

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
на тему:

«Вдосконалення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної
структури з важільними приводами»
«Improving the kinematic characteristics of a flat manipulator of parallel structure with
lever drives»

Виконавець: здобувач вищої освіти 2 року
магістратури, групи ГМ-24М-3, напряму
133 «Галузеве машинобудування»

Сергій КОЦЮБЕНКО

Керівник: доц., к.т.н.

Андрій ГРЕЧКА

Рецензент: доц., к.т.н.

Тимофій РУДЕНКО

Завідувач кафедри: доц., к.т.н.

Андрій ГРЕЧКА

Центральноукраїнський національний технічний університет

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ММР

_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2026 р.

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

Сергія КОЦЮБЕНКА

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Вдосконалення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами

2. Керівник роботи: к.т.н., доц., Андрій ГРЕЧКА

3. Строк подання роботи до захисту «10» травня 2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: Вдосконалення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами, шляхом визначення раціональних геометричних параметрів механізму

Завдання:

- розробити кінематичну схему маніпулятора;
- проаналізувати пряму та зворотну кінематичні залежності;
- скласти схематичну модель маніпулятора та виконати симуляцію його роботи з різними геометричними параметрами для аналізу кінематичних та динамічних показників;
- визначити раціональні геометричні параметри механізму, які забезпечують підвищення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами;
- втілити отримані раціональні геометричні параметри у повноцінній тривимірній моделі та виконати симуляцію її роботи шляхом переміщення робочого органу по типовій траєкторії;
- виконати економічне обґрунтування плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Андрій ГРЕЧКА		
РОЗДІЛ 2	Андрій ГРЕЧКА		
РОЗДІЛ 3	Андрій ГРЕЧКА		
РОЗДІЛ 4	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1	ВСТУП	Січень 2026	Вик.
2	АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	Лютий 2026	Вик.
3	СТРУКТУРА І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЛОСКОГО МАНІПУЛЯТОРА ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ВАЖІЛЬНИМИ ПРИВОДАМИ	Лютий 2026	Вик.
4	ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МАНІПУЛЯТОРА	Березень 2026	Вик.
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ	Березень 2026	Вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Квітень 2026	Вик.
7	ГРАФІЧНА ЧАСТИНА ТА ОФОРМЛЕННЯ	Квітень 2026	Вик.

Дата видачі завдання « 19 » січня 2026 р.

Керівник роботи _____ Андрій ГРЕЧКА
(підпис)

Завдання прийнято до виконання 19 » січня 2026 р.

Здобувач _____ Сергій КОЦЮБЕНКО
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Сергій КОЦЮБЕНКО. Вдосконалення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2026. – 74 с. Матеріали презентації 9 аркушів.

Метою роботи є вдосконалення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами, шляхом визначення раціональних геометричних параметрів механізму.

Для досягнення мети дослідження було вирішено такі задачі: - розроблено кінематичну схему маніпулятора; проаналізовано пряму та зворотну кінематичні залежності; складено схематичну модель маніпулятора та виконано симуляцію його роботи з різними геометричними параметрами для аналізу кінематичних та динамічних показників; визначено раціональні геометричні параметри механізму, які забезпечують підвищення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами; втілено отримані раціональні геометричні параметри у повноцінній тривимірній моделі та виконати симуляцію її роботи шляхом переміщення робочого органу по типовій траєкторії; виконано економічне обґрунтування плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами

Актуальність: створення сучасного високопродуктивного технологічного обладнання для реалізації високих технологій та високошвидкісної багатокоординатної обробки необхідно орієнтуватись перш за все на використання механізмів паралельної структури, оскільки на сьогоднішній день лише такі механізми здатні забезпечити необхідний технічний рівень та високу конкурентоспроможність верстатного обладнання.

Наукова новизна: визначені кінематичні залежності між положенням робочого органу та кутами повороту приводів маніпулятора; визначені раціональні геометричні параметри механізму, які забезпечують підвищення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами.

Практичне значення: встановлені силові показники приводів маніпулятора при виконанні типових траєкторій переміщення робочого органу.

Ключові слова: обладнання з паралельною кінематикою, важільні приводи, пряма та зворотна кінематичні залежності, кінематичні характеристики.

