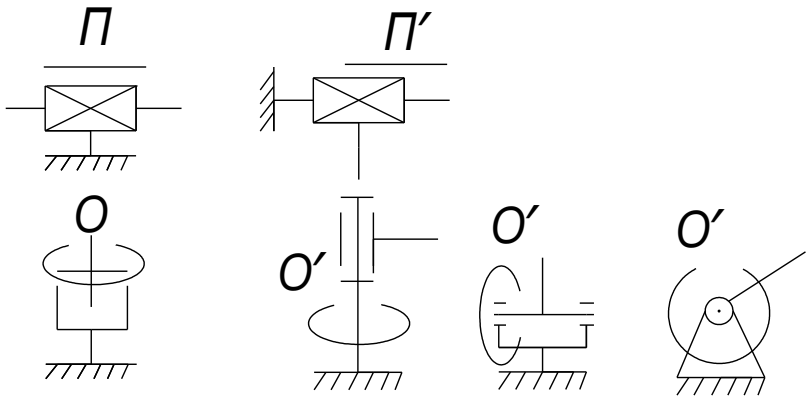


Рис.2 Види кінематичних пар

Дані пари поєднуються між собою взалежності від напрямку руху.

Використовуються такі напрямки рухів :

- співвісні (|);
- паралельні (||);
- перпендикулярні (⊥);
- ті, що перехрещуються (Х).

Кількість їх дорівнює :

$$n_н = 4^{(n-1)}.$$

1.2.1 Дослідження кількості теоретично можливих схем роботів з двома ступінями рухомості

Прослідкуємо, як отримуються кінематичні схеми:

1 Маємо 16 варіантів поєднання пар :

П П	О П	О О′	П′О′
П П′	П О′	О′О	О′П′
П′П	О′П	П′П′	П′О
П О	О О	О′О′	О П′

2 Кожен варіант може бути представлений чотирма видами зв’язків :

П ׀ П	П ׀ П′	П′ ׀ П	П О ׀
П // П	П // П′	П′ // П	П // О
П ׀ П	П ׀ П′	П′ ׀ П	П О ׀
П х П	П х П′	П′ х П	П х О

О | П П | О′ О′ | П О О |

О // П П // О′ О′ // П О // О

О | П П | О′ О′ | П О О |

О х П П х О′ О′ х П О х О

О | О′ О′ | О П′ | П′ О′ | О′

О // О′ О′// О П′ // П′ О′ // О′

О | О′ О′ | О П′ | П′ О′ | О′

О х О′ О′ х О П′ х П′ О′ х О′

П′ | О′ О′ | П′ П′ | О О | П′

П′ // О′ О′ // П′ П′ // О О // П′

П′ | О′ О′ | П′ П′ | О О | П′

П′ х О′ О′ х П′ П′ х О О х П′

Отже , всього 64 варіанта.

2.2.2 Дослідження загальної кількості теоретично можливих схем роботів

Кількість теоретично можних варіантів кінематичних схем промислових роботів, які складаються з кінематичних пар п'ятого класу, визначається за формулою: $n_{заг} = n_в \cdot n_к \cdot n_н = 2^{2n} 4^{(n-1)}$ або $4^{(n+(n-1))}$;

де n - кількість пар .

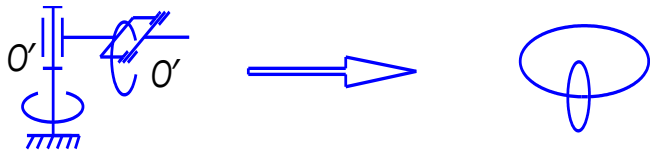
3 Якщо побудувати варіанти кінематичних схем для роботів з двома, трьома, чотирма парами, отримаємо:

Кількість пар	Число варіантів
2	64
3	1024
4	16384
5	262144

2.3 Поділ теоретично можливих схем на групи по ступіні доцільності

Для обгрунтування визнчення найбільш доцільних варіантів пропоную розділити їх на окремі групи за особливими ознаками.

Отже, наступним кроком для вирішення даної задачі, тобто для знаходження доцільних кінематичних схем промислових роботів, стане поділ схем на групи по ступіні доцільності. Як визначити ступінь доцільності схеми ?,- дуже просто. У попередньому пункті було визначено загальну кількість теоретично можливих схем роботів. За основу візьмемо схеми з двома ступенями рухомості. Попередньо визначено, що всього 64 схеми з двома ступенями рухомості. При поєднанні пар V- го класу в структурну формулу, не можна однозначно сказати доцільна буде така схема, чи ні. Саме для цього потрібно побудувати кінематичну схему для кожної структурної формули, утвореної приєднанням пар V- го класу (при 2-х ступінях рухомості). Але цього не достатньо, т.к. в даному випадку можливо тільки прослідкувати можливість приєднання двох пар V- го класу. Тому потрібно для кожної схеми побудувати робочу зону, яка надасть умовне зображення рухових можливостей робота, побудованого за даною схемою. Це буде виглядати таким чином :

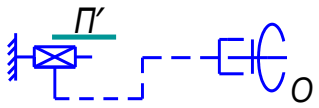


(O' x O')

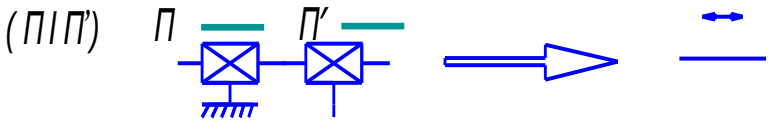
Тепер маємо можливість пред'явити критерії поділу на групи, тобто потрібно визначити вимоги відбору доцільних кінематичних схем роботів. При приєднанні кінематичних пар V- го класу утворюються такі випадки :

1.3.1 Пари, які неможливо приєднати одну до одної , т.к. доводиться неодноразово вигинати їх ланки, що недопустимо. Такі схеми назвемо **<u>нереалізуємими</u>**;

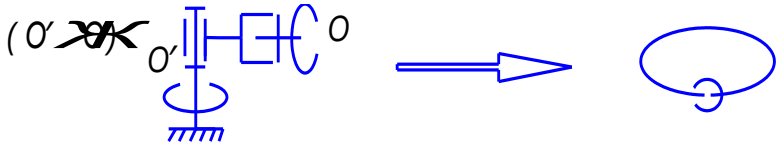
(П' I O)



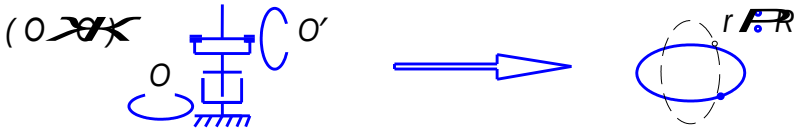
1.3.2 При приєднанні одноіменних пар, які виконують один і той же самий рух, робоча зона буде мати вигляд елементарної траєкторії, яку можливо виконати і одною кінематичною парою V- го класу . Будемо називати дані схеми **<u>недоцільними</u>**;



1.3.3 Деякі поєднання різнойменних пар V- го класу будуть утворювати орієнтуючі рухи, тобто виконуються оберти на 360^0 в певній точці і ця точка може рухатись по колу, або по прямій . З точки зору орієнтуючих можливостей віднесемо такі схеми до **<u>мало доцільних</u>**;



1.3.4 Далі йдуть схеми, які при поєднанні кінематичних пар V- го класуутворюють найбільш раціональну робочу зону : у вигляді циліндра, прямокутника, площини і т.п. Такі схеми будуть **<u>доцільними</u>**;



Треба зазначити, що поділ на групи у більшій мірі є умовним. Бо будова робота може бути дуже різноманітна взалежності від того, яка задача поставлена для даного механізма , або ж які рухи потрібно відтворити. Тому і мало доцільні схеми у деяких випадках можуть стати цілком в пригоді. Але в даному випадку потрібно виділити схеми, які дають більші можливості, і які потрібно реалізовувати в першу чергу.

1.3.5 Серед доцільних варіантів кінематичних схем є багато таких, які відтворюють робочу зону подібну до інших кінематичних схем , не дивлячись на те , що структурні формули виглядають по-різному. Тому кінематичні схеми, з робочими зонами які повторюються, виділимо в окрему групу , - група **<u>подібних</u>** варіантів кінематичних схем. Схеми, які залишились серед доцільних і будуть утворювати групу доцільних кінематичних схем промислових роботів.

Отже, зведемо в *<u>таблицю1</u>* результати поділу кінематичних схем на групи, у вигляді : структурна формула, кінематична схема, коментар та робоча зона.

2.4 Визначення кількості практично нереалізуємих схем роботів

1.4.1 Аналіз утворення нереалізуємих кінематичних схем при двох ступенях рухомості

Першим кроком , у задачі визначення доцільних кінематичних схем промислових роботів , є визначення кількості практично нереалізуємих варіантів, які входять в загальну кількість теоретично можливих кінематичних схем роботів. Візьмемо за основу кінематичні схеми з двома і трьома ступінями рухомості , які складаються з кінематичних пар V- го класу.

Практично нереалізуємі кінематичні схеми виникають лише в деяких поєднаннях кінематичних пар V- го класу при визначених напрямках руху . У попередньому розділі було виділено в окрему групу і відображено в таблиці нереалізуємі варіанти , якими являються :

П // П П // О П // П′ П // О′
П х П П х О П х П′ П х О′

О х П О х О О х П′ О х О′
О // П О // О О // П′ О // О′

П′ | П П | О′ П′ | П′ П′ | О′

О′ | П О′ | О О′ | П′ О′ | О

Серед виділених схем бачимо, що в деяких випадках нема можливості виконати побудову схеми при відповідно встановленому виду руху. Прослідкувавши виникнення даних схем, можна зробити деякі висновки .

Перший випадок : структурна формула, на початку якої стоїть поступальна пара П з прямою ланкою або обертальна пара О із співпадаючою віссю, а до неї при єднана також поступальна пара П з прямою ланкою , або поступальна пара П′ з вигнутою ланкою ; або обертальна пара О зі співпадаючою віссю , або ж обертова пара О′ з неспівападаючою віссю і дані пари за напрямком руху будуть паралельні або схрещуватись, то дана схема буде являтися практично нереалізуємою .

Другий випадок : структурна формула, на початку якої стоїть поступальна пара П′ з вигнутою ланкою або обертова пара О′ з неспівпадаючою віссю , а до неї приєднана одна з поступальних пар (П чи П′), або одна з обертальних пар (О чи

О′), і дані пари за напрямком руху будуть співвісні , то дана схема буде також практично нереалізуєма.

Отже, якщо не брати до уваги напрямок руху, то можна прослідкувати кількість схем , які неможливо практично реалізувати по кожному варіанту поєднання кінематичних пар V- го класу :

П П – 2	О П – 2	П’ П – 1	О’ П – 1
П П’ – 2	О П’ – 2	П’ П’ – 1	О’ П’ – 1
П О – 2	О О – 2	П’ О – 1	О’ О – 1
П О’ – 2	О О’ – 2	П’ О’ – 1	О’ О’ – 1

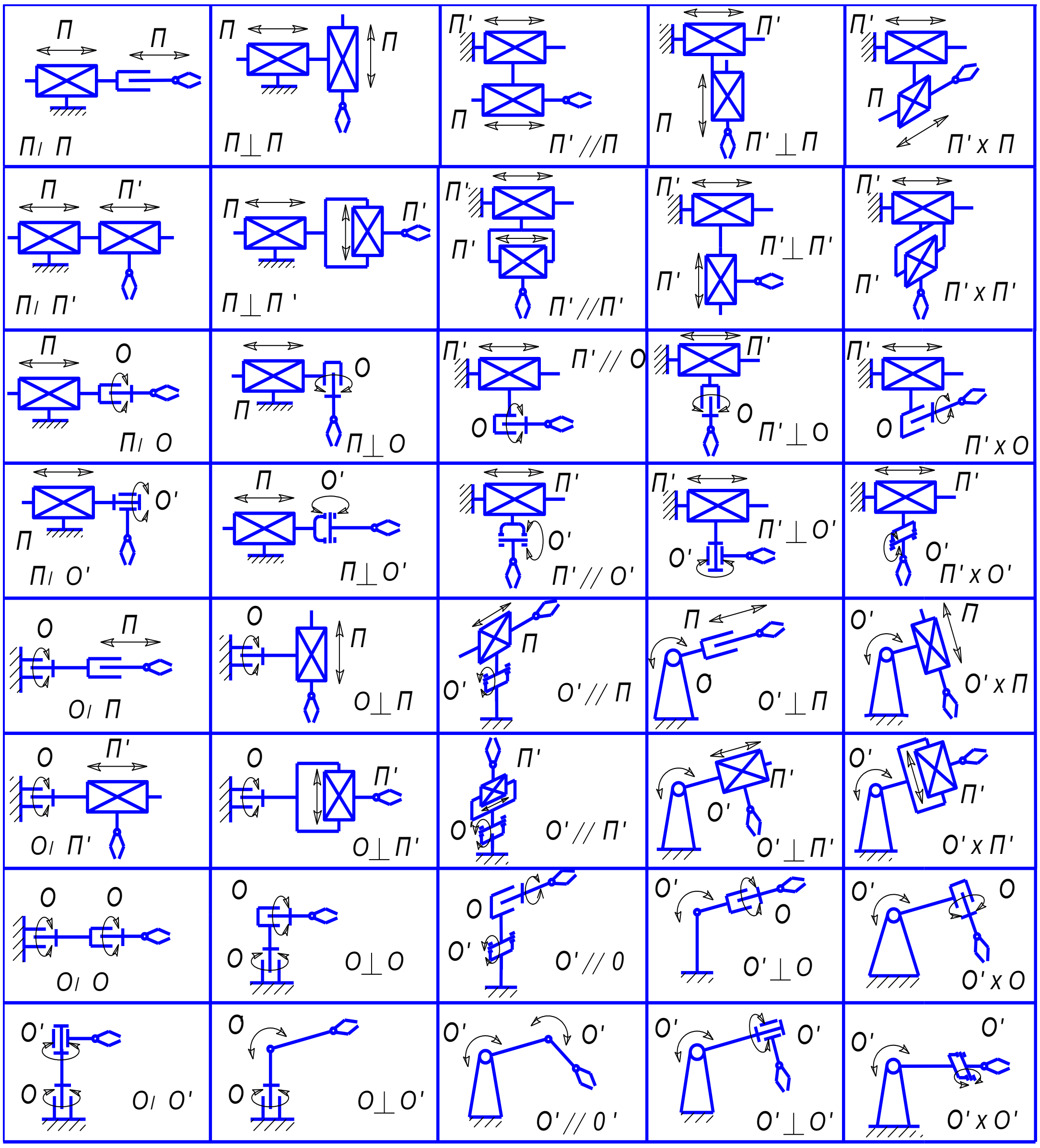
Цю залежність можна використати при обгрунтуванні та виведенні формули знаходження практично нереалізуємих варіантів кінематичних схем. Тому буде доцільно ввести коефіцієнти , які б позначали випадки кількості схем , які неможливо реалізувати при даних поєднаннях кінематичних пар. ВВедемо такі коефіцієнти : Z1 – кількість варіантів поєднань пар, які неможливо практично реалізувати у випадках , коли першою стоїть кінематична пара V- го класу П або О. Z2 – кількість варіантів поєднань пар , які неможливо практично реалізувати у випадках, коли першою стоїть кінематична пара V- го класу П′ або О’.

Пропоную знайти кількість нереалізуємих варіантів кінематичних схем таким чином : від загальної кількості кінематичних схем відняти схеми, які можна реалізувати. Формула знаходження загальної кількості кінематичних схем була приведена вище у двох варіантах ; вибираємо перший :

$$n_{заг} = 2^{2n} \cdot 4^{(n-1)} = 64$$

Далі потрібно вивести формулу для визначення кількості реалізуємих кінематичних схем при двох і трьох ступенях рухомості. Практично уже визначено , реалізуємих варіантів при двох ступенях рухомості буде 40, т.к. всього кінематичних схем при двох ступенях рухомості 64, а нереалізуємих 24. Зведемо реалізуємі варіанти в *таблицю2*:

Табл.2



Далі пропоную прослідкувати, як утворюються схеми промислових роботів при двох ступенях рухомості.

Спочатку розглянемо загальний випадок поєднання поступальних і обертальних пар V- го класу . Маємо 4 поєднання даних пар у загальному вигляді (без врахування напрямку руху) : П П, П О, О П, О О. Таку можливість поєднання можна представити у вигляді : 2^{n}, де n – кількість ступеней рухомості.

Потім потрібно розглянути можливість поєднання поступальних і обертових пар V- го класу , яка враховує варіанти кінематичних пар. Тобто поступальну пару П з прямою ланкою і П’,- з вигнутою ланкою . Так само і обертові пари : О – із співпадаючою віссю , і О’- з не співпадаючою віссю. Отже знову бачимо 4 варіанти кінематичних пар П, П’, О, О’. Таку залежність можна представити у вигляді : 2^{n} , де n – кількість ступеней рухомості.

Наступним кроком буде врахування можливих варіантів поєднання кінематичних пар із визначеними напрямками рухів. Вище були приведені структурні формули нереалізуємих поєднань кінематичних пар , де можна побачити ,які напрямки руху утворюють нереалізуємі кінематичні схеми при визначених поєднаннях кінематичних пар. Всього 4 варіанти напрямків приєднання кінематичних пар V- го класу : співвісні (|), паралельні (||), перпендикулярні (⊥), ті, що перехрещуються (Х). Для знаходження реалізуємих варіантів приєднання кінематичних пар потрібно виключити ті напрямки рухів , які утворюють нереалізуємі схеми . Дану залежність можна представити таким виразом : (4 - Z1) + (4 - Z2) = 5. Тобто перша дужка показує , що для знаходження кількості реалізуємих варіантів потрібно враховувати перший випадок виникнення нереалізуємих схем , який приведений вище ; а саме , від чотирьох напрямків поєднань кінематичних пар V- го класу відняти ті , які утворюють нереалізуємі схеми , у яких першою стоїть поступальна пара П або обертова О, тобто паралельність та перехресність. Друга дужка показує , що для знаходження кількості реалізуємих варіантів потрібно враховувати другий випадок виникнення нереалізуємих схем , який приведений вище ; і від чотирьох видів напрямків поєднань кінематичних пар V- го класу відняти ті , які утворюють нереалізуємі схеми , коли першою стоїть поступальна пара з вигнутою ланкою або обертова з не співпадаючою віссю. Зведемо приведені частини формули в один вираз, який дасть змогу порахувати кількість реалізуємих кінематичних схем промислових роботів :

$n^2{}_p = \frac{(2^n \cdot 2^n) \cdot 5}{2}$; де індекс р ,- реалізуємі ; а n^2 – кількість реалізуємих схем при двох ступенях рухомості. Спростимо вираз : $n^2{}_p = (2^n \cdot 2^n) \cdot \frac{5}{2} = 2^{2n} \cdot \frac{5}{2} = 2^{2n} \cdot 2{,}5 = 40$

У приведеному вигляді дана формула не може використовуватись для обрахування кількості реалізуємих схем при трьох ступенях рухомості . Тому потрібно довести її доцільність для використання при визначенні кількості реалізуємих схем при трьох ступенях рухомості, а також привести її у такий вигляд, який надасть змогу обрахувати кількість реалізуємих схем при довільній ступені рухомості.

1.4.2 Аналіз утворення кінематичних схем при трьох ступенях рухомості

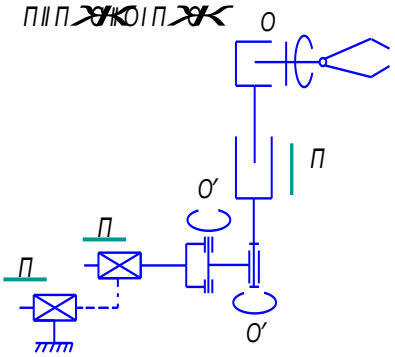
Спробуємо знайти кількість реалізуємих схем при трьох ступеня рухомості чисто-логічним шляхом, розглянувши послідовність утворення таких схем. Якщо схеми з двома ступенями рухомості виникають при поєднанні кінематичних пар V- го класу з відповідними напрямками рухів , то схеми з трьома ступенями рухомості утворюються приєднанням ще одного напрямка руху і додаванням до нього ще одної кінематичної пари V- го класу до цих же схем з двома ступенями рухомості. Для зручності аналізу приєднувати напрямки руху і кінематичні пари буде доцільно зліва, тобто на початку структурної формули. Тобто кожна схема з двома ступенями рухомості ,при утворенні схем з трьома ступенями рухомості , розмножиться пропорційно кількості напрямків руху, і кількості варіантів кінематичних пар . Це означає, що з одної схеми з двома ступенями рухомості виникає 4 схеми з трьома ступенями рухомості, у яких першою буде стояти визначена пара V- го класу, яку буде приєднано чотирма видами напрямків руху.

Наведемо *таблицю3* , яка показує перетворення кінематичної схеми з двома ступенями рухомості в кінематичні схеми з трьома ступенями рухомості :

Табл.3

структурна формула кінематичної схеми з двома ступенями рухомості	приєднувані напрямки рухів	приєднувана кінематична пара	утворені структурні формули з трьома ступенями рухомості
П І О	I	П	П І П І О
	II		П II П І О
	⊥		П ⊥ П І О
	X		П x П І О
П І О	I	П'	П' І П І О
	II		П' II П І О
	⊥		П' ⊥ П І О
	X		П' x П І О
П І О	I	О	О І П І О
	II		О II П І О
	⊥		О ⊥ П І О
	X		О x П І О
П І О	I	О'	О' І П І О
	II		О' II П І О
	⊥		О'⊥ П І О
	X		О' x П І О

З приведеної вище закономірності видно, що з 40-ка схем з двома ступінями рухомості утвориться 640 схем з трьома ступенями рухомості (40 * 4 * 4 = 640). Але треба зауважити , що серед цих схем будуть також нереалізуємі кінематичні схеми з трьома ступенями рухомості, т.к. при приєднанні до кінематичного ланцюга реалізуємої кінематичної схеми хоча б однієї ланки, яка утворює нереалізуєме поєднання кінематичних пар V- го класу , то дана кінематична схема автоматично стає нереалізуємою, незалежно від ступені рухомості кінематичної схеми. Наведемо приклад



Для зручності і наглядності проведення подальшого кінематичного аналізу, пропоную звести у таблицю 4 варіанти поєднання кінематичних пар V- го класу із виділенням саме нереалізуємих поєднань. Напрямок руху і приєднувану кінематичну пару V- го класу відобразимо закресленими :

Табл.4

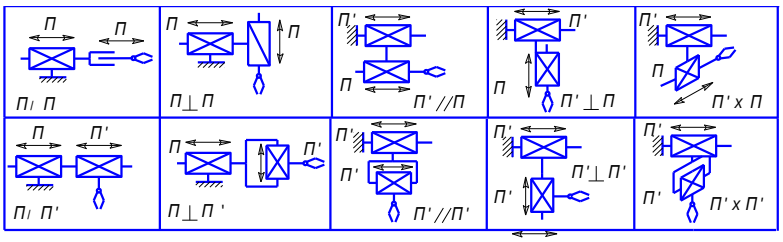
кінематична пара V- го класу, до якої приєднуємо	кінематичні пари V- го класу з відповідним напрямком руху, які приєднуємо				кінематична пара V- го класу, до якої приєднуємо	кінематичні пари V- го класу з відповідним напрямком руху, які приєднуємо			
П	ІП	ІП'	ІО	ІО'	П'	~~ІІ~~	~~ІІ'~~	~~ІО~~	~~ІО'~~
	~~ІІІ~~	~~ІІІ'~~	~~ІІО~~	~~ІІО'~~		ІІІ	ІІІ'	ІІО	ІІО'
	⊥П	⊥П'	⊥О	⊥О'		⊥П	⊥П'	⊥О	⊥О'
	~~хП~~	~~хП'~~	~~хО~~	~~хО'~~		хП	хП'	хО	хО'
кінематична пара V- го класу, до якої приєднуємо	кінематичні пари V- го класу з відповідним напрямком руху, які приєднуємо				кінематична пара V- го класу, до якої приєднуємо	кінематичні пари V- го класу з відповідним напрямком руху, які приєднуємо			
О	ІП	ІП'	ІО	ІО'	О'	~~ІІ~~	~~ІІ'~~	~~ІО~~	~~ІО'~~
	~~ІІІ~~	~~ІІІ'~~	~~ІІО~~	~~ІІО'~~		ІІІ	ІІІ'	ІІО	ІІО'
	⊥П	⊥П'	⊥О	⊥О'		⊥П	⊥П'	⊥О	⊥О'
	~~хП~~	~~хП'~~	~~хО~~	~~хО'~~		хП	хП'	хО	хО'

1.4.3 Обгрунтування знаходження кількості реалізуємих схем

Стандартною схемою приєднання кінематичних пар і напрямків рухів не вдалося знайти кількість реалізуємих кінематичних схем, тому наступним кроком знаходження реалізуємих кінематичних схем буде відкидання з загальної кількості кінематичних схем з трьома ступенями рухомості , які отримались з реалізуємих схем з двома ступенями рухомості, нереалізуємих кінематичних схем з трьома ступенями рухомості.

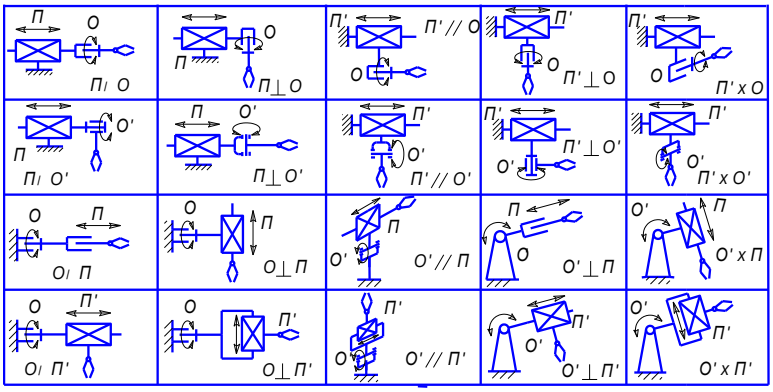
Для зручності, поділимо загальні варіанти пєднань кінематичних пар на групи. ***Перша група*** буде складатись із поступальних пар П і П′, які при поєднанні у визначених напрямках руху утворять релізуємі кінематичні схеми з двома ступенями рухомсті (див. табл. 5), до яких будемо приєднувати поступльні пари з відповідними напрямками руху за умови , що отримаємо структурні формули реалізуємих кінематичних схем. В загальному вигляді така структурна формула буде виглядати так : **П П П** .

табл. 5



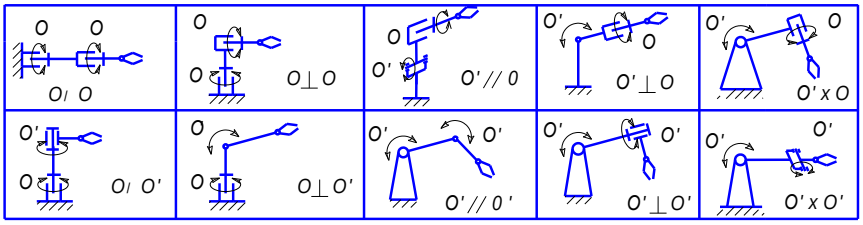
Друга група буде складатись із поступальних пар П і П′, які при поєднанні утворять аналогічні реалізуємі кінематичні схеми з двома ступенями рухомості, але приєднквати уже будемо до них обертальні пари V- го класу , щоб отримались структурні формули реалізуємих кінематичних схем ; а також із реалізуємих схем з двома ступенями рухомості , які утворились поєднанням поступальних і обертальних (див. табл. 6), до яких будемо приєднувати поступальні пари з відповідними напрямками руху, щоб отримати структурні формули реалізуємих кінематичних схем. В загальному вигляді такі структурні формули будуть виглядати так : **П П О, П О П** та **О П П**.

табл. 6



Третя група буде складатись із обертальих пар О і О′ , які при поєднанні у визначених напрямках руху утворять реалізуємі кінематичні схеми з двома ступінями рухомості (див.табл. 7), до яких будемо приєднувати поступальні пари з відповідними напрямками руху, щоб отримати структурні формули реалізуємих кінематичних схем ; а також із реалізуємих схем з двома ступенями рухомості , які утворюють поєднання поступальних і обертальних кінематичних пар (див.табл. 6) , до яких будемо приєднувати обертальні пари з відповідними напрямками рухів, щоб отримати структурні формули реалізуємих кінематичних схем. В загальному вигляді такі структурні формули будуть виглядати так : **О О П, О П О** та **П О О**.

табл. 7



Четверта група буде складатись із обертальних пар О і О′, які при поєднанні у визначених напрямках руху утворять реалізуємі кінематичні схеми з двома ступінями рухомості (див.табл.7),до яких будемо приєднувати обертові пари з відповідними напрямками рухів, щоб отримати структурні формули реалізуємих кінематичних схем . В загальному випадку така структурна формула буде виглядати так : **О О О.**

Проаналізуємо *першу групу* і знайдемо реалізуємі варіанти кінематичних схем з трьома ступінями рухомості , які будуть входити в дану групу . Отже є 10 поєднань кінематичних пар , які утворюють реалізуємі кінематичні схеми з двома

ступенями рухомості : П І П, П ⊥ П, П′II П, П′ ⊥ П, П′х П, П І П′, П ⊥ П′, П′II П′, П′ ⊥ П′, П′х П′. Для побудови схем з трьома ступенями рухомості, до перелічених структурних формул треба приєднати поступальні пари П і П′ на початку кінематичного ланцюга, але так , щоб утворились реалізуємі кінематичні схеми з трьома ступінями рухомості. Тобто потрібно виключити ті напрямки рухів, які утворюють нереалізуємі поєднання кінематичних пар, за допомогою приведених вище дужок. Кількість таких реалізуємих схем можна визначити за формулою :

$n_p^{III} = n_p{}^{III}_{ППП} = n_{p1}{}^{II} * ((4 – Z1) + (4 – Z2)) = 10 * 5 = 50$,

де $n_{p1}{}^{II}$ - кількість реалізуємих кінематичних схем з двома ступенями рухомості для даної групи.

Проаналізуємо *другу групу* і знайдемо кількість реалізуємих варіантів кінематичних схем з трьома ступінями рухомості . Отже , щоб утворити схеми типу ***О П П***, потрібно використати 10 поєднань кінематичних пар, які приведені вище (що утворюють реалізуємі кінематичні схеми з двома ступенями рухомості). До них треба приєднати на початку кінематичного ланцюга обертальні пари О і О′. Отримаємо формулу : $n_p{}^{III}_{ОПП} = 2^{n-2} * ((4 – Z1) + (4 – Z2))^{n-1} = 2 * 25 = 50$

Щоб утворити схеми типу ***П О П*** , потрібно до схем з двома ступінями рухомості (О І П, О ⊥ П, О′II П , О′ ⊥ П, О′х П, О І П′, О ⊥ П′, О′ II П′, О′ ⊥ П′, О′ х П′) додати поступальні пари П і П′, за умови, що вони утворять реалізуємі поєднання кінематичних пар. Кількість таких схем буде така : $n_p{}^{III}_{ПОП} = 2^{n-2} * ((4 – Z1) + (4 – - Z2))^{n-1} = 2 * 25 = 50$.Щоб утворити схеми типу ***П П О*** , потрібно до схем з двома ступенями рухомості (П І О', П ⊥ О', П' II О', П' ⊥ О', П' х О', П' х О, П' О, П' II О, П ⊥ О, П І О) додати поступальні пари П І П' на початку кінематичного ланцюга , за умови, що отримаємо реалізуємі поєднання кінематичних пар . Кількість реалізуємих схем : $n_p{}^{III}_{ППО} = 2^{n-2} * ((4 – Z1) + (4 –$

$- Z2))^{n-1} = 2 * 25 = 50$. Знайдемо загальну кількість реалізуємих схем для другої групи : $n_p{}^{III}{}_2 = n_p{}^{III}_{ОПП} + n_p{}^{III}_{ПОП} + n_p{}^{III}_{ППО} = 50 + 50 + 50 = 150$

Проаналізуємо *третю групу* і знайдемо кількість реалізуємих варіантів кінематичних схем з трьома ступінями рухомості . Отже , щоб утворити схеми типу ***О О П***, потрібно використати 10 поєднань кінематичних пар (О І П, О ⊥ П, О′II П , О′ ⊥ П, О′х П, О І П′, О ⊥ П′, О′ II П′, О′ ⊥ П′, О′ х П′). До них треба

приєднати на початку кінематичного ланцюга обертальні пари О і О′. Отримаємо таку кількість реалізуємих варіантів : $n_p^{III}{}_{ООП} = 2^{n-2} * ((4 – Z1) + (4 – Z2))^{n-1} = 2 * 25 = 50$. Щоб утворити схеми типу ***О П О*** , потрібно до схем з двома ступінями рухомості (П I O', П ⊥ O', П' II O', П' ⊥ O', П' x O', П' x O, П' O, П' II O, П ⊥ O, П I O) додати обертальні пари О і О′ на початку кінематичного ланцюга , за умови, що вони утворять реалізуємі поєднання кінематичних пар. Кількість таких схем буде така : $n_p^{III}{}_{ОПО} = 2^{n-2} * ((4 – Z1) + (4 – - Z2))^{n-1} = 2 * 25 = 50$.Щоб утворити схеми типу ***П О О*** , потрібно до схем з двома ступенями рухомості (O I O, O ⊥ O, O' II O, O' ⊥ O, O' x O, O I O', O ⊥ O', O' II O', O' ⊥ O', O' x O') додати поступальні пари П I П' на початку кінематичного ланцюга , за умови, що отримаємо реалізуємі поєднання кінематичних пар . Отримаємо таку кількість реалізуємих схем : $n_p^{III}{}_{ПОО} = 2^{n-2} * ((4 – Z1) + (4 – Z2))^{n-1} = 2 * 25 = 50$. Знайдемо загальну кількість реалізуємих схем для другої групи : $n_p^{III}{}_{З} = n_p^{III}{}_{ООП} + n_p^{III}{}_{ОПО} + n_p^{III}{}_{ПОО} = 50 + 50 + 50 = 150$.

Проаналізуємо *четверту групу* і знайдемо реалізуємі варіанти кінематичних схем з трьома ступінями рухомості , які будуть входити в дану групу . Отже , щоб утворити схеми типу ***О О О***, потрібно використати схеми з двома ступенями рухомості , які приведені вище , і до них приєднати обертальні пари О і О', але так , щоб утворились реалізуємі кінематичні схеми з трьома ступінями рухомості. Кількість таких реалізуємих схем можна визначити за формулою : $n_{p4}^{III} = n_p^{III}{}_{ООО} = 2^{n-2} * ((4 – Z1) + (4 – Z2))^{n-1} = 2 * 25 = 50$.