Abstract

Serhii KOTSIUBENKO. Improving the kinematic characteristics of a flat manipulator of parallel structure with lever drives. Master's Thesis: CNTU, 2026. - 74 p. Presentation materials 9 il.

The aim of the work is to improve the kinematic characteristics of a planar parallel-structure manipulator with lever drives by determining the rational geometric parameters of the mechanism.

To achieve the goal of the study, the following tasks were solved: - the kinematic scheme of the manipulator was developed; direct and inverse kinematic relationships were analyzed; a schematic model of the manipulator was created and its operation was simulated with various geometric parameters to analyze kinematic and dynamic performance; rational geometric parameters of the mechanism were determined to enhance the kinematic characteristics of the planar parallel-structure manipulator with lever drives; the obtained rational geometric parameters were implemented in a full three-dimensional model and its operation was simulated by moving the end-effector along a typical trajectory; an economic justification of the planar parallel-structure manipulator with lever drives was carried out..

Relevance: the development of modern high-performance technological equipment for implementing advanced technologies and high-speed multi-axis machining requires, first of all, focusing on the use of parallel-structure mechanisms, since currently only such mechanisms are capable of providing the required technical level and high competitiveness of machine tools.

Scientific novelty: kinematic relationships between the position of the end-effector and the rotation angles of the manipulator drives were determined; rational geometric parameters of the mechanism were identified, ensuring improved kinematic characteristics of the planar parallel-structure manipulator with lever drives.

Practical significance: the force characteristics of the manipulator drives were determined for typical trajectories of end-effector motion.

Keywords: parallel kinematic equipment, lever drives, direct and inverse kinematic relationships, kinematic characteristics.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ.....	9
1.1. Необхідність створення і функціональні можливості технологічного обладнання з паралельною кінематикою.....	9
1.2. Класифікація механізмів паралельної структури	12
1.3. Основні структурні схеми технологічного обладнання з паралельною кінематикою	13
1.4. Існуючі конструкції обладнання з паралельною кінематикою.....	15
1.5. Мета і задачі роботи.....	22
2. СТРУКТУРА І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЛОСКОГО МАНІПУЛЯТОРА ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ВАЖІЛЬНИМИ ПРИВОДАМИ.....	24
2.1. Кінематичні особливості плоского маніпулятора.	24
2.2. Пряма задача кінематики.	25
2.3. Зворотна задача кінематики.....	29
2.3. Аналіз кінематичних залежностей.	31
2.4. Визначення оптимальних кінематичних параметрів маніпулятора.	36
3. ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МАНІПУЛЯТОРА.	49
3.1. Розробка тривимірної моделі маніпулятора.	49
3.2. Симуляція переміщення моделі маніпулятора.	50
4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПЛОСКОГО МАНІПУЛЯТОРА ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ВАЖІЛЬНИМИ ПРИВОДАМИ	54
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:.....	72

ВСТУП

В сучасному індустріальному світі, вже не є новим використання роботів маніпуляторів для виконання найрізноманітніших операцій, від звичайного переміщення або сортування деталей, до операцій зі складання, зварювання, фарбування та інші доволі складні задачі. Тому з кожним днем до маніпуляторів висуваються все більше вимог по відповідним параметрам, залежно від сфери використання, зокрема основними характеристиками для вдосконалення зазвичай є: збільшення швидкості переміщення, збільшення жорсткості, поліпшення точності позиціонування, збільшення навантажувальної здатності, тощо. Проте ці параметри безпосередньо пов'язані між собою, тому роботи-маніпулятори здебільшого мають доволі вузьку спеціалізацію і ще на етапі проектування розраховуються під конкретні задачі. Але при цьому, вже існуючі серійні моделі деяких роботів, можуть бути вдосконалені за цілим рядом параметрів. Для цього необхідне, або доопрацювання вже існуючого маніпулятора, або створення абсолютно нового прототипу з використанням лише основних принципових рішень з існуючої моделі. В даній роботі буде приділена увага аналізу кінематичних залежностей та динамічних показників робота-маніпулятора паралельної структури з важільними приводами.

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою внаслідок своїх специфічних властивостей спроможне вирішити більшість технологічних задач, які ставляться сучасним багатомоделним серійним виробництвом:

- високий рівень гнучкості виробництва та переналагоджування технологічного обладнання при переході на іншу номенклатуру виробів;
- реалізація надвисоких швидкостей робочих, допоміжних та установчих переміщень рухомих виконавчих органів;
- модульна конструкція технологічного обладнання;
- геометрична симетрія побудови технологічного обладнання;
- замкненість кінематичних ланцюгів, які створюють жорстку конструкцію;
- висока точність позиціонування та динамічні характеристики.

Отже, при створенні сучасного високопродуктивного технологічного обладнання для реалізації високих технологій та високошвидкісної багатокоординатної обробки необхідно орієнтуватись перш за все на використання механізмів паралельної структури, оскільки на сьогоднішній день лише такі механізми здатні забезпечити необхідний технічний рівень та високу конкурентоспроможність верстатного обладнання

Задачі роботи:

- розробка кінематичної схеми маніпулятора;
- аналіз прямої та зворотної кінематичних залежностей;
- складання схематичної моделі маніпулятора та симуляція його роботи з різними геометричними параметрами для аналізу кінематичних та динамічних показників;
- визначення раціональних геометричних параметрів механізму, які забезпечують підвищення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами;
- втілення отриманих раціональних геометричних параметрів у повноцінній тривимірній моделі та симуляція її роботи шляхом переміщення робочого органу по типовій траєкторії.

Елементи наукової новизни:

- визначені кінематичні залежності між положенням робочого органу та кутами повороту приводів маніпулятора;
- визначені раціональні геометричні параметри механізму, які забезпечують підвищення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами.

Практична цінність:

- встановлені силові показники приводів маніпулятора при виконанні типових траєкторій переміщення робочого органу.

1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Необхідність створення і функціональні можливості технологічного обладнання з паралельною кінематикою

Слід визначити концепції побудови технологічного обладнання нового покоління:

– багатофункціональність – використання механізмів, які мають практичну можливість реалізації транспортних (переміщення, переорієнтацію та установку заготовок), допоміжних (фіксації - розфіксації, затиску-розтиску, позиціонування при поступальних і обертових рухах) і технологічних (обробки, складання, випробування та вимірювання) операцій одним виконавчим органом;

– багатопоточність – використання механізмів, які дозволяють реалізувати раціональний перерозподіл навантажень між декількома механізмами та його складовими елементами паралельними шляхами, що забезпечує мінімізацію маси рухомих елементів, зменшення енергетичних витрат на переміщення елементів механізму та виконавчого органу.

Наведеним критеріям повністю відповідають механізми паралельної структури, основними властивостями яких є:

- раціоналізація перерозподілу рухів та енергетичних потоків за рахунок передачі їх паралельними шляхами;

- використання кінематичних ланок у вигляді стрижневої просторової ферми, елементи якої працюють тільки на розтягування та стискання при відсутності напружень згину, що підвищує жорсткість технологічної системи;

- мінімізація мас рухомих елементів обладнання, кількості з'єднань складових компонентів та їх кінематичних ланок обумовлює підвищення точності позиціонування виконавчих органів та поліпшення динамічних характеристик обладнання;

- геометрична симетрія компоновки, модульна побудова та розташування приводів на нерухомій несучій системі зменшує витрати на виробництво та впровадження технологічного обладнання нового покоління.

Технологічні можливості верстатних систем визначаються кінематичною структурою, компоновкою, конструктивним виконанням, рівнем автоматизації та технічною характеристикою.

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

Практична реалізація усіх схем формоутворення поверхонь деталей обумовлює основну властивість подібного обладнання – суміщення методів обробки та процесів з різним за фізичною природою технологічним впливом: лезову, абразивну, електрофізикохімічну обробки, пластичне деформування та зварювання, а також процеси складання машин, фарбування, випробування та вимірювання, що визначає значно більший рівень інтеграції операції у порівнянні з іншим технологічним обладнанням. Автоматизовані операції складання вузлів, особливо, якщо вони виконуються на одному місті з обробкою деталей, значно підвищують продуктивність процесу виготовлення машин та покращують їх якість внаслідок відсутності транспортних операцій, а також підвищують загальну культуру виробництва.