Знайдемо загальну кількість реалізуємих схем з трьома ступенями рухомості : $n_{p\ заг} = n_{p1}^{III} + n_{p2}^{III} + n_{p3}^{III} + n_{p4}^{III} = 50 + 150 + 150 + 50 = 400$

Проаналізувавши всеможливі варіанти утворення кінематичних схем з трьома ступенями рухомості і відкинувши поєднання кінематичних пар , які утворюють нереалізуємі кінематичні схеми , було визначено , що реалізуємих кінематичних схем з трьома ступенями рухомості всього буде 400. Вище було виведено формулу знаходження кількості реалізуємих кінематичних схем з двома ступенями рухомості , яку потрібно перетворити у такий вигляд, щоб вона рахувала кількість реалізуємих схем при довільній ступені рухомості . Пропоную ввести додатковий показник степіні , який буде визначати ступінь рухомості :

$$n_p^n = 2^{2n} * 2{,}5^{n-1}$$

Перевіримо : $n_p^2 = 2^{2 \cdot 2} * 2{,}5^{2-1} = 40$; $n_p^3 = 2^{2 \cdot 3} * 2{,}5^{3-1} = 400$

1.4.3 Вивід формули знаходження нереалізуємих кінематичних схем

Далі , як було запропоновано вище, можна знайти кількість нереалізуємих кінематичних схем. Від загальної кількості кінематичних схем віднімемо схеми, які можна реалізувати , за допомогою виведених формул :

$n^n_{заг} = 2^{2n}4^{(n-1)}$ - загальна кількість кінематичних схем при довільній ступені рухомості ;

$n_p^n = 2^{2n} * 2{,}5^{(n-1)}$ – кількість реалізуємих кінематичних схем при довільній ступені рухомості .

Виведемо формулу кількості нереалізуємих варіантів кінематичних схем при довільній ступені рухомості :

$n_{нер}^n = n_{заг}^n - n_p^n = (2^{2n} * 4^{(n-1)}) - (2^{2n} * 2{,}5^{(n-1)}) = 2^{2n}(4^{(n-1)} - 2{,}5^{(n-1)})$

Отже формула буде така : $\mathbf{n_{нер}^n = 2^{2n}(4^{(n-1)} - 2{,}5^{(n-1)})}$

Перевіримо доцільність даної формули і розрахуємо кількість нереалізуємих кінематичних схем при двох ступенях рухомості і трьох ступенях рухомості :

$n_{нер}^2 = 2^{2 \cdot 2}(4^{(2-1)} - 2{,}5^{(2-1)}) = 16(4 - 2{,}5) = 24$

$n_{нер}^3 = 2^{2 \cdot 3}(4^{(3-1)} - 2{,}5^{(3-1)}) = 64(16 - 6{,}25) = 624$

Отримано результати : 1) кількість нереалізуємих кінематичних схем при двох ступенях рухомості $n_{нер}^2 = 24$;

2) кількість нереалізуємих кінематичних схем при трьох ступенях рухомості $n_{нер}^3 = 624$

2.5 Визначення кількості недоцільних схем роботів

2.5.1 Аналіз утворення недоцільних кінематичних схем при двох ступенях рухомості

Другим кроком у задачі визначення доцільних кінематичних схем промислових роботів є визначення кількості недоцільних варіантів, які входять в загальну кількість теоретично можливих кінематичних схем роботів. Візьмемо за основу кінематичні схеми з двома і трьома ступінями рухомості , які складаються з кінематичних пар V-го класу.

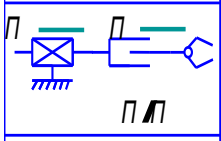
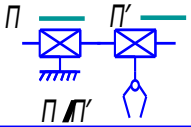
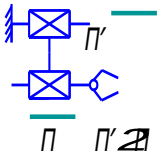
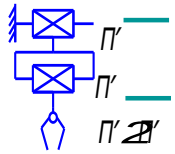
Недоцільні кінематичні схеми виникають лише в деяких поєднаннях кінематичних пар V-го класу при визначених напрямках руху. У розділі поділу кінематичних схем по ступіні доцільності виділено схеми з двома ступінями рухомості , які являються недоцільними. Як було сказано вище , **недоцільні схеми** – це такі схеми , які утворюються поєднанням двох кінематичних пар V-го класу , які мають один напрямок руху і при реалізації структурної схеми буде виконуватись тільки один рух (прямолінійний, обертальний); його можливо замінити використанням одної кінематичної пари , яка буде виконувати один еквівалентний рух і відтворювати ті ж самі функції . Запишемо структурні формули недоцільних схем :

П ∣ П П′ // П О О ∣

П ∣ П′ П′ // П′ О ∣ О′

Проаналізуємо виділені схеми , щоб дізнатися у яких випадках виникають недоцільні поєднання кінематичних пар.

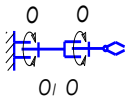
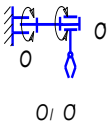
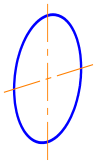
Табл. 8

Кінематична схема, яку можливо практично реалізувати	Робоча зона, яку утворює дана схема	Характеристика робочої зони
		Робоча зона у вигляді прямої лінії
		Робоча зона у вигляді прямої лінії
		Робоча зона у вигляді прямої лінії
		Робоча зона у вигляді прямої лінії

Перший випадок : структурні формули , які складаються з поступальних пар. Такі варіанти в загальному вигляді можна записати так : $ПП$, $ПП'$, $П'П$, $П'П'$. Кожен такий варіант має одну недоцільну схему при визначеному напрямку руху. Тобто утворюються такі схеми $П \mid П$, $П \mid П'$, $П' \parallel П$ та $П' \parallel П'$ (див. Табл.. 8).

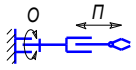
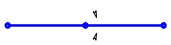
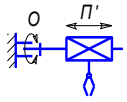
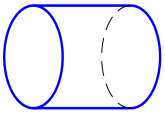
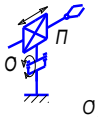
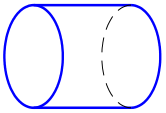
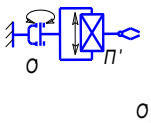
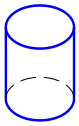
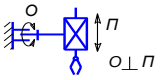
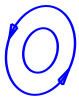
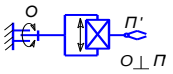
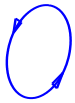
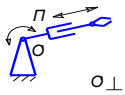
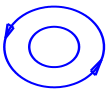
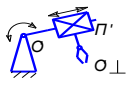
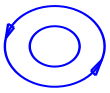
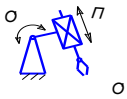
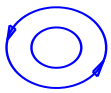
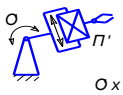
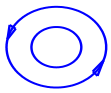
Другий випадок : структурні формули , які складаються з обертальних пар. Такі варіанти в загальному вигляді можна представити так : О О , О О′. Кожен такий варіант має також по одній недоцільній схемі при визначеному напрямку руху. Тобто утворюються такі схеми : О О, О ∣∣ О′ (див. Табл.9).

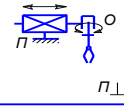
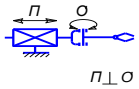
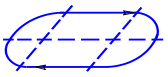
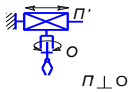
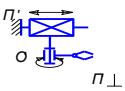
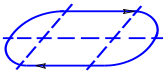
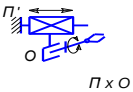
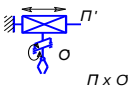
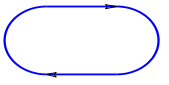
Табл.9

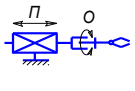
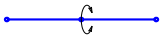
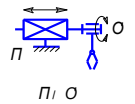
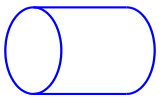
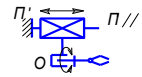
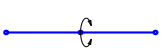
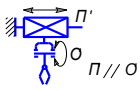
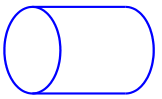
Кінематична схема, яку можливо практично реалізувати	Робоча зона, яку утворює дана кінематична схема	Характеристика робочої зони
		За допомогою цих двох рухів утворюється робоча зона у вигляді ротації в точці
		За допомогою цих двох рухів утворюється робоча зона у вигляді колової лінії

Залишилися схеми, які складаються з поступальних і обертальних пар V-го класу , котрі в загальному вигляді відображаються як П О і О П . Проаналізувавши кінематичні схеми і робочі зони, які вони утворюють , можна зробити висновок, що схеми такого виду не можуть бути віднесені до недоцільних , т.к. не відповідають умовам недоцільності (див. табл. 10).

табл. 10

Кінематична схема, яку можливо практично реалізувати	Робоча зона, яку утворює дана кінематична схема	Характеристика робочої зони
		утворюється робоча зона у вигляді прямої лінії з ротацією навколо цієї лінії
		утворюється робоча зона у вигляді поверхні циліндра
		утворюється робоча зона у вигляді поверхні циліндра
		утворюється робоча зона у вигляді поверхні циліндра
		утворюється робоча зона у вигляді плоского кільця
		утворюється робоча зона у вигляді колової площини
		утворюється робоча зона у вигляді плоского кільця
		утворюється робоча зона у вигляді плоского кільця
		утворюється робоча зона у вигляді плоского кільця
		утворюється робоча зона у вигляді плоского кільця

		утворюється робоча зона у вигляді прямої лінії з ротацією перпендикулярно до цієї лінії
		утворюється робоча зона у вигляді радіусної площини
		утворюється робоча зона у вигляді прямої лінії з ротацією перпендикулярно до цієї лінії
		утворюється робоча зона у вигляді радіусної площини
		утворюється робоча зона у вигляді прямої лінії з ротацією перпендикулярно до цієї лінії
		утворюється робоча зона у вигляді радіусної площини

		утворюється робоча зона у вигляді прямої лінії з ротацією навколо цієї лінії
		утворюється робоча зона у вигляді поверхні циліндра
		утворюється робоча зона у вигляді прямої лінії з ротацією навколо цієї лінії
		утворюється робоча зона у вигляді поверхні циліндра

Отже, якщо не брати до уваги напрямок руху, то можна прослідкувати кількість схем, які являються недоцільними по кожному варіанту поєднання кінематичних пар V-го класу :

$$П \mid П - 1 \qquad П' \parallel П' - 1$$

$$П \mid П' - 1 \qquad О \quad О \mid - 1$$

$$П' \parallel П - 1 \qquad О \mid О' - 1$$

Цю залежність можна використати при обґрунтуванні та виведенні формули знаходження недоцільних варіантів кінематичних схем. Тому буде доцільно ввести коефіцієнти , які б позначали випадки кількості недоцільних схем , які виникають при даних поєднаннях кінематичних пар. Введемо такий коефіцієнт : к – кількість схем, які являються недоцільними по кожному варіанту поєднання кінематичних пар V-го класу.

Пропоную знайти кількість недоцільних варіантів кінематичних схем по запропонованому вище алгоритму , який використано при знаходженні кількості нереалізуємих схем. Зміст даного алгоритму заключається в тому , що від загальної кількості схем відкидаємо схеми, які можливо реалізувати. Але в даному випадку вираз „загальна кількість схем” дещо змінює свій зміст. Якщо уявити , що нереалізуємі схеми ми нібито відсікли , то залишились схеми , які відносяться до недоцільних, мало доцільних, подібних і доцільних схем, які будемо вважати *загальною кількістю схем для даної групи*. Тобто в даному випадку ця загальна

кількість схем для даної групи не враховує схеми, які відносяться до групи з нижчою ступінню доцільності (нереалізуємі). Відповідно кількість схем, які не включають схеми даної групи, і до яких входять схеми груп вищої ступіні доцільності, будемо називати *схемами , які можливо реалізувати для даної групи*.

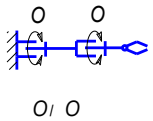
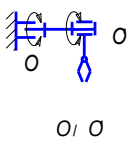
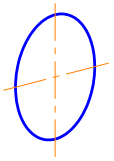
Формулу знаходження загальної кількості схем для даної групи , можливо виразити у тому ж вигляді, як і формулу знаходження реалізуємих варіантів кінематичних схем при довільній ступені рухомості для нереалізуємих схем, а саме :

$n_p^n = 2^{2n} * 2{,}5^{n-1}$, де n – ступінь рухомості.

Дана формула відповідає вимогам, т.к. вона визначає кількість схем які входять до недоцільних , мало доцільних, подібних та доцільних варіантів кінематичних схем, загальна кількість яких і буде загальною кількістю схем для даної групи.

Далі потрібно вивести формулу для визначення кількості реалізуємих кінематичних схем для даної групи при двох і трьох ступенях рухомості. Дана формула повинна визначати кількість схем, які входять до мало доцільних, подібних і доцільних груп доцільності . Для виведення потрібної формули пропоную прослідкувати, як утворюються схеми промислових роботів при *двох ступенях рухомості*. Практично уже визначено недоцільні варіанти при двох ступенях рухомості (див. Табл. 11).

Табл. 11

Кінематична схема, яку можливо практично реалізувати	Робоча зона, яку утворює дана кінематична схема	Характеристика робочої зони
		утворюється робоча зона у вигляді ротації в точці
		утворюється робоча зона у вигляді колової лінії

Проаналізуємо **перший випадок** виникнення недоцільних кінематичних схем, тобто тих, які складаються з поступальних пар. Як було вище сказано, кожен такий варіант має по одній недоцільній схемі при визначеному напрямку руху. Отже

кількість недоцільних схем, які складаються з поступальних пар можливо визначити за формулою :

$2^n * к = 4$, де n – кількість ступеней рухомості ;

к – кількість схем , які являються недоцільними по кожному варіанту поєднання кінематичних пар V-го класу .

Проаналізуємо **<u>другий випадок</u>**, коли структурні формули складаються з обертальних пар V-го класу . Кожен такий варіант має також по одній недоцільній схемі при визначеному напрямку руху . Отже визначити кількість схем , які складаються з обертальних пар можна використовуючи формулу :

$\frac{2^n}{2} * K = 2$, де n – кількість ступеней рухомості ;

к – кількість схем , які являються недоцільними по кожному варіанту поєднання кінематичних пар V-го класу .

Розглянемо в математичному вигляді , як утворилась загальна кількість недоцільних кінематичних схем **<u>ППП</u>**. Всього 10 варіантів поєднань поступальних кінематичних пар V-го класу, без урахування недоцільних кінематичних схем :

П ∣ П	П ∣ П′	П′ // П	П′ // П′
П ⊥ П	П ⊥ П′	П′ ⊥ П	П′ ⊥ П′
		П′ x П	П′ x П′

Бачимо, що вище приведені структурні формули утворюються при визначених напрямках руху кінематичних пар. Якщо структурні формули , де першою є поступальна кінематична пара з прямою ланкою , утворюють два напрямки поєднань : співвісність та перпендикулярність , то позначимо цей випадок коефіцієнтом К1. Структурні формули , де першою є поступальна кінематична пара з вигнутою ланкою, утворюють три напрямки руху, тому позначимо цей випадок коефіцієнтом К2 . Отже приймаємо коефіцієнти , які позначуть вище приведені випадки : К1 = 2 і К2 = 3. Тому загальна кількість кінематичних схем, які складаються з поступальних пар , можна виразити формулою :

$\frac{2^n}{2} * (K1 + K2) = 10$, де n – кількість ступеней рухомості.

За допомогою приведених вище формул можливо записати математичний вираз, який покаже, як знайти кількість реалізуємих схем для даної групи :

$\left(\frac{2^n}{2}*(K1+K2)\right)-(2^n\cdot K)=10-4=6$, де n – кількість ступеней рухомості.

Таким же чином виразимо математично кількість схем, які в загальному вигляді позначимо як **ПО** та **ОП**. Схеми типу ПО і ОП утворюються таким же чином, як і схеми з двома поступальними парами, тому їх можна виразити аналогічно. Отже запишемо загальну формулу для знаходження таких схем :

$\frac{2^n\cdot 2^n}{2}*(K1+K2)=\frac{2^{2n}}{2}*(K1+K2)=20$, де n – кількість ступеней рухомості.

Зазначимо, що серед цих схем нема недоцільних (див.табл.10) :

П ∣ О	П′ // О	П // О′	О ∣ П	О′ // П	О′ // П′
П ⊥ О	П′ ⊥ О	П ⊥ О′	О ⊥ П	О′ ⊥ П	О′ ⊥ П′
П ∣ О′	П′ x О	П x О′	О ∣ П′	О′ x П	О′ x П′
П ⊥ О′			О ⊥ П′		

Якщо розглянути утворення схем типу **ОО**, то знову побачимо ті ж самі напрямки рухів з відповідними кінематичними парами . Тобто знову застосуймо формулу $\frac{2^n}{2}*(K1+K2)=10$ для знаходження реалізуємих схем для даної групи, які не будуть включати в себе недоцільні поєднання кінематичних пар V-го класу . Кількість недоцільних схем типу ОО, за допомогою формули , було визначено вище, тому є змога записати формулу кількості схем ОО, які не являються недоцільними :

$\left(\frac{2^n}{2}*(K1+K2)\right)-(2^n/2\cdot K)=10-2=8$, де n – кількість ступеней рухомості.

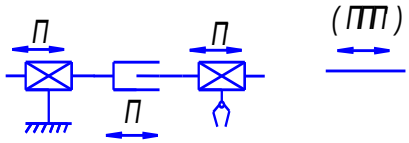
Після достатнього обґрунтування утворення недоцільних схем з двома ступенями рухомості перейдемо до розгляду недоцільних схем з трьома ступенями рухомості.