Подібне технологічне обладнання має практичну можливість виконання майже усіх складальних операцій, а саме: підготовчі (підготовка деталей, складальних одиниць та комплектуючих виробів до наступних операцій складання), допоміжні (змащування, маркування та інше), та складальні операції (технологічні операції по з'єднанню деталей у складальні одиниці, вузли та машини), а також обкатка, випробування та вимірювання складальних одиниць.

Концепція проектування технологічного обладнання з паралельною кінематикою передбачає конструктивне виконання кінематичних ланцюгів у вигляді просторових стрижневих ферм, які мають незначну масу рухомих елементів, що обумовлює отримання надвисоких швидкостей та прискорень

виконавчого органу: частота обертання шпинделя досягає $120\,000\text{ хв}^{-1}$, а в окремих випадках майже $180\,000\text{ хв}^{-1}$ (при процесах шліфування) швидкість лінійних переміщень має величину до 100 м/хв , а прискорень – 50 м/с^2 .

Подібні режими переміщень виконавчих органів значно зменшують основний час виконання операцій та збільшують продуктивність обладнання.

На технологічному обладнанні з паралельною кінематикою передбачається автоматичне управління переходу з прискореного переміщення на уповільнене при наближенні відповідного інструменту до заданої координатної опорної точки та можливість чергування установчих та допоміжних переміщень та робочих подач виконавчого органу, що реалізується стандартними циклами виконання операцій.

Отже, технологічне обладнання з паралельною кінематикою має значно широкі технологічні можливості у порівнянні з традиційними верстатними системами, внаслідок їх побудови на принципово нових концепціях:

- використання багатофункціональних та багатопоточних стрижневих механізмів паралельної структури, що дозволяє за допомогою одного механізму виконувати транспортні, установчі та технологічні операції;

- застосування вбудованих високомоментних приводів та швидкодіючої обчислювальної техніки обумовлює управління технологічними переміщеннями виконавчого органу механізму та, крім того, компенсацію пружних переміщень під дією сил різання, чим забезпечує стійку роботу технологічної машини при нестійкому положенню механізмів;

- використання вбудованих систем контролю обумовлює створення технологічних систем з елементами штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати такі технологічні операції, які виконуються тільки людиною та вручну (обробка та виготовлення художніх виробів, фінішна обробка турбінних лопастей, граверні роботи та інші).

Крім того, нова концепція розвитку технологічного обладнання передбачає реалізацію більш сучасних технологічних процесів обробки крупногабаритних деталей.

1.2. Класифікація механізмів паралельної структури

Механізми класифікуються [1]:

- За функціональним призначенням:
 - процеси механічної обробки;
 - процеси складання машин;
 - випробування вузлів;
 - вимірювання параметрів деталі.
- За методом перетворення рухів виконавчого органу:
 - шляхом зміни координат опорних шарнірів;
 - шляхом зміни довжин кінематичних ланок;
 - шляхом примусового обертального руху шарнірів, змонтованих на нерухомому елементі механізму;
 - шляхом зміни кута між кінематичними ланками постійної довжини.
- За кількістю кінематичних ланок та ступенів вільності:
 - дві – сферичний механізм, біпод, біглайд;
 - три – трипод, лінапод, дельта, ортоглайд;
 - п'ять – пентапод;
 - шість – гексапод, гексаглайд.
- За наявністю і розташуванням напрямних у просторі:
 - з напрямними:
 - прямі – паралельні (горизонтальні, вертикальні), комбіновані (в одній площині, в двох площинах, в трьох площинах);
 - трикутної форми (горизонтальні, вертикальні);
 - колові (горизонтальні, вертикальні);
 - зіркоподібні (горизонтальні, вертикальні, під кутом до координатних осей);
 - без напрямних.
- За характеристикою приводів виконавчих органів:
 - двигуни обертальної дії – електромотори, гідромотори;
 - двигуни поступальної дії – пневмоприводи, гідроприводи, лінійні електродвигуни.