1.5.2 Аналіз утворення недоцільних кінематичних схем з трьома ступенями рухомості

Вище було сказано , що схеми з трьома ступенями рухомості утворюються приєднанням кінематичної пари V-го класу і відповідно напрямка руху до кінематичної схеми з двома ступенями рухомості, і приєднання робимо на початку

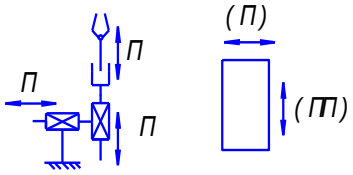
структурної формули . Якщо логічно обґрунтувати , як можна утворити недоцільну схему, то є три способи.

Перший спосіб : візьмемо недоцільну кінематичну схему з двома ступенями рухомості і приєднаємо до неї ще одну пару V-го класу так, щоб приєднана кінематична пара з наступною утворювала недоцільне поєднання кінематичних пар V-го класу . Наприклад беремо дві недоцільні структурні формули з двома ступенями рухомості П ׀ П і П ׀ П′ ; складемо їх у структурну формулу з трьома ступенями рухомості : П ׀ П ׀ П′ , і відтворимо її у вигляді кінематичної схеми , а також покажемо її робочу зону :



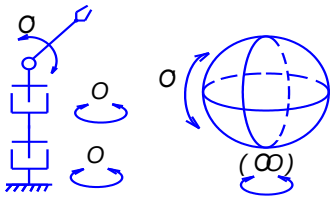
Таку схему з трьома ступенями рухомості можливо замінити всього одною поступальною парою V-го класу П або П′ .

Другий спосіб : візьмемо недоцільну кінематичну схему з двома ступенями рухомості і приєднаємо до неї ще одну пару V-го класу так, щоб приєднана кінематична пара з наступною не утворювала недоцільне поєднання кінематичних пар V-го класу . Отже утвориться схема , яка є недоцільною і складається з двох частин , це недоцільне поєднання двох кінематичних пар і поєднання кінематичних пар , яке не можна вважати недоцільним . Наприклад , беремо недоцільну структурну формулу з двома ступенями рухомості П ׀ П і доцільну структурну формулу з двома ступенями рухомості П ⊥ П ; складемо їх у структурну формулу з трьома ступенями рухомості : П ⊥ П ׀ П , і відтворимо її у вигляді кінематичної схеми , а також покажемо робочу зону :



Таку схему з трьома ступенями рухомості можливо замінити двома поступальними кінематичними парами.

Третій спосіб : візьмемо кінематичну схему , яку не можна вважати недоцільною (з двома ступенями рухомості) і приєднаємо до неї ще одну пару V-го класу так , щоб приєднана кінематична пара з наступною утворювала недоцільне поєднання кінематичних пар. Отже утвориться схема , яка є недоцільною і складається з двох частин , це поєднання двох кінематичних пар, яке не можна вважати недоцільним і приєднана до неї недоцільна схема з двома ступенями рухомості . Наприклад , беремо доцільну структурну формулу О ⊥ О' і недоцільну структурну формулу О І О ; складемо їх у структурну формулу з трьома ступенями рухомості : О І О ⊥ О' , і відтворимо її у вигляді кінематичної схеми , а також покажемо робочу зону :



Таку схему з трьома ступенями рухомості можливо замінити двома обертальними кінематичними парами О і О' .

За розглянутими способами утворення недоцільних кінематичних схем з трьома ступенями рухомості можна зробити **висновок** , що будь-яку недоцільну кінематичну схему з трьома ступенями рухомості можна замінити схемою з двома ступенями рухомості ; а в деяких випадках недоцільну кінематичну схему з довільною ступінню рухомості можна замінити навіть одною кінематичною парою V-го класу , як це було представлено у першому способі утворення недоцільних кінематичних схем . Тому , для того , щоб представити вище розглянуте у алгебраїчному вигляді , потрібно врахувати всі варіанти недоцільних поєднань кінематичних пар , а також відкинути можливі нереалізуємі поєднання кінематичних пар.

Далі діємо за тією ж схемою : для виводу формули знаходження недоцільних кінематичних схем , від загальної кількості кінематичних схем (недоцільні + мало доцільні + подібні + доцільні) віднімаємо реалізуємі кінематичні схеми , які не враховують недоцільні кінематичні схеми (мало доцільні + подібні + доцільні) .

Для початку поділимо кінематичні схеми в загальному вигляді на умовні групи, щоб була можливість врахування всіх варіантів поєднання кінематичних пар.

Перша група буде складатись із поступальних пар П і П′ , які при поєднанні у визначених напрямках руху можуть утворювати кінематичні схеми різних ступеней доцільності (недоцільні , доцільні і т.п.), а також із приєднаної до них поступальної пари П або П′ , які також можуть утворювати кінематичні схеми довільної ступіні доцільності при визначених напрямках руху . В загальному вигляді така структурна формула буде виглядати так : **ППП .**

Друга група буде складатись із поступальних пар П і П′ , які при поєднанні у визначених напрямках руху можуть утворювати тільки недоцільні кінематичні схеми , але приєднувати уже будемо до них обертальні пари V-го класу , які не зможуть утворити недоцільні поєднання з поступальними парами; а також із реалізуємих схем з двома ступенями рухомості , які утворилися поєднанням поступальних і обертальних кінематичних пар , до яких будемо приєднувати поступальні пари з відповідними напрямками руху , щоб отримати структурні формули реалізуємих кінематичних схем . В загальному вигляді такі структурні формули будуть виглядати так : **ППО** , **ПОП** та **ОПП** .

Третя група буде складатись із обертальних пар О і О′ , які при поєднанні у визначених напрямках руху можуть утворювати кінематичні схеми різних ступеней доцільності з двома ступінями рухомості , до яких будемо приєднувати поступальні пари з відповідними напрямками рухів , щоб отримати структурні формули реалізуємих кінематичних схем ; а також із реалізуємих схем з двома ступенями рухомості , які утворюють поєднання поступальних і обертальних кінематичних пар , до яких будемо приєднувати обертальні пари з відповідними напрямками рухів , щоб отримати структурні формули реалізуємих кінематичних схем . В загальному вигляді такі структурні формули будуть виглядати так : **ООП** , **ОПО** та **ПОО** .

Четверта група буде сладатись із обертальних пар О і О' , які при поєднанні у визначених напрямках руху можуть утворювати кінематичні схеми різних ступеней доцільності з двома ступінями рухомості , до яких будемо приєднувати

обертові пари з відповідними напрямками рухів , які також можуть утворювати кінематичні схеми довільної ступені доцільності при визначених напрямках руху . В загальному вигляді така структурна формула матиме вигляд : **ООО** . табл.12

Проаналізуємо ***<u>першу групу</u>*** і знайдемо реалізуємі варіанти кінематичних схем з трьома ступенями рухомості , які не враховують недоцільні схеми . Отже є шість кінематичних схем , які за допомогою двох рухів утворюють робочу зону у вигляді прямокутної площини (див.табл.12)

Добавляємо до кінематичних схем з двома ступенями рухомості , які складаються з поступальних пар , ще одну поступальну кінематичну пару та відповідно напрямки рухів . Для того , щоб знайти саме ті схеми , які не будуть враховувати нереалізуємі і недоцільні варіанти кінематичних схем , треба врахувати ті напрямки рухів , які утворюють вище сказані схеми . Отже Z1=2 і Z2=1 , - це ті коефіцієнти , що враховують нереалізуємі кінематичні схеми ; К=1 – коефіцієнт , що враховує утворення недоцільних схем . Запишемо структурні формули кінематичних схем з трьома ступенями рухомості , які не враховують нереалізуємі і недоцільні кінематичні схеми :

П′ ⊥ П ⊥ П П ⊥ П ⊥ П′ П ⊥ П′ ⊥ П П ⊥ П′ x П

П′ x П ⊥ П П′ ⊥ П ⊥ П′ П′ ⊥ П′ ⊥ П П′ ⊥ П′ x П

П′ ⊥ П ⊥ П П′ x П ⊥ П′ П′ x П′ ⊥ П П′ x П′ x П

П ⊥ П′ ⊥ П′ П ⊥ П′ x П′

П′ ⊥ П′ ⊥ П′ П′ ⊥ П′ x П′

П′ x П′ ⊥ П′ П′ x П′ x П′

Всього 18 структурних схем. Якщо в даних схемах з чотирьох рухів було виключено два (співвісність та паралельність) , то позначимо це як [4 – 2]. Але ж якщо було виключено і ті , що утворюють нереалізуємі схеми у визначених поєднаннях кінематичних пар (паралельність , перехресність , соосність) , тоді позначимо це як 4 – (Z1 + Z2) = 4 – (2 + 1) . Щоб відобразити приведені вище дії ,

потрібно звести всі результати обчислень у єдиний вираз , де відобразимо кількість кінематичних пар V-го класу (2^n) помножену на напрямки рухів :

$$2^n\left(\frac{(4-2)+(4-(2+1))}{2}\right)^{n-1}=2^n\cdot 1{,}5^{n-1}=18$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Далі потрібно знайти кількість схем , які входять до недоцільних , мало доцільних , подібних і доцільних груп , щоб знайти кількість недоцільних кінематичних кінематичних схем . Використаємо коефіцієнти , які враховують виникнення нереалізуємих кінематичних схем , щоб їх відкинути :

$$2^n\left(\frac{(4-Z1)+(4-Z2)}{2}\right)^{n-1}=\frac{2^n\cdot 5^{n-1}}{2^{n-1}}=50,$$ де n – кількість ступеней рухомості.

Тепер , як було запропоновано , із загальної кількості схем (недоцільні + мало доцільні + подібні + доцільні) відкинемо реалізуємі кінематичні схеми для даної групи (мало доцільні + подібні + доцільні) , і знайдемо кількість недоцільних кінематичних схем для групи ППП :

$$\frac{2^n\cdot 5^{n-1}}{2^{n-1}}-2^n\cdot 1{,}5^{n-1}=32$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Проаналізуємо ***<u>другу групу</u>*** і знайдемо реалізуємі варіанти кінематичних схем з трьома ступенями рухомості , які не враховують недоцільні та нереалізуємі схеми . Візьмемо спочатку схеми , які в загальному випадку виглядатимуть як ППО і ОПП . Вони є дзеркальним відображенням одна від одної , бо утворились приєднанням обертальної пари на початку схеми або ж в кінці . Тому кількість схем ППО = ОПП. Отже , використовуючи коефіцієнти , які враховують утворення поєднань кінематичних пар , що потрібно відкинути , запишемо алгебраїчний вираз кількості реалізуємих варіантів :

$$(Z1+Z2)\frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2)=(1+2)\frac{2^n}{2^{n-1}}(2+3)=30,$$ де n – кількість ступеней рухомості.

30 * 2 = 60 (бо ППО = ОПП) .

Візьмемо випадок ПОП , де присутні поєднання кінематичних пар ПО і ОП . У таких схемах відкидаємо тільки нереалізуємі варіанти схем , бо недоцільних серед них нема :

$$\frac{2^n \cdot (K1+K2) \cdot (K1+K2)}{2^{n-1}} = 50$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Загальна кількість схем по даній групі , які є реалізуємими і не враховують недоцільні та нереалізуємі , буде :

$$\left(2(1+2)(2+3)\frac{2^n}{2^{n-1}}\right) + \frac{2^n \cdot (K1+K2) \cdot (K1+K2)}{2^{n-1}} = 60+50 = 110$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Проаналізуємо ***<u>третю групу</u>*** і знайдемо реалізуємі варіанти кінематичних схем з трьома ступенями рухомості , які не враховують недоцільні та нереалізуємі схеми . Візьмемо спочатку схеми , які в загальному випадку виглядатимуть як ООП та ПОО . Аналогічно до вище розглянутого випадку знайдемо їх кількість:

$$(K1+K2)\frac{2^n}{2^{n-1}}(Z1+Z2+K) = (2+3)\frac{2^n}{2^{n-1}}(1+2+1) = 40$$

40 * 2 = 80 , де n – кількість ступеней рухомості.

Розглянемо випадок ОПО , де присутні поєднання кінематичних пар ОП і ПО . У таких схемах відкидаємо тільки нереалізуємі варіанти схем , бо недоцільних серед них нема :

$$\frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2) \cdot (K1+K2) = 50$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Загальна кількість схем по цій групі , які є реалізуємими і не враховують недоцільні та нереалізуємі схеми , буде :

$$\left(\frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2)(K1+K2)\right) + \frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2)(Z1+Z2+Z) = 80+50 = 130$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Проаналізуємо ***<u>четверту групу</u>*** і знайдемо реалізуємі варіанти кінематичних схем з трьома ступенями рухомості , які не враховують недоцільні та нереалізуємі схеми . Логічно буде стверджувати , що такі схеми (ООО) утворюються аналогічно до схем (ППП) , тому і їх кількість одразу виразимо в уже спрощеному алгебраїчному вигляді :

$$\frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2-Z)^{n-1} = 32$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Складемо всі реалізуємі схеми , що не враховують недоцільні :

$$\left(\frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2-Z)^{n-1}\right)+\left(\frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2)(K1+K2)\right)+2\left(\frac{2^n}{2^{n-1}}(K1+K2)(K1+K2-Z)\right)+$$

$$+2\left((Z1+Z2)(K1+K2)\frac{2^n}{2^{n-1}}+\frac{2^n(K1+K2)(K1+K2)}{2^{n-1}}\right)+(2^n\cdot 1{,}5^{n-1}=290$$

де n – кількість ступеней рухомості.

Знайдемо кількість недоцільних схем , відкинувши від загальної кількості реалізуємих схем (недоцільні + мало доцільні + подібні + доцільні) кількість схем , які не враховують недоцільні (мало доцільні + подібні + доцільні) :

$$\left(2^{2n}\cdot 2{,}5^{n-1}\right)-\left(\left(\frac{2^n\cdot 4^{n-1}}{2^{n-1}}+\frac{2^n\cdot 5^2}{2^{n-1}}+\frac{2^n\cdot 20}{2^{n-1}}\right)+2\left(\frac{15\cdot 2^n}{2^{n-1}}\right)+\frac{2^{n\cdot}5^2}{2^{n-1}}+(2^n\cdot 1{,}5^{n-1})\right)=400-290=110$$

Спростимо даний вираз , привівши до одного знаменника :

$$\left(\frac{2^{2n}\cdot 5^{n-1}}{2^{n-1}}\right)-\left(\frac{2^n(4^{n-1}+3^{n-1}+5^{n-1}+5^{n-1}+40+30)}{2^{n-1}}\right)=\left(\frac{2^{2n}\cdot 5^{n-1}}{2^{n-1}}\right)-\left(\frac{2^n(4+5)^{n-1}+(3+5)^{n-1}}{2^{n-1}}\right)=$$

$$=\frac{(2^{2n}\cdot 5^{n-1})-(2^n(9^{n-1}+8^{n-1})}{2^{n-1}}=\frac{2^n(2^n\cdot 5^{n-1}-(9^{n-1}+8^{n-1}))}{2^{n-1}}=110$$

де n – кількість ступеней рухомості.

Запишемо виведену формулу :

$$n_{нед}=\frac{2^n(2^n\cdot 5^{n-1}-(9^{n-1}+8^{n-1}))}{2^{n-1}}$$

2.6 Визначення кількості малодоцільних схем промислових роботів

Після розгляду недоцільних варіантів кінематичних схем роботів переходимо до аналізу утворення малодоцільних кінематичних схем, та визначення їх кількості при двох і трьох ступенях рухомості.

Малодоцільні кінематичні схеми промислових роботів – схеми , в яких при поєднанні двох кінематичних пар V- го класу виконується орієнтуючий рух (ротація) по лінії , або по колу .

2.6.1. Аналіз утворення малодоцільних кінематичних схем при двох ступенях рухомості

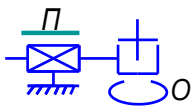
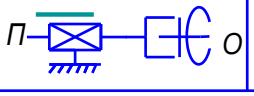
Третім кроком, у задачі визначення доцільних кінематичних схем промислових роботів, є визначення кількості недоцільних варіантів , які входять в загальну кількість теоретично можливих кінематичних схем роботів . Візьмемо за

основу кінематичні схеми з двома і трьома ступенями рухомості, які складаються з кінематичних пар V- го класу .

Малодоцільні кінематичні схеми виникають лише в деяких поєднаннях кінематичних пар (ПО та ОП) при визначених напрямках руху. У розділі поділу кінематичних схем по ступіні доцільності виділено схеми з двома ступенями рухомості , які являються малодоцільними : П I О , П ⊥ О , П' II О , П' ⊥ О , П' x О , О I П , О ⊥ О , О' II О , О' ⊥ О , О' x О. Проаналізуємо виділені схеми , щоб дізнатися у яких випадках виникають малодоцільні поєднання кінематичних пар .