- За характеристикою механізмів перетворення рухів:
 - кулькогвинтові;
 - зубчасті;
 - планетарні;
 - хвильові зубчасті;
 - зубчасто-рейкові;
 - зубчасто-пасові;
 - тросові.
- За конструктивним виконанням кінематичних ланок:
 - шарнірно-важільні;
 - штанги змінної довжини, складаються з телескопічних або іншого конструктивного виконання штанг;
 - паралелограмний механізм;
 - сферичний механізм;
 - V-подібний механізм.
- За розташуванням приводу головного руху:
 - привод розташований на рухомому во;
 - привод розташований на нерухомому стаціонарному блоку.

1.3. Основні структурні схеми технологічного обладнання з паралельною кінематикою

Відомі такі структурні схеми технологічного обладнання з паралельною кінематикою [5]:

Біпод - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання двох штанг змінної довжини (рис.1.1).

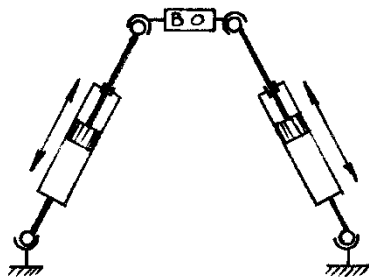


Рис.1.1

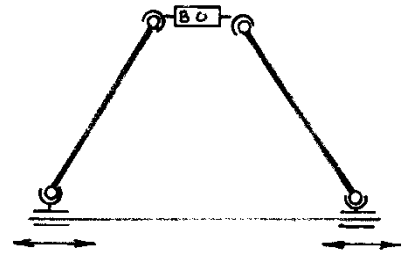


Рис. 1.2

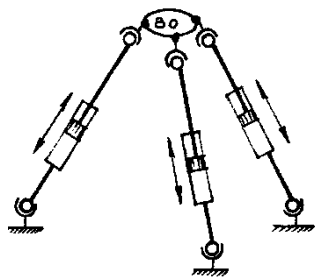


Рис.1.3

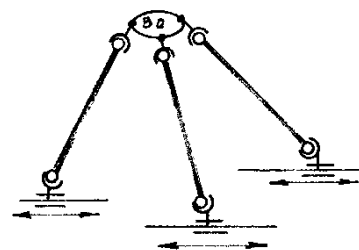


Рис. 1.4

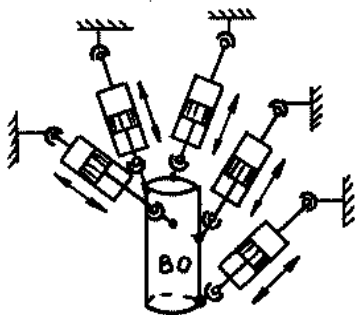


Рис. 1.5

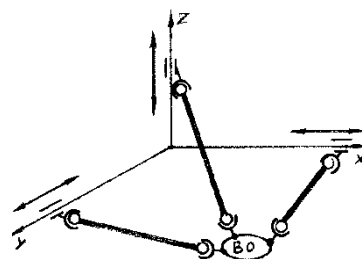


Рис. 1.6

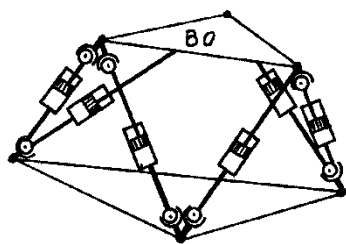


Рис. 1.7

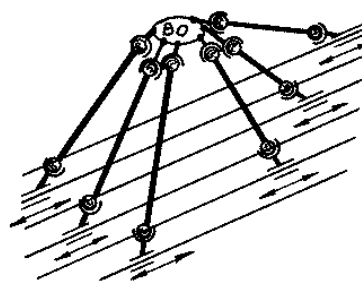


Рис. 1.8

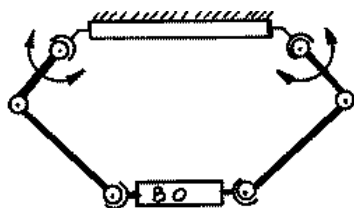


Рис. 1.9

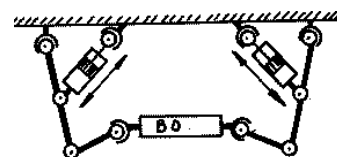


Рис. 1.10

Біглайд - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання двох штанг постійної довжини (рис. 1.2).