Перший випадок : структурні формули , які складаються з поступальної пари з прямою ланкою і обертальної пари зі співпадаючою віссю. Такі варіанти в загальному вигляді можна записати так : ПО . Цей варіант поєднання пар має дві малодоцільні схеми при визначеному напрямку руху . Утворюються такі схеми П I О та П ⊥ О (див.табл.13) :

табл.13

Структурна формула	Кінематична схема	Коментар	Робоча зона
П		дана схема мало доцільна	
П / О		дана схема мало доцільна	

Другий випадок : структурні формули , які складаються з поступальної пари з вигнутою ланкою і обетальної пари із співпадаючою віссю . Такі варіанти в загальному вигляді можна записати так : П' О . Такий варіант поєднання пар має три малодоцільні схеми при визначеному напрямку руху . Утворяться такі схеми : П' II О , П' x О , П' ⊥ О (див.табл.14) :

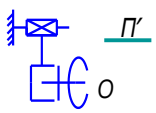
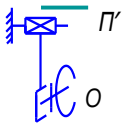
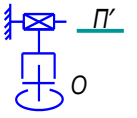
Структурна формула	Кінематична схема	Коментар	Робоча зона
П'		дана схема мало доцільна	
П' x О		дана схема мало доцільна	
П'		дана схема мало доцільна	

табл.14

Третій та четвертий випадок : структурні формули , які складаються з обертальної пари із співпадаючою віссю та поступальної пари з прямою ланкою, а також схеми , які складаються з двох обертальних пар із співпадаючою віссю . Такі варіанти в загальному вигляді можна записати так : ОП та ОО . Такі варіанти поєднання кінематичних пар мають по одній малодоцільній схемі при визначеному напрямку руху . Утворюються такі схеми: О І П і О ⊥ О (див. Табл.15) :

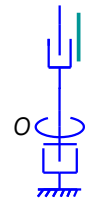
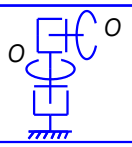
Структурна формула	Кінематична схема	Коментар	Робоча зона
О ∥		дана схема мало доцільна	
О ×		дана схема мало доцільна	

Табл.15

П′ятий випадок : структурні формули , які складаються із обертальної пари з неспівпадаючою віссю та обертальної пари зі співпадаючою віссю . Такі варіанти в загальному вигляді можна записати так : О′ О . Такий варіант поєднання має три малодоцільні схеми при визначеному напрямку руху. Утворюються такі схеми : О′ ІІ О , О′ х О , О′ ⊥ О (див.табл.16) :

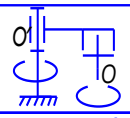
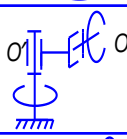
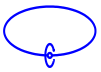
Структурна формула	Кінематична схема	Коментар	Робоча зона
О′ ∥		дана схема мало доцільна	
О′ х О		дана схема мало доцільна	
О′ ×		дана схема мало доцільна	

табл.16

Зробимо підсумок щодо вище розглянутих випадків виникнення малодоцільних поєднань кінематичних пар . У порівнянні з нереалізуємими та недоцільними кінематичними схемами , в малодоцільних прослідковується несистематичні виникнення малодоцільних поєднань кінематичних пар . Щоб наглядно було видно , як відбуваються дані виконання , зведемо в таблицю малодоцільні структурні формули і позначимо кожний випадок відповідним коефіцієнтом (табл.17):

табл.17

Структурні формули малодоцільних поєднань кінематичних пар при двох ступенях рухомості	П I О П ⊥ О	П′ II О П′ x О П′ ⊥ О	О I П	О ⊥ О	О′ II О О′ x О О′ ⊥ О
Коефіцієнт, який позначає даний випадок виникнення малодоцільної схеми при поєднанні кінематичних пар	**$К_{Мпо}$ = 2**	$К_{Мп'о}$ = 3	$К_{Моп}$ = 1	$К_{Моо}$ = 1	$К_{Мо'о}$ = 3
Коефіцієнт , який є сумою приведених коефіцієнтів	∑ $К_{М1}$ = 6			∑ $К_{М2}$ = 4	

До того ж потрібно сказати , що варіанти поєднання кінематичних пар , які складаються з двох поступальних пар V- го класу (ПП), не мають малодоцільних схем . Отже в даному випадку записати в алгебраїчному вигляді загальну кількість малодоцільних схем для групи ПО (ОП) можливо таким чином :

$n_{Мпо} = ∑ К_{М1} = К_{Мпо} + К_{Мп'о} + К_{Моп} = 6$

Загальну кількість малодоцільних схем для групи ОО запишемо так :

$n_{Моо} = ∑ К_{М2} = К_{Моо} + К_{Мо'о} = 4$

Для більш досконального аналізу малодоцільних кінематичних схем, буде доцільно перейти до розгляду схем з трьома ступенями рухомості.

1.6.2 Аналіз утворення малодоцільних кінематичних схем при трьох ступенях рухомості

Як було вже сказано , схеми з трьома ступенями рухомості утворюємо приєднанням кінематичної пари V- го класу і відповідно напрямка руху до схеми з двома ступенями рухомості , приєднання робимо на початку структурної формули . Кількість малодоцільних варіантів визначається як різниця між загальною

кількістю схем роботів з трьома ступенями рухомості, в які входять мало доцільні , подібні доцільні схеми ,і кількість схем , які не відносяться до мало доцільних (подібні + доцільні) .

Знову ж таки аналіз кінематичних схем будемо проводити , поділивши їх на групи . **Перша група** буде складатись з двох поступальних пар , до яких будемо приєднувати ще одну поступальну пару з відповідними напрямками рухів , тобто в загальному вигляді такі схеми будуть відображатись так : **ППП** .

Друга група буде складатись із двох поступальних пар , до яких приєднаємо одну обертальну кінематичну пару ; також до цієї групи будуть входити схеми ,які складаються з поступальної і обертальної пари та приєднаної до них ще одної поступальної пари . Запишемо , як будуть виглядати такі схеми (при трьох ступенях рухомості) : **ППО** , **ПОП** , **ОПП** .

Третя група буде складатись із двох обертових пар , до яких будемо приєднувати поступальну пару ; а також з поступальної та обертальної пар , до яких приєднаємо ще одну обертальну пару . Такі схеми в загальному вигляді будуть відображатись так : **ООП** , **ОПО** , **ПОО** .

Четверта група буде складатись із двох обертальних пар , до яких будемо приєднувати ще одну обертальну пару з відповідними напрямками рухів , і в загальному вигляді такі схеми запишуться як **ООО .**

Розглянемо ***першу групу*** , тобто ППП . Серед реалізуємих схем з двома ступенями рухомості , якщо відкинути недоцільні залишиться шість реалізуємих поєднань кінематичних пар типу ПП : П ⊥ П′ , П′ ⊥ П′ , П′ ⊥ П , П′ х П , П′ х П′ , П ⊥ П . При утворенні кінематичних схем з трьома ступенями рухомості з приведених схем з двома ступенями рухомості будуть знову виникати недоцільні і нереалізуємі схеми . Тому потрібно виключити такі схеми за допомогою вище приведених коефіцієнтів . Практично це буде виглядати так : візьмемо , наприклад , схему П ⊥ П′ і побудуємо схеми з трьома ступенями рухомості ; схеми , які будуть відноситися до недоцільних або до нереалізуємих , закреслимо прямою лінією :

~~П I П ⊥ П′~~ ~~П′ I П ⊥ П′~~

~~П II П ⊥ П′~~ ~~П′ II П ⊥ П′~~

П ⊥ П ⊥ П′ П′ ⊥ П ⊥ П′

~~П х П ⊥ П′~~ П′ х П ⊥ П′

Бачимо , що з'явилося три реалізуємих кінематичних схем , які не включають в себе недоцільні . Але знаємо , що серед схем , які виконані за допомогою поступальних пар , нема малодоцільних . Тому ці схемиявляються кінематичними схемами для даної групи , які не включають малодоцільні . Також буде логічно припустити , що з кожної схеми ПП з двома ступенями рухомості будуть утворюватись по три схеми , що не включають малодоцільні , тобто складаються зі схем вищої ступіні доцільності . Кількість таких схем буде така 3 * 6 = 18 . А відобразити це можливо таким чином : є коефіцієнти , враховуючі виникнення нереалізуємих поєднань кінематичних пар V- го класу в схемах з трьома ступенями рухомості , - це Z1 = 2 та Z2 = 1 ; також є коефіцієнти , які враховують появу недоцільних поєднань пар в цих же схемах , це К = 1 , К1 = 2 та К2 = 3 . Які саме випадки враховують дані коефіцієнти було приведено вище. Якщо взяти нереалізуємі випадки , тобто (4 – Z1) + (4 – Z2)= =5 , а також ненедоцільні випадки (4 – К1) + (4 – К2) = 1 . Різницю получених чисел віднімемо від загального числа кількості напрямків рухів і отримаємо відповідь , яка дасть змогу записати формулу кількості реалізуємих схем для даної групи , які не включають малодоцільні , а також недоцільні і нереалізуємі.

Формула виглядатиме таким чином :

$2^{n} * 1{,}5^{n-1} = 18$, де n – кількість ступеней рухомості .

Розглянемо ***<u>другу групу</u>*** , але спочатку <u>візьмемо схему ППО</u> . Дана схема утворюється приєднанням поступальної кінематичної пари до схеми з двома ступенями рухомості ПО . Всього 5 варіантів поєднання поступальних з обертальними пар (П′⊥ О′, П′ х О′, П I О′, П′ II О′, П ⊥ О′) , які не включають нереалізуємі , недоцільні та малодоцільні. При утворенні схем з трьома ступенями рухомості будуть виникати нереалізуємі , недоцільні і малодоцільні поєднання пар , які потрібно виключити , тому потрібно їх виключити . Вирази (4 - Z1 – Z = 1) та (4 – Z2 – Z = 2) враховують рухи ,які утворюють такі схеми.

Вираз (4 – Z1) + (4 – Z2) = 5 враховує нереалізуємі поєднання пар. Отже кількість схем , які не враховують малодоцільні – запишемо як ((4 - Z1 – Z) + + (4 – Z2 – Z)) * ((4 – Z1) + (4 – Z2)) = 3 * 5 = 15 .

Візьмемо схему ПОП . Серед таких схем недоцільних нема , бо нема поєднань ПП , ОО . Тому потрібно відкинути тільки нереалізуємі за допомогою виразів 4 – Z1 = 2 та 4 – Z2 = 3 . Взагалі маємо 9 реалізуємих варіантів схем типу ОП ; при утворенні схем з трьома ступенями рухомості ПОП приєднуємо до ОП поступальну кінематичну пару , тому знову утвориться 5-ть поєднань пар типу ПО . Тобто передчасно можна сказати , що таких схем буде $5 * 9 = 45$. А отже це буде виглядати так : $(4 – Z1) + (4 – Z2)2 + (4 – Z1 – К_{Моп}) = 9$.

Візьмемо схему ОПП . Дана схема утворюється приєднанням обертальної кінематичної пари до схем з двома ступенями рухомості ПП . Всього 6-ть варіантів поєднань поступальних кінематичних пар (П ⊥ П′ , П′ ⊥ П′ , П′ ⊥ П , П′ х П , П′ х П′ , П ⊥ П) , які не включають нереалізуємі , недоцільні та малодоцільні . При утворенні схем з трьома ступенями рухомості будуть виникати нереалізуємі , недоцільні , малодоцільні поєднання пар , які виключемо вище наведеним способом : $((4 – Z1) + (4 – Z2)) * 6 = 30$.

Всього по наведеним трьом типам схем (ППО , ПОП , ОПП) кількість реалізуємих схем , що не включають малодоцільні : 15 + 45 + 30 = 90 .

Кількість малодоцільних схем визначається як різниця між загальною кількістю реалізуємих схем для даної групи (малодоцільні + подібні + доцільні) та кількістю схем , які не включають малодоцільні (подібні + доцільні) . У пункті 1.5 було визначено формулу яка розраховує кількість схем по цій групі , які є реалізуємими і не враховують недоцільні та нереалізуємі схеми :

$$\left(2(1+2)(2+3)\frac{2^n}{2^{n-1}} \right) + \frac{2^n\left((K1+K2)(K1+K2)\right)}{2^{n-1}} = 110$$, де n – кількість ступеней рухомості .

Отже кількість малодоцільних схем для даної групи 110 – 90 = 20 .

Розглянемо ***третю групу*** , яка буде утворювати схеми типу ООП, ОПО, ПОО. Спочатку візмемо схеми типу ООП . Дана схема утворюється приєднанням обертальної кінематичної пари до схеми з двома ступенями рухомості , що складається з обертальних та поступальних пар . Всього є 9 схем ОП , які не враховують малодоцільні виконання : О′ х П , О I П′ , О′ II П , О′ ⊥ П′ , О′ х П′ , О ⊥ П′ , О′ II П′ , О′ ⊥ П , О ⊥ П . Виключемо напрямки рухів , які утворюють

небажані поєднання кінематичних пар при трьох ступенях рухомості : 4 - Z1 – Z = 1 та 4 – Z2 = 3 ; і визначемо , скільки буде схем які не будуть враховувати малодоцільні при троьх ступенях рухомості для даної групи ((4 - Z1 – Z)+(4 – Z2))* 9 = 36 .

Візмемо схему типу ОПО . Дана схема утворюється приєднанням обертальної кінематичної пари до схеми з двома ступінями рухомості , що складається з поступальної та обертальної кінематичної пари V- го класу . Всього 5-ть реалізуємих варіантів ПО , які не враховують малодоцільні схеми : П′⊥ О′, П′ х О′, П I О′, П′ II О′, П ⊥ О′ . Знайдемо кількість схем , які не враховують малодоцільні для ОПО , помноживши дані 5-ть реалізуємих схем на відповідні напрямки рухів (в недоцільних нема поєднань ОП) , тобто 4 - Z1= = 2 і 4 – Z2 = 3 . Кількість потрібних схем : (2 + 3) * 5 = 25 .

Беремо схему типу ПОО . Дана схема утворюється приєднанням поступальної кінематичної пари до схеми з двома ступенями рухомості , що складаються з обертальних кінематичних пар V- го класу . Всього 4 реалізуємих варіанта ОО , які не враховують малодоцільні (О′ х О′ , О′ ⊥ О′ , О′ II О′ , О ⊥ О′) . До них приєднуємо поступальну пару з визначеним напрямком руху , тобто 4 - Z1= 2 і 4 – Z2 = 3 . Отже кількість схем , які не враховують малодоцільні : (2 + 3) * 4 = 20 . Всього по даній групі (ООП , ОПО, ПОО) : 36 + 25 + 20 = 81 . У пункті 1.5 було визначено формулу , яка розраховує кількість схем по цій групі , які є реалізуємі і невраховують недоцільні та нереалізуємі схеми :

$$\left(\frac{2^n}{2^{n-1}}\cdot 25\right)+\left(\frac{2^n}{2^{n-1}}\cdot 20\right)=130,$$ де n – кількість ступеней рухомості .

Отже кількість малодоцільних схем для даної групи : 130 – 81 = 49 .

Розглянемо ***четверту групу*** , яка буде складатись зі схем типу ООО . Такі схеми утворюються приєднанням обертальної пари з відповідними напрямками рухів до кінематичних схем з двома ступенями рухомості , які складаються дакож із обертальних пар . Таких схем реалізуємих , що невраховують малодоцільні з двома ступенями рухомості , 4 : О′ х О′ , О′ ⊥ О′ , О′ II О′ , О ⊥ О′ . Щоб утворити схеми з трьома ступенями рухомості , які були б реалізуємими і невраховували б недоцільні , малодоцільні і нереалізуємі схеми , треба зробити деякі виключення

щодо виду руху ((4 - Z1 – Z = 1 і 4 – Z2 = 3) , (4 - Z1 – Z = 1 і 4 - Z1 = 2) та помножити даний вираз на визначені схеми з двома ступенями рухомості : 4 * (1 + 3) + 3 = 19 . У пункті 1.5 було визначено формулу , яка розраховує кількість схем по цій групі , які є реалізуємими і невраховують недоцільні та нереалізуємі схеми :

$$\frac{2^n}{2^{n-1}} + \left((K1 + K2) - Z\right)^{n-1} = 2^n \cdot 2^{n-1} = 32$$, де n – кількість ступеней рухомості.

Маємо змогу знайти кількість малодоцільних схем для даної групи : 32 – 19 =13 .

Отже визначемо , скільки всього малодоцільних кінематичних схем з трьома ступінями рухомості , як суму схем , визначених по кожній групі : 20 +13 + 49 = 82. Представимо це у вигляді формули . Раніше було визначено формулу , яка визначає кількість реалізуємих схем , які не включають недоцільні і нереалізуємі : $\frac{2^n(4+5)^{n-1} + (3+5)^{n-1}}{2^{n-1}} = 290$,- вона є формулою загальної кількості схем для даної групи , тобто малодоцільних (малодоцільні + подібні +доцільні) . Від цієї формули потрібно відняти схеми , які є реалізуємими і не враховують малодоцільні схеми ; таких схем : 18 + 90 + 81 + 19 = 208 . Додатки 90, 81, 19 можна представити кожен в загальному вигляді : ∑((4-Z1-Z)+(4-Z2- -Z))K ; але, для зручності і спрощення математичного виразу , відобразимо їх у вигляді натуральних чисел : 208 = 2^n 1,5^{n-1}+90+81+19 = 2^n 1,5^n-1+190 . Отже зведемо все у алгебраїчний вираз :

$$\frac{2^n(4+5)^{n-1} + (3+5)^{n-1}}{2^{n-1}} - (2^n \cdot 1{,}5^{n-1} + 190) = 82$$

Спростимо даний вираз, який і буде формулою , яка визначає кількість малодоцільних кінематичних схем роботів :

$$2(9^{n-1} + 8^{n-1}) - (2^n \cdot 1{,}5^{n-1} + 190) = 82$$

2.7 Визначення кількості подібних схем промислових роботів

Даний розділ являється етапом дослідження вже доцільних кінематичних схем роботів, бо знаємо, що деякі доцільні схеми повторюють рухи інших схем при поєднанні різних кінематичних пар V-го класу, а тому утворюють однакові робочі зони ; тому і було виділено окрему групу за ступенем доцільності, схеми якої будемо називати подібними. Схеми даної групи при найменшій кількості ланок утворюють складні робочі зони .