Тріпод - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг змінної довжини (рис. 1.3).

Тріаглайд - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини (рис. 1.4).

Пентапод - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох основних та двох додаткових штанг змінної довжини (рис. 1.5).

Ортоглайд - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини з ортогональним розташуванням напрямних (рис. 1.6).

Гексапод - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання шести штанг змінної довжини (рис. 1.7).

Гексаглайд - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання шести штанг постійної довжини (рис. 1.8).

Дельта - технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання штанг, які виконані у вигляді паралелограмного механізму, а перетворення рухів реалізується шляхом примусового обертання опорних шарнірів, змонтованих на нерухомому стаціонарному блоку (рис. 1.9).

Біглайд – технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного V-подібного з'єднання двох прямокутних пластин, а перетворення рухів реалізується шляхом використання додаткових кінематичних ланок з штангами змінної довжини, шарнірно з'єднаних з рухомим або нерухомим елементами механізму (рис. 1.10).

1.4. Існуючі конструкції обладнання з паралельною кінематикою

На сьогоднішній день у виробництві використовується робот-маніпулятор паралельної структури випущений компанією «Mitsubishi Electric», модель - RP-5AH (рис.1.11), Маніпулятор має невеликі розміри і призначений для переміщення або сортування деталей невеликих розмірів та ваги. Завдяки надвисокій швидкості переміщення робочого органу і при цьому великій точності позиціонування маніпулятор доцільно використовувати у мікроелектроніці.

Висока швидкість переміщення без втрат точності маніпулятора забезпечується значною мірою завдяки компоновці паралельної структури, що зменшує вагу робочих ланок та підвищує жорсткість механізму. При такій компоновці приводи маніпулятора розташовані стаціонарно на нерухомій основі і приводять в дію лише привідні ланки, звільнені від надмірної ваги, на відміну від маніпуляторів послідовної структури де приводи розташовані на рухомих ланках.

Також точність даного маніпулятора забезпечується завдяки прямому приводу, тобто привідні ланки маніпулятора приводяться в дію безпосередньо роторами приводів і жорстко скріплені з ними. Шарніри між ланками маніпулятора оснащені радіально-упорними кульковими підшипниками які забезпечують опір як осьовому так і радіальному навантаженню при повороті шарнірів. Шарніри постійно знаходяться в натягу і таким чином похибки викликані неточністю з'єднань зводяться фактично до нуля, відповідно і весь механізм маніпулятора також знаходиться у постійному натягу та позитивно впливає на точність позиціонування.

До недоліків маніпулятора можна віднести невеликий робочий простір, вузьку спеціалізацію застосування та велику вартість.

Даний маніпулятор представлений у трьох виконаннях, модель представлена на *рис 1.11*, є найбільшою. Максимальна навантажувальна здатність даної моделі обмежується вагою а 5кг, а робочий простір можна окреслити розмірами стандартного аркушу паперу форматом A4 (297x210мм).

Потенціал даного робота було значно розширено канадськими вченими [10], основною ідеєю яких стало збільшення відстані між приводами маніпулятора, що у значній мірі збільшило робочий простір робота.



Рис. 1.11 Робот-маніпулятор Mitsubishi Electric, модель - RP-5AH

Прототип що було виготовлено у Монреалі, Канада, отримав назву *DexTAR* (*Dexterous Twin-Arm Robot* – спритний робот з подвійною рукою, *рис. 1.12*).



Рис. 1.12 Прототип – DexTAR.

Добре відомо що робочий простір робота паралельної структури, як правило, менший, ніж у аналогічного за розмірами робота послідовної структури і поділяється на частини з відповідними особливостями. У промисловості існує потреба у роботах, здатних оптимально використовувати обмежений робочий простір, що характерно для роботів паралельної структури.