1.7.1 Аналіз утворення подібних кінематичних схем при двох ступенях рухомості

Четвертим у задачі визначення доцільних кінематичних схем промислових роботів , є визначення кількості подібних варіантів , які входять в загальну кількість теоретично можливих кінематичних схем роботів . Подібні кінематичні схеми виникають лише в деяких поєднаннях кінематичних пар V-го класу (ПП , ПО , ОП) при визначених напрямках руху , які потрібно детальніше розглянути в даному пункті .У розділі поділу кінематичних схем по ступіні доцільності було виділено схеми з двома ступенями рухомості , які являються подібними . Проаналізуємо ці схеми , щоб дізнатися , у яких випадках виникають подібні поєднання кінематичних пар .

Перший випадок: структурні формули , які складаються з поступальних . Такі варіанти в загальному випадку будуть виглядати як ПП . Такий варіант поєднання пар має 5-ть схем при визначених напрямках руху , які відносяться до групи подібних (див.табл.18):

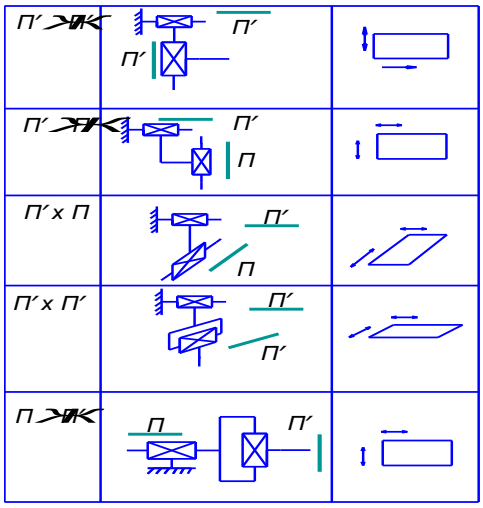


табл.18

Другий випадок : структурні формули , які складаються з поступальної і обертальної пар . Такі варіанти в загальному вигляді можна записати як ПО . Цей варіант поєднання кінематичних пар має три схеми при визначеному напрямку руху , які відносяться до групи подібних (див.табл.19):

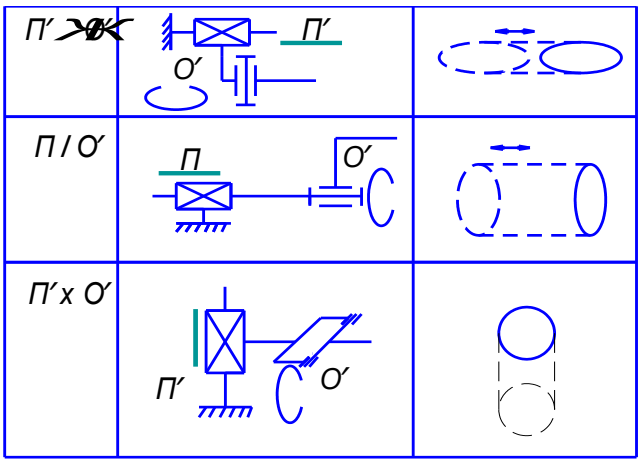


табл.19

Третій випадок : структурні формули , які складаються з обертальної та поступальної пар . Такі варіанти в загальному вигляді можна записати як ОП . Цей варіант поєднання кінематичних пар має вісім схем при визначеному напрямку руху , які відносяться до групи подібних (див.табл.20) :

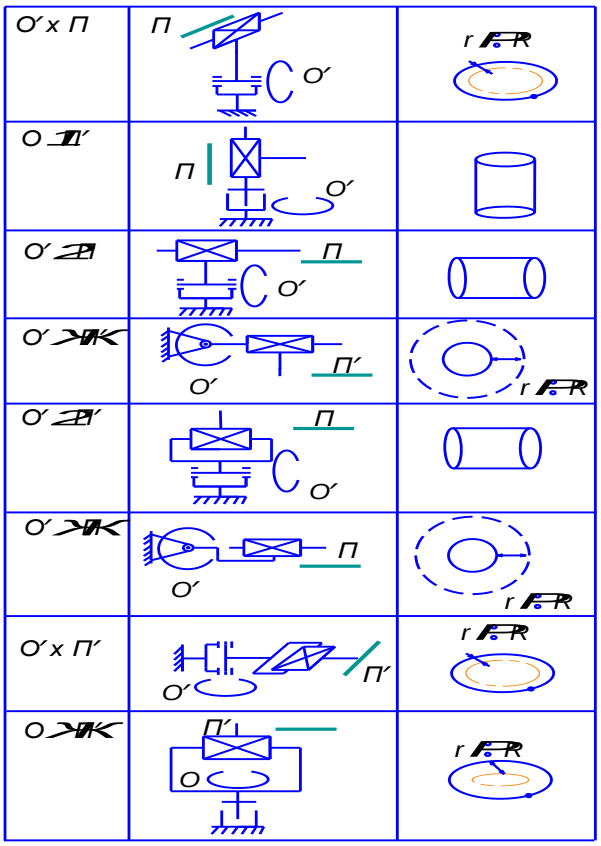


табл.20

Зробимо деякі висновки щодо вище розглянутих випадків виникнення подібних поєднань кінематичних пар . Аналогічно до малодоцільних в даній групі також прослідковуються несистематичні виникнення подібних схем . Тому виникають деякі складності при виведенні формули знаходження кількості подібних кінематичних схем . Для наглядності зведемо в таблицю структурні формули подібних схем і позначимо кожний випадок відповідними коефіцієнтами (табл.21):

Табл 21

Структурні формули подібних кінематичних схем	П ⊥ П'	П' ⊥ П' П' х П'	П' ⊥ П П' х П	П I O'	П' ⊥O' П' х O'	O I П' O⊥ П'	O' х П O'II П O'⊥ П	O' ⊥ П' O' х П' O' II П'
Коефіцієнт, що відповідає даному випадку поєднання пар	$К_{ПП'}=1$	$К_{П'П'}=2$	$К_{П'П}=2$	$К_{ПО'}=1$	$К_{П'О'}=2$	$К_{ОП'}=2$	$К_{О'П}=3$	$К_{О'П'}=3$
Сумарний коефіцієнт	$\Sigma К_{ПП} = 5$			$\Sigma К_{ПО} = 3$		$\Sigma К_{ОП} = 8$		

Потрібно зазначити , що варіанти поєднання кінематичних пар , які складаються з двох обертальних пар V-го класу (ОО) , не мають подібних схем . Отже в даному

випадку відобразити в алгебраїчному вигляді загальну кількість подібних схем для групи ПП можливо таким чином :

$$n_{под.ПП} = \sum К_{ПП} = К_{ПП'} + К_{П'П'} + К_{П'П} = 5$$

Для груп ПО та ОП кількість подібних схем знаходимо аналогічно : за допомогою відповідних коефіцієнтів . Загальну кількість подібних схем при двох ступенях рухомості визначимо за допомогою сумарного коефіцієнта :

$$n_{под.ПП} = \sum К_{ПП} + \sum К_{ПО} + \sum К_{ОП} = 16$$

1.7.2 Аналіз утворення подібних кінематичних схем при трьох ступенях рухомості

Знаємо , що схеми з трьома ступенями рухомості утворюються приєднанням кінематичної пари V-го класу і відповідного напрямка руху до кінематичної схеми з двома ступенями рухомості , приєднання робимо на початку структурної формули . Кількість подібних варіантів кінематичних схем з трьома ступенями рухомості визначається аналогічно до попередніх пунктів : від загальної кількості схем для даної групи віднімаємо кількість схем , в які не входять подібні .

Аналіз кінематичних схем проводимо попередньо поділивши їх на групи : перша група буде складатись із двох поступальних пар , до яких будемо приєднувати ще одну поступальну пару з відповідним напрямком руху , тобто в загальному вигляді такі схеми будуть виглядати як ППП . Друга група буде складатися з двох поступальних , до яких приєднуватимемо одну обертову ; також до цієї підгрупи будуть входити схеми , які складаються з поступальної та обертової пари , і приєднаної ще одної поступальної пари . При трьох ступенях рухомості такі схеми будуть виглядати як ППО , ПОП та ОПП .Третя група буде складатись із двох обертових пар , до яких будемо приєднувати поступальну пару ; а також з поступальної та обертальної пар , до яких приєднаємо ще одну обертальну пару . Такі схеми в загальному вигляді будуть записуватись як ООП , ОПО і ПОО .

Розглянемо першу групу , тобто ППП . У попередньому пункті було визначено кількість схем , в які не входять мало доцільні (для кожної групи поєднання

кінематичних пар) ; визначена кількість схем являється загальною кількістю схем для подібних (подібні + доцільні) . Отже, залишається знайти кількість схем , в які не входять подібні . Практично ці схеми являються доцільними .

У пункті поділу схем за ступенем доцільності було представлено схеми з двома ступенями рухомості , які не включають подібні (ці схеми являються доцільними). Серед них є тільки одна схема (П ⊥ П), яка може утворити схему з трьома ступенями рухомості типу ППП . Знаємо , що для того, щоб утворити зі схеми ПП схему типу ППП , потрібно приєднати на початку схеми поступальні пари П та П’ з відповідними напрямками рухів . Виключивши за допомогою відповідних коефіцієнтів напрямки рухів , які утворюють нереалізуємі , недоцільні , мало доцільні та подібні поєднання кінематичних пар , знайдемо кількість доцільних кінематичних схем для даної групи (ППП) при трьох ступенях рухомості . Введемо коефіцієнт , який буде визначати поєднання двох поступальних пар з прямою ланкою (П ⊥ П) , - $К_{ПП}$ =1 . Виключимо рухи , які утворюють “ небажані “ поєднання кінематичних пар , щоб визначити кількість доцільних схем :

(4 – Z1 – K) – даний вираз відкидає нереалізуємі і недоцільні поєднання кінематичних пар , в яких на початку стоїть поступальна пара з прямою ланкою;

(4 – Z2 – K) – даний вираз відкидає нереалізуємі і недоцільні поєднання кінематичних пар , в яких на початку стоїть поступальна пара з вигнутою ланкою.

Отже маємо : [(4 – Z1 – K) + (4 – Z2 – K)-$К_{П'Ппод}$] * $К_{ПП}$ = 1. Коефіцієнт $К_{П'П}$ враховує подібні варіанти кінематичних схем . Тобто серед доцільних схем з трьома ступенями рухомості маємо тільки одну структурну формулу , яка складається з поступальних пар . Це така формула : П ⊥ П ⊥ П , яка наглядно буде показана в наступному пункті .

Розглянемо другу групу , але спочатку візьмемо схему ППО . Знову потрібно знайти кількість схем ППО , в яку не входять подібні схеми : тобто знову розглядаємо доцільні поєднання кінематичних пар . Введемо коефіцієнт , який буде визначати поєднання поступальної і обертальної кінематичних пар : якщо при двох ступенях рухомості є дві схеми типу ПО , то коефіцієнт запишемо як $К_{ПО}$ = 2 .

Аналогічно за допомогою відповідних коефіцієнтів визначимо кількість схем ППО , які не включають подібні :

$$[(4 – Z1 – K) + (4 – Z2 – K)-(4 - К_{П'П'})]*(К_{ПО} - К_{ПП'}) = 1.$$

Перейдемо до схем типу ПОП . Вони утворюються приєднанням поступальної пари до кінематичної схеми з двома ступенями рухомості ОП . Серед доцільних є тільки одна така схема : О ⊥ П. Але , якщо приєднати поступальну пару на початку цієї схеми , то утворяться поєднання пар з меншою ступінню доцільності (нереалізуємі , недоцільні , мало доцільні) . Це веде до того , що серед схем типу ПОП доцільних нема . Щоб з'ясувати , як поводитиме себе схема О ⊥ П , забіжимо трохи наперед , і приєднаємо обертальну пару на початку схеми : знову не виявлено доцільних поєднань кінематичних пар . Вище було сказано , що при наявності в ланцюжку доцільної структурної формули наприклад недоцільного поєднання кінематичних пар V-го класу , - ця структурна формула автоматично перейде в розряд недоцільних схем . Отже , бачимо , що кінематична схема О ⊥ П тільки при двох ступінях рухомості являється доцільною , а при утворенні з неї кінематичних схем з більшою ступінню рухомості доцільних схем виявлено не буде . З кінематичною схемою О ⊥ О' ситуація аналогічна . Зведемо в таблицю кінематичні схеми з трьома ступенями рухомості , які утворюються зі схем О ⊥ О' та О ⊥ П (табл..22) :

табл..22

Кінематичні схеми з двома ступенями рухомості	Утворені з неї кінематичні схеми з трьома ступенями рухомості			
О ⊥ О'	П I О ⊥ О' П II О ⊥ О' П ⊥ О ⊥ О' П x О ⊥ О'	П' I О ⊥ О' П' II О ⊥ О' П' ⊥ О ⊥ О' П' x О ⊥ О'	О I О ⊥ О' О II О ⊥ О' О ⊥ О ⊥ О' О x О ⊥ О'	О' I О ⊥ О' О' II О ⊥ О' О' ⊥ О ⊥ О' О' x О ⊥ О'
О ⊥ П	П I О ⊥ П П II О ⊥ П П ⊥ О ⊥ П П x О ⊥ П	П' I О ⊥ П П' II О ⊥ П П' ⊥ О ⊥ П П' x О ⊥ П	О I О ⊥ П О II О ⊥ П О ⊥ О ⊥ П О x О ⊥ П	О' I О ⊥ П О' II О ⊥ П О' ⊥ О ⊥ П О' x О ⊥ П

Отже , що до того , як можна вчинити з приведеними схемами : у пункті поділу схем за ступенем доцільності дані схеми були віднесені до доцільних кінематичних

схем , бо вони відповідають умовам доцільності ; але доцільні або хоча б подібні схеми з трьома ступенями рухомості утворити з них неможливо – вони ніби випадають . Тому кількість доцільних схем типу ПОП та ООП буде дорівнювати нулю .

Перейдемо до схем типу ОПП . Знайдемо кількість схем такого типу , в яку не входять подібні . Вище було введено коефіцієнт $К_{ПП} = 1$, який визначає кінематичні схеми з поступальними кінематичними парами , до яких будемо приєднувати обертальну пару , щоб утворити кінематичні схеми з трьома ступенями рухомості . Підставимо відповідні коефіцієнти і знайдемо кількість схем типу ОПП , які не включають подібні : $К_{ПП} * [(4 – Z1 – К) + (4 – Z2 – К) + К_{Моп} - К_{О'П}] = 1$

Розглянемо третю групу , яку будуть складати схеми типу ООП , ОПО та ПОО.

Схеми ООП вище було виключено з розрахунку , по тій причині , що вони не утворюють доцільних кінематичних схем . Тому розглянемо схеми типу ОПО . Маємо коефіцієнт $К_{ПО} = 2$. Використовуючи відповідні коефіцієнти знайдемо кількість доцільних схем , які не включають подібні :

$$[(4 – Z1) + (4 – Z2 – К_{ОП'}) - К_{О'П}] * (К_{ПО} – К_{Моп}) = 1$$

Перейдемо до розгляду схем типу ПОО. Такі схеми утворюються приєднанням поступальної пари до кінематичної схеми з двома ступенями рухомості ОО . Схем такого типу усього чотири , але $О \perp О'$ було виключено з розрахунку , тому $К_{ОО} = 3$. Використаємо коефіцієнти , які визначають виконуємі напрямки рухів , та визначимо кількість схем даного типу , які не включають подібні :

$$[(4 – Z1- К) + (4 – Z2 – К_{Мпо})] * К_{ОО} = 6$$

Розглянемо схеми типу ООО . Зрозуміло , що такі схеми утворюються приєднанням обертальної пари до схем з двома ступенями рухомості , яку складають дві обертальні пари. Вже визначено коефіцієнт $К_{ОО} = 3$. Знайдемо схеми такого типу , які не включають подібні :

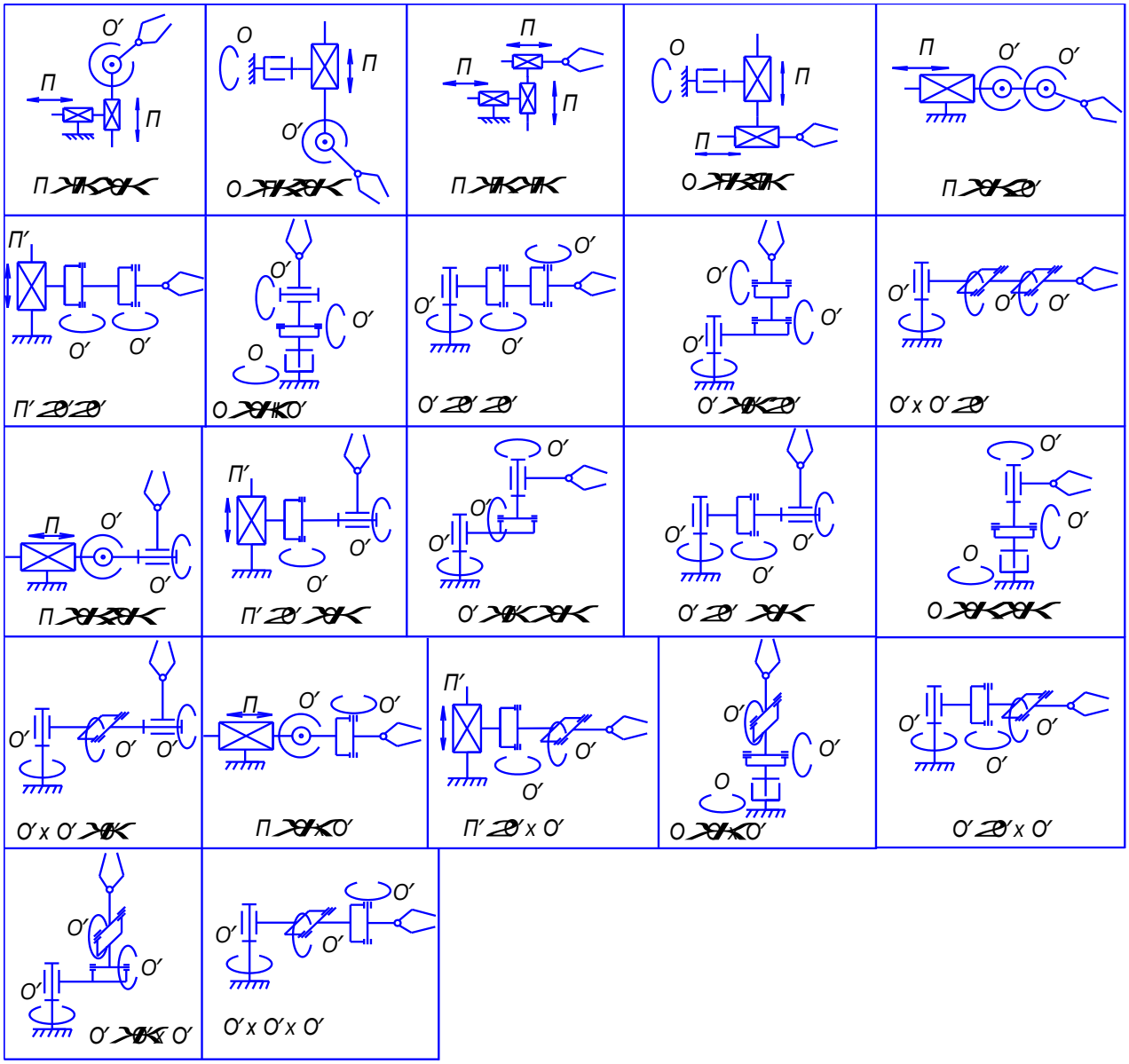
$$[(4 – Z1- К) + (4 – Z2 – К_{Моо}) + (4 - К_{Мо'о})] * К_{ОО} = 12$$

Визначемо кількість кінематичних схем , які не включають подібні , як суму таких схем , визначених по кожній групі : 1+1+1+1+6+12 = 22 . У попередньому пункті було визначено кількість схем , в яку входять подібні і доцільні , що є загальною кількістю схем для групи подібних : таких схем 208 . Маємо змогу знайти кількість подібних схем як різницю між загальною кількістю схем для даної групи та кількістю схем , які не включають відповідно схеми цієї групи : 208 – 22 = 186 . Від'ємник 22 можна представити у загальному вигляді як $\sum[(4\text{-}Z1\text{-}K_{i1})+(4\text{-}Z2\text{-}K_{i2})\text{-}(4\text{-}K_{i3})]^{n}K_{i4}$, але для зручності і спрощення математичного виразу відобразимо його у вигляді натурального числа. Відобразимо виведене значення у вигляді формули :

$$(2^{n}\,1{,}5^{n-1}+190)-22=186$$

2.8 Визначення кількості доцільних схем промислових роботів

Провівши дослідження та відповідні розрахунки , було відібрано доцільні кінематичні схеми промислових роботів , які утворюють найбільш складну робочу зону при мінімальній кількості ланок (2 ступені рухомості), також визначено доцільні схеми при трьох ступенях рухомості . Дані схеми при двох ступенях рухомості було продемонстровано у пункті відбору схем за ступенем доцільності : всього 8 схем . Доцільні схеми при трьох ступенях рухомості було відібрано у попередньому пункті (22 схеми) , за допомогою виключення рухів та поєднань кінематичних пар , які утворюють схеми , що не відносяться до групи доцільних . Відобразимо дані схеми в табл.23:



Спробуємо пересвідчитись , чи дійсно 22 схеми , які було відібрано , являються доцільними . Візьмемо доцільну схему О' х О' , і утворимо з неї всі можливі схеми з трьома ступенями рухомості приєднанням кінематичних пар та напрямків рухів:

П I О' х О'	П' I О' х О'	О I О' х О'	О' I О' х О'
П II О' х О'	**П' II О' х О'**	О II О' х О'	**О'II О' х О'**
П ⊥ О' х О'	П' ⊥ О' х О'	**О ⊥ О' х О'**	**О'⊥ О' х О'**
П х О' х О'	П' х О' х О'	О х О' х О'	**О' х О' х О'**

Серед приведених схем виділено шість , які являються доцільними . Якщо одна кінематична схема , яка починається із обертальної пари з не співпадаючою віссю , утворює шість доцільних кінематичних схем , то і кожна подібна до неї схема буде вести себе аналогічно . Візьмемо одну з утворених кінематичних схем з трьома

ступенями рухомості , відповідним чином утворимо з неї кінематичні схеми з чотирма ступенями рухомості :

П I O' II O' x O'	П' I O' II O' x O'	O I O' II O' x O'	O' I O' II O' x O'
П II O' II O' x O'	**П' II O'II O' x O'**	O II O' II O' x O'	**O' II O'II O' x O'**
П ⊥O'II O' x O'	П' ⊥ O' II O' x O'	**O ⊥ O'II O' x O'**	**O'⊥ O'II O' x O'**
П x O' II O' x O'	П' x O' II O' x O'	O x O' II O' x O'	**O' x O'II O' x O'**

Знову серед приведених схем виділено шість , які являються доцільними . Тобто бачимо , що є чітка залежність утворення кінематичних схем від того , яка кінематична пара стоїть на початку структурної формули . Виділені шість схем позначимо коефіцієнтом $К_{o'} = 6$, і застосуємо (при виведенні формули) кількість доцільних кінематичних схеми , в яких на початку обертальна кінематична пара з не співпадаючою віссю , т.к. в приведених розрахунках за основу взято відібрані доцільні кінематичні схеми з двома ступенями рухомості. Ступінь рухомості покажемо у вигляді степені . Візьмемо доцільні кінематичні схеми з двома ступенями рухомості , в яких на початку стоїть поступальна пара з прямою ланкою , поступальна пара з вигнутою ланкою та обертальна пара зі співпадаючою віссю . Аналогічним чином знайдемо коефіцієнти К , які будуть позначати кількість утворюємих схем при кожній наступній ступіні рухомості , для відповідних типів кінематичних схем :

$$К_П = 2 , \ К_{П'} = 0 , \ К_О = 0 , \ К_{O'} = 6 .$$

В даному випадку коефіцієнт $К_i$ не тільки позначає кількість утворюємих схем,- він враховує можливість приєднання одної кінематичної схеми (доцільної) до іншої кінематичної схеми (доцільної). Це пояснюється тим , що в кожній кінематичній схемі , при різних ступенях рухомості є основа , яку утворює ця ж схема з попереднім ступенем рухомості :

O' x O' → O' II O' x O' → П ⊥O' II O' x O' ... і т.п. А приєднуєма кінематична пара з кінематичною парою , яка стоїть на початку схеми , утворюють ще одну доцільну кінематичну схему . Тобто задача утворення доцільних кінематичних схем зводиться до того , щоб взяти кінематичну схему з довільною ступінню рухомості , і приєднати відповідним чином до неї кінематичну схему з двома ступенями рухомості , яка закінчується тією ж самою кінематичною парою V-го класу , якою

починається кінематична схема , до якої ми приєднуємо цю схему: П ⊥О' + О' II О' x О' = П ⊥О' II О' x О' .

Провівши аналіз утворення доцільних кінематичних схем , можна сказати: якщо приєднувати до кінематичної схеми кінематичні пари з відповідними напрямками рухів (на початку схеми) , утвориться шістнадцять кінематичних схем з наступною ступінню рухомості , але серед них будуть присутні схеми з різною ступінню доцільності ; і тільки ті будуть доцільними , в основі яких стоїть доцільна кінематична схема , а приєднувана кінематична пара та відповідний напрямок руху утворюють доцільну кінематичну схему з двома ступінями рухомості з кінематичною парою , яка стоїть на початку схеми , до якої приєднують . Тобто перехідною або з'єднувальною складовою буде кінематична пара, на яку закінчується приєднуєма схема і на яку починається схема , до якої приєднують .

Розпишемо складові формули , яка буде визначати кількість доцільних схем уже наведеним способом , а не відкиданням напрямків рухів чи поєднань кінематичних пар (що утворюють кінематичні схеми , які не відносяться до доцільних) , як це було зроблено у попередньому пункті :

1) $n_П = 2$ – кількість кінематичних схем серед доцільних , які починаються з поступальної кінематичної пари з прямою ланкою ;

   $n_{П'} = 1$ – кількість кінематичних схем серед доцільних , які починаються з поступальної кінематичної пари з вигнутою ланкою ;

   $n_О = 2$ – кількість кінематичних схем серед доцільних , які починаються з обертальної кінематичної пари із співпадаючою віссю ;

   $n_{О'} = 3$ – кількість кінематичних схем серед доцільних , які починаються з обертальної кінематичної пари з неспівпадаючою віссю ;

2) $К_П = 2$, $К_{П'} = 0$, $К_О = 0$, $К_{О'} = 6$– коефіцієнти , які враховують можливість приєднання одної кінематичної схеми (доцільної) до іншої (доцільної) ;

3) n – кількість ступеней рухомості .

Формула буде мати наступний вигляд :

$$(К_П * n_П^{n-2}) + (К_{П'} * n_{П'}^{n-2}) + (К_О * n_О^{n-2}) + (К_{О'} * n_{О'}^{n-2}) = n_{доц}$$

Перевіримо , чи співпаде кількість доцільних схем , розрахованих цією формулою з кількістю таких схем , визначених іншим способом у пункті 1.7 :

$$(2 * 2^{3-2}) + (0 * 1^{3-2}) + (0 * 2^{3-2}) + (6 * 3^{3-2}) = 4 + 18 = 22$$

Відповідь зійшлася : обраховане число підтверджено .

Маємо змогу спростити приведену формулу ; т.к. деякі коефіцієнти дорівнюють нулю , то друга і третя дужки випадають :

$$(К_П * n_П^{n-2}) + (К_{O'} * n_{O'}^{n-2}) = n_{доц} \quad \text{або} \quad n_{доц} = \sum_{i=П,O'}^{i} (K_i \cdot n_i)$$

Обрахуємо за допомогою цієї формули кількість доцільних схем при двох ступенях рухомості , чим підтвердимо дієздатність цієї формули , і визначимо кількість доцільних схем при довільній ступені рухомості :

$(2 * 2^{2-2}) + (6 * 3^{2-2}) = 2 + 6 = 8$ (2 – ступені рухомості)

$(2 * 2^{3-2}) + (6 * 3^{3-2}) = 4 + 18 = 22$ (3 – ступені рухомості)

$(2 * 2^{4-2}) + (6 * 3^{4-2}) = 8 + 54 = 62$ (4 – ступені рухомості)

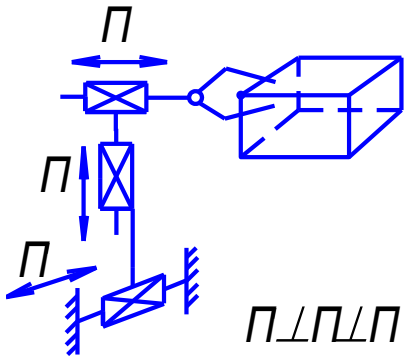
$(2 * 2^{5-2}) + (6 * 3^{5-2}) = 16 + 162 = 178$ (5 – ступені рухомості)

Отже , в підсумок проведених досліджень , можна сказати , що було виконано аналіз утворення кінематичних схем промислових роботів, поділено їх за ступінню доцільності та визначено кількість схем по кожній групі , і головне : визначено способи знаходження кількості доцільних схем. А тому закінчити дослідження найліпше буде алгоритмом, на якому схематично відобразимо кожен крок проведеної роботи в загальному вигляді :

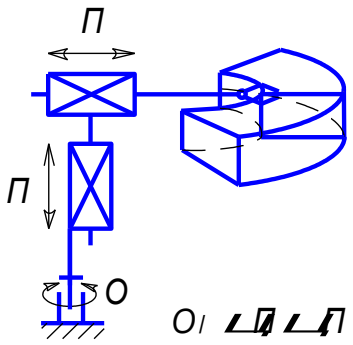
2.9 Поділ кінематичних схем за системами координат

Даний розділ має за мету показати зв'язок між структурними формулами кінематичних схем промислових роботів, їх робочими зонами та системами координат, в яких вони працюють; а також поділити кінематичні схеми за існуючими системами координат. В першу чергу потрібно розглянути, які саме існують системи координат.

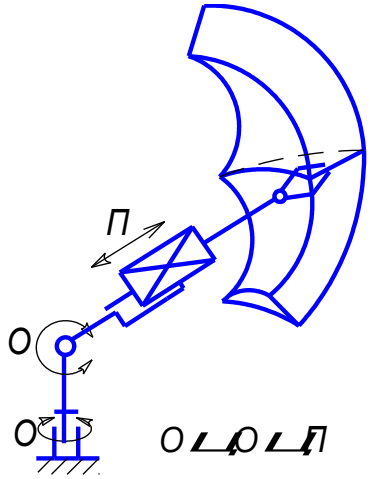
Прямокутна система координат (декартова): кінематичні схеми, виконані в даній системі координат використовуються в роботах, які призначені для виконання точних рухів чи операцій (складання, вимірювання).



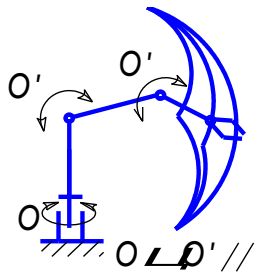
Циліндрична система координат: кінематичні схеми, виконані в даній системі координат використовуються в роботах, які забезпечують обслуговування різного обладнання, в тому числі завантаження і розвантаження; такі роботи мають можливість обслуговувати одночасно два верстата.



Сферична система координат: кінематичні схеми, виконані в даній системі координат використовуються в технологічних роботах, які можуть виконувати такі операції, як зварювання, фарбування і т.п.



Кутова система координат (ангулярна): кінематичні схеми, виконані в даній системі координат вико-ристовуються в універсальних роботах.



Отже, при проектуванні роботів, в першу чергу потрібно вибрати систему координат, яка буде відповідати умовам роботи і поставленим задачам. Наприклад, кінематична схема, виконана в прямокутній системі координат, забезпечує найвищу точність позиціювання, порівняно зі схемами, виконаними в інших системах координат.

Вище було наведено типові кінематичні схеми промислових роботів, які працюють в різних системах координат. По даним прикладам бачимо, що робоча зона робота залежить від вибраної системи координат; тобто вибравши систему координат, ми практично вибираємо робочу зону, яку буде обслуговувати спроектований маніпулятор. Створення маніпуляторів промислових роботів з потрібними зонами обслуговування, які працюватимуть у визначеній системі координат, можливо шляхом комбінації кінематичних пар і напрямків руху. А послідовність розміщення кінематичних пар і їх вид визначають кінематичну структуру промислових роботів і їх рухомі можливості.

У розрахунках, які виконувалися в попередніх пунктах було проведено розподіл структурних формул на підгрупи ПП, ПО, ОП і ОО при двох ступенях рухомості; і на підгрупи ППП, [ППО, ПОП, ОПП], [ООП, ОПО, ПОО] і ООО при трьох ступенях рухомості. Завдяки проведеній систематизації, було виконано аналіз не просто за приведеними підгрупами структурних формул, а саме за системами координат, так як чітко бачимо залежність систем координат від послідовності розміщення кінематичних пар:

- ППП (прямокутна система координат);
- ППО, ПОП, ОПП (циліндрична система координат);
- ОПП, ОПО, ПОО (сферична система координат);
- ООО (кутова система координат).

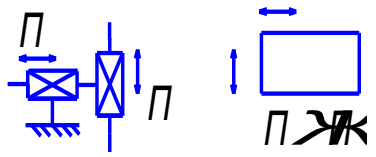
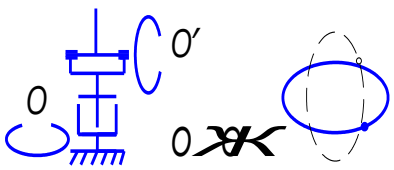
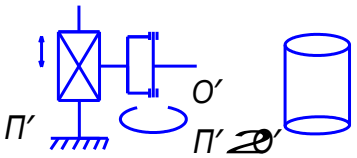
Отже маємо змогу виконати розподіл кінематичних схем за системами координат. Якщо розглянемо кінематичні схеми при двох ступінях рухомості, то побачимо деяку невизначеність з приводу відношення до системи координат у поєднаннях таких кінематичних пар, як ПО та ОП. Їх не можливо віднести до існуючих систем координат, представлених за допомогою кінематичних схем роботів з трьома ступенями рухомості. Такі схеми мають потенціал утворити систему координат або сферичну, або циліндричну; тобто вони переходять, при приєднанні поступальної або обертальної кінематичної пари, в одну із зазначених систем координат (табл.24):

табл.24

Не визначена кінематична схема за системою координат	Утворюємі кінематичні схеми з трьома ступенями рухомості	Система координат
ПО	ППО	циліндрична
	ОПО	сферична
	ПОП	циліндрична
	ПОО	сферична

Зведемо в таблицю результати поділу кінематичних схем з двома ступенями рухомості за системою координат (табл.25):

табл.25

Групи схем в залежності від типу систем координат	Структурні формули	Представники кінематичних схем
Схеми, які працюють в прямокутній системі координат	П | П; П ⊥ П; П | П’; П ⊥ П’; П’ ⊥ П’; П’ X П’; П’ || П; П’ ⊥ П; П’ X П; П’ || П’	
Схеми, які працюють в циліндричній системі координат	-	-
Схеми, які працюють в сферичній системі координат	-	-
Схеми, які працюють в кутовій системі координат	О | О; О ⊥ О; О | О’; О ⊥ О’; О’ ⊥ О’; О’ X О’; О’ || О; О’ ⊥ О; О’ X О; О’ || О’	
Не визначена	П | Oz; П ⊥ Oz; П | O’z; П ⊥ O’z; O | Пz; O ⊥ Пz; O | П’z; O ⊥ П’z; O’ ⊥ Пz; O’ X Пz; O’ || П’z; O’ ⊥ П’z; O’ X П’z; П’ | O; П’ || Oz; П’ ⊥ Oz; П’ X Oz; П’ || O’z; П’ ⊥ O’z; П’ X O’z; O’ || Пz	

Перейдемо до розподілу за системами координат кінематичних схем з трьома ступенями рухомості. Дані схеми мають чіткий поділ по системам координат, який і зведемо в табл.26:

Табл.26

Групи схем в залежності від типу системи координат	Найбільш доцільні варіанти утворення	Представники кінематичних схем	
Схеми, які працюють в прямокутній системі координат	П ⊥ П, П ⊥ П, П' ⊥ П, П' ⊥ П, П' ⊥ П		
Схеми, які працюють в циліндричній системі координат	П ⊥ П, П ⊥ П, П ⊥ О, П ∥ О, П ⊥ П, О ∥ П, О ⊥ П, О ∥ П, О ⊥ П, О ∥ П, О ⊥ П, О ∥ П, О ⊥ П		
Схеми, які працюють в сферичній системі координат	О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П		
Схеми, які працюють в кутовій системі координат	О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П, О ∈ П		

3.Техніко-економічні розрахунки

Визначення економічної ефективності модернізації робота “KUKA KR-10” для використання в роботизованому комплексі токарним верстатом HAAS SL-10

3.1 Загальні вихідні дані

Визначимо економічну ефективність використання робота KUKA KR-10 з частковою модернізацією для роботи у складі роботизованого токарного комплексу (РТК) з токарним верстатом HAAS SL-10. Використання робота сприяє вирішенню трьох завдань:

- покращенню умов праці робітників;
- зростанню продуктивності праці;
- скороченню потреби в робочій силі.

Завдяки можливості швидкого переналагоджування промислового робота для виконання різних завдань, його використання економічно доцільною в умовах автоматизації процесів, частої зміни предметів праці для усунення ручної монотонної і малокваліфікованої праці.

Економічний ефект при використанні промислових роботів виникає завдяки підвищенню продуктивності обладнання, тобто зростанню обсягу випуску продукції з основного технологічного обладнання, який обслуговує робот, або завдяки підвищенню продуктивності праці на операції, яку виконує робот. При визначенні економічного ефекту в якості бази для порівняння приймемо конструкцію робота до модернізації. Порівнювальні варіанти приведені у зіставний вигляд за всіма показниками: режиму роботи, обсягу виробленої продукції, її якості, ціни та ін. Порівняння варіантів береться з розрахунку виробництва річного обсягу продукції 8000 шт.

Розрахунок проведемо на прикладі виконання токарних операцій обробки умовної деталі обертання на токарному верстаті мод. HAAS SL-10. В розглянутій технології використовується одна операція та, відповідно один робот.

Вихідні дані щодо структури часу на виконання основних і допоміжних операцій та інші техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Вихідні дані про деталь-представник

№	Показник	Базовий варіант	Новий варіант
1	Цикловий час, хв.	3,4	3,4
2	Допоміжний час, хв.	0,33	0,08
3	Оперативний час обробки деталі, хв.	3,73	3,48
4	Час на обслуговування робочого місця, хв. (6% від оперативного часу)	0,22	0,20
5	Штучний час обробки деталі, хв.	3,95	3,68
6	Час налагодження обладнання, хв.	20	25
7	Річний випуск деталей, шт.	10000	10000
8	Потужність електродвигунів: - робота, кВТ; - верстата, кВт	 2 11	 2 11
9	Площа, яку займає: - робот, $м^2$; - верстат, $м^2$	 1,0 5,75	 1,0 5,75
10	Категорія ремонтної складності механічної частин РТК, УРО: - робота, УРО; - верстата, УРО	 9,0 15	 9,5 15
11	Оптова ціна: - робота, грн; - верстата, грн.	 110000 386000	 125000 385000

3.2 Розрахунок експлуатаційних витрат при застосуванні роботизованого комплексу виконуємо за формулою:

$$B_{\text{е}} = \sum_{i=1}^{m} B_{\text{і}}, \qquad (3.1)$$

де $B_{ес}$ – витрати на електроенергію силову, грн.;

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

$B_р$ – витрати на ремонт РТК, грн.;

$B_п$ – витрати на утримання приміщення, грн.;

$B_н$ – витрати на налагодження РТК, грн.;

$B_а$ – витрати на амортизацію РТК, грн.

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{ес} = \frac{N_в \cdot K_о \cdot K_N \cdot K_д}{\eta_в \cdot \eta_м} \cdot \frac{T_{шт}}{60} \cdot Ц_{ел}, \quad (3.2)$$

де $N_в$ – встановлена потужність електродвигунів обладнання, кВт;

$K_о$ – коефіцієнт одночасної роботи двигунів, $K_о$=0,65...0,8;

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (приймається у розмірі 0,5…0,6 – для токарних верстатів);

$K_д$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом, $K_д$=0,3...0,5;

$T_{шт}$ – штучний час обробки деталі, хв.;

$\eta_в$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі, $\eta_в$=0,92…0,96;

$\eta_м$ – ККД електродвигунів, $\eta_м$=0,86…0,9;

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

$$E_{с.баз} = \frac{13 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,95 \cdot 0,88} \cdot \frac{3,95}{60} \cdot 7,5 = 0,9214 \text{ грн.}$$

$$E_{с.пр} = \frac{13 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,95 \cdot 0,88} \cdot \frac{3,68}{60} \cdot 7,5 = 0,8584 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{мд} = \frac{M_{гв} \cdot R_м \cdot T_{нор}}{60 \cdot 100} \cdot K_п, \quad (3.3)$$

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

$R_м$ – категорія складності ремонту механічної частини обладнання, УРО;

$T_{нор}$ – норма штучного часу (для верстата) або допоміжного часу (час роботи робота), хв.;

$K_п$ – коефіцієнт, який враховує тип (для серійного $K_п$ = 1,0).

$$B_{дм.б} = \frac{79,5 \cdot (15 \cdot 3,95 + 9 \cdot 0,33)}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,8244 \text{ грн.};$$

$$B_{дм.пр} = \frac{79,5 \cdot (15 \cdot 3,68 + 9,5 \cdot 0,08)}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,7415 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт РТК:

$$B_р = \frac{R_м \cdot B_{рм} \cdot T_{нор} \cdot K_{р.ел}}{F_{дрм} \cdot 60}, \quad (3.4)$$

де $R_м$ - категорія ремонтної складності обладнання, УРО;

$B_{рм}$ – річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО обладнання, грн./рік;

$K_{р.ел}$ – коефіцієнт, який враховує витрати на ремонт електричної частини обладнання;

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

$$B_{р.б} = \frac{880 \cdot (15 \cdot 3,95 + 9 \cdot 0,33) \cdot 1,3}{3950 \cdot 60} = 0,3003 \text{ грн.};$$

$$B_{р.пр} = \frac{880 \cdot (15 \cdot 3,68 + 9,5 \cdot 0,08) \cdot 1,3}{3950 \cdot 60} = 0,2701 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{уп} = \frac{F_о \cdot K_д \cdot C}{F_{дрм}} \cdot \frac{T_{доп}}{60}, \quad (3.5)$$

де $F_о$ – виробнича площа, яку займає обладнання, м^2;

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

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

$$B_{уп.б} = \frac{5,75 \cdot 3 \cdot 3,95 + 1,0 \cdot 4,0 \cdot 0,33}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,2286 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{уп.б}} = \frac{5,75 \cdot 3 \cdot 3,68 + 1,0 \cdot 4,0 \cdot 0,08}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,2100 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію РТК:

$$B_{\text{а}} = \frac{Ф_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{доп}}}{60}, \quad (3.6)$$

де $H_{\text{а}}$ – норма амортизації на реновацію обладнання, %;

$Ф_{\text{бал}}$ – балансова вартість обладнання, грн.

Балансову вартість обладнання знайдемо за формулою:

$$Ф_{\text{бал}} = Ц_{\text{опт}} \cdot \left(1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{ф}\right), \quad (3.7)$$

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

$K_{тр}$, $K_{м}$, $K_{ф}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

- верстату:

$$Ф_{бал.в} = 385000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 458150 \text{ грн.};$$

- робота:

$$Ф_{бал.б} = 110000 \cdot (1 + 0,05 + 0,04) = 119900 \text{ грн.};$$

$$Ф_{бал.пр} = 125000 \cdot (1 + 0,05 + 0,04) = 135770 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{а.б}} = \frac{(485150 \cdot 3,95 + 119900 \cdot 0,33) \cdot 15}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 1,2379 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а.пр}} = \frac{(458150 \cdot 3,68 + 135770 \cdot 0,08) \cdot 15}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 1,0694 \text{ грн.},$$

Витрати на налагодження РТК:

$$B_{н} = C_{гн} \cdot \left(1 + K_{д}\right) \cdot \left(1 + K_{с}\right) \cdot \frac{T_{пз} \cdot A}{60 \cdot N_{д}}, \quad (3.8)$$

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

A – кількість налагоджень за рік;

$T_{пз}$ – підготовчо-заключний час (час налагодження), хв.;

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

$$B_{н}^{баз} = 103,972 \cdot \left(1 + 0,1\right) \cdot \left(1 + 0,22\right) \cdot \frac{20 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,0558 \text{ } грн.,$$

$$B_н^{пр} = 103,972 \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) \cdot \frac{25 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,0697 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Експлуатаційні витрати на використання РТК, грн.

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне познач.	Варіанти	
			Базовий	Проект
1.	Електроенергія силова	$B_{ес}$	0,9214	0,8584
2.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,8244	0,7415
3.	Ремонт обладнання	$B_{р}$	0,3003	0,2701
4.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,2286	0,2100
5.	Амортизація обладнання	$B_{а}$	1,2379	1,0694
6.	Налагодження РТК	$B_{н}$	0,0558	0,0697
	Всього	$B_{е}$	3,5684	3,2191

3.3 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект у споживача розрахуємо за формулою:

$$E_{рсп} = \left(B_{е.б} - B_{е.пр}\right) \cdot N_д - E_н \cdot K_{сп}, \qquad (3.9)$$

де $B_{е.б}$, $B_{е.пр}$ – експлуатаційні витрати відповідно в базовому та проектному варіантах, грн.;

$N_д$ – річна програма обробки деталі, шт./рік;

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

$$K_{сп} = Ф_{бал.пр} \cdot Q_{пр} - Ф_{бал.б} \cdot Q_б, \qquad (3.10)$$

де $Ф_{бал.пр}$, $Ф_{бал.б}$ - відповідно балансова вартість проектного та базового обладнання, грн.;

$Q_{пр}$, $Q_б$ - відповідно потреба у РТК в проектному та базовому варіантах.

$$K_{сп} = 135770 \cdot 1 - 119900 \cdot 1 = 15870 \text{ грн.}$$

$$E_{р.сп} = (3,5684 - 3,2191) \cdot 10000 - 0,16 \cdot 15870 = 2540 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок.сп} = \frac{K_{сп}}{\left(B_{е.б} - B_{е.пр}\right) \cdot N_{д}} = \frac{15870}{(3,5684 - 3,2191) \cdot 10000} = 4,5 \text{ роки} \qquad (3.11)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Підсумкові техніко-економічні показники базового та модернізованого РТК

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,–)
1.	Потреба в РТК у даного споживача	шт./рік	1	1	-
2.	Річний випуск деталей (умовних)	шт./рік	10000	10000	–
3.	Допоміжний час обробки деталі	хв.	0,33	0,08	–75,8
4.	Штучний час обробки деталі	хв.	3,95	3,68	–6,8
5.	Оптова ціна РТК	грн.	496000	511000	+2,7
6.	Балансова вартість РТК	грн.	578050	593920	+2,7
7.	Експлуатаційні витрати в розрахунку на одну деталь	грн.	3,5684	3,2191	–9,8
8.	Додаткові капітальні витрати у споживача	грн.	–	15870	–
9.	Строк окупності додаткових капітальних витрат	років	–	4,5	–
10.	Річний економічний ефект	грн.	–	2540	–

Загальні висновки

У даній роботі по дослідженню модульних варіантів кінематичних схем промислових роботів було проведено два етапи. Перший етап складався з визначення з загальної кількості всіх теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів при двох, трьох і чотирьох ступенях рухомості, кількості найбільш доцільних схем шляхом поступового виділення спочатку схем, які неможливо реалізувати, потім недоцільних, мало доцільних та доцільних схем, і потім кількості найбільш доцільних варіантів. Другий етап складався з визначення структурних формул найбільш доцільних варіантів та моделювання їх схем.

Отримано результат - визначена кількість найбільш доцільних варіантів, яка становить:

при двох ступенях рухомості

– для схем, які відносяться до першої групи, схеми якої працюють в прямокутній системі координат, $n^{II}_{нб.д_I} = 2$;

– для схем, які відносяться до другої групи, схеми якої працюють в циліндричній системі координат, $n^{II}_{нб.д_{II}} = 3$;

– для схем, які відносяться до четвертої групи, схеми якої працюють в кутовій системі координат, $n^{II}_{нб.д_{IV}} = 3$;

при трьох ступенях рухомості

– для схем, які відносяться до першої групи, $n^{III}_{нб.д_I} = 6$;

– для схем, які відносяться до другої групи, $n^{III}_{нб.д_{II}} = 21$;

– для схем, які відносяться до третьої групи, $n^{III}_{нб.д_{III}} = 31$;

– для схем, які відносяться до четвертої групи, $n^{III}_{нб.д_{IV}} = 12$.

Визначені за допомогою розробленої програми структурні формули найбільш доцільних варіантів утворення дають змогу збудувати кінематичні схеми цих варіантів. А дослідження робочого простору, який забезпечують досліджуємі варіанти, допоможуть визначитися з необхідною кінематичною схемою промислового робота на етапі проектування. Поставлена задача представляє собою

великий науковий і промисловий інтерес, а вирішення її за допомогою комп'ютерного проектування є надзвичайно прогресивним напрямком у сучасному роботобудуванні. Оскільки основою для побудови промислового робота є робоча зона, яку він повинен обслуговувати, то розглянувши кінематичні схеми з потрібним робочим простором за допомогою розробленої програми можливо визначити найбільш раціональний варіант кінематичної схеми майбутнього робота, який буде задовольняти конкретним виробничим умовам.

Дана програма дозволяє значно автоматизувати процес визначення потрібної кінематичної схеми майбутнього промислового робота. Використання розробленої програми в навчальних цілях дозволить наглядно продемонструвати найбільш доцільні варіанти промислових роботів з їх рухомими можливостями, а незначна адаптація і оптимізація можуть дозволити використання цієї програми навіть у виробництві.

Список літератури

1. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник – М.: Машиностроение, 1983. – 376 с.: ил.

2. Костюк В.И., Гавриш А.П., Ямпольский Л.С., Карлов А.Г. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация. – К.: Вища шк. Головное издательство, 1985. – 359.

3. Механика промышленных роботов: учебное пособие для вузов. В 3 кн./ Под ред. Фролова К.В., Воробьёва Е.И. кн. 2.: Расчёт и проектирование механизмов /Воробьёв Е.И., Егоров О.Д., Попов С.А. – М.: Высш. шк. 1988. – 367 с.: ил.

5. Павленко І. І. Кинематическая структура промышленых роботов. // Изв. ВУЗов “Машиностроение”. М. 1977, № 9. – с. 25-28.

6. Павленко І. І. Промислові роботи: характеристики та градація. – Кіровоград.: КІСМ, 1997. – 78 с.

7. Павленко І. І. Структура промислових роботів. – Кіровоград.: КІСМ, 1998. – 100 с.

8. Роботизированные производственные комплексы / Козырев Ю. Г., Кудинов А. А., и др.; – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.: ил.

9. K.Koskinen (2016) Design of a smart gripper for industrial applications., 8th June.

10. Caucey G.C. & R.D. Quinn. (2016) Gripper design guidelines for modular manufacturing. Procceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat.No.98CH36146) n. pag. Web.8 June.

11. Raymond R. Ma & Aaron M. Dollar. (2016) Yale Openhand Project - Model T. Eng.yale.edu. N.p.. Web. 21 June.