Грубо кажучи, особливістю у конфігурації робота паралельної структури, є жорсткість що різко змінюється. Більшість роботів паралельної структури мають дві основні особливості: Тип 1 (також відомі як серійні особливості) зміни при яких кінцевий орган втрачає один або кілька ступенів вільності, це здебільшого притаманне на кордонах робочого простору маніпулятора; Тип 2 особливості - при складній конфігурації маніпулятора, при яких приводи не здатні подолати силу і/або момент який діє на робочий орган. Коли робочий орган знаходяться у робочій

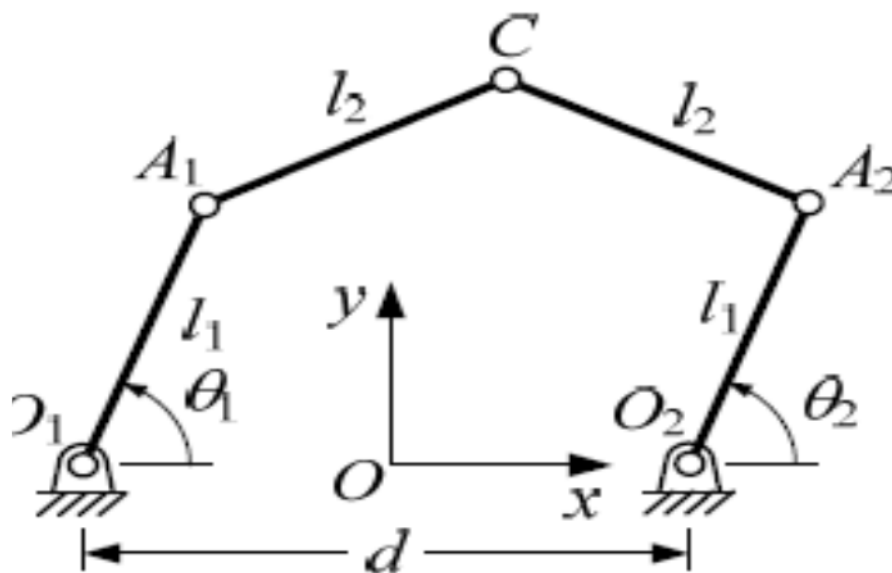


Рис. 1.13 Схема плоского маніпулятора, паралельної структури 2-DOF RRRRR.

зоні, розділяючи її на різні сегменти навантаження кінцевої ланки.

Традиційний підхід що використовується в промисловості є компроміс співвідношення робочого простір-траєкторії внаслідок оптимізації конструкції робота, що дозволить вилючити проблему тип 2. Інший типовий підхід, для позбавлення від проблеми Тип 2, всередині робочого простору, переміщення в

межах однієї ступені вільності. Однак навіть якщо в цій області момент лишається максимальним, залишиться менш як повний робочий простір.

Більш кращій варіант поліпшення використання робочого простору при проблемі тип 2, властивій маніпуляторам паралельної структури, використання надлишкових керуючих сигналів [5]. Тим не менш, це приносить до більшої складності контролю і додаткових витрат.

Якщо точність траєкторії є важливою, наприклад при обробці контурів, всі види проблем переміщення слід вилучити за допомогою одного з вище перелічених підходів. Однак, якщо важливим є лише дискретність позиціонування кінцевої ланки у певних точках траєкторії, наприклад отвори у матеріалі що обробляється, а сама траєкторія не є надто важливою, можливі декілька варіантів її прокладання. Складність полягає в тому, яким чином керувати управляючими ланками в залежності від особливостей розташування ланок механізму, з метою оптимального використання робочої зони.

Найбільш простий підхід для протистояння проблемі тип 2, є використання зовнішніх сил, таких як інерції. Це здається найліпшим підходом для оптимального управління робочими органами, але складність полягає у тому, що точність позиціонування втрачається при наближенні кінцевих ланок до паралельності. Виходячи з чого, придатність даного методу здебільшого виключається.

Маніпулятор паралельної структури, що має декілька робочих режимів (рішень зворотної кінематики), як правило, варіанти для різних режимів роботи.

Таким чином, це дозволяє дістатися до будь-якої точки у межах робочого простору (або принаймні у більшу його частину) без шкоди для точності та жорсткості, лише шляхом перемикання режимів роботи. Зміна режимів роботи передбачає проходження лише через особливість тип 1, яка легко вирішується за допомогою активної системи керування.

Розглянемо плоский маніпулятор паралельної структури, що спроектовано для дослідження ефективності застосування підходу перемикання режимів роботи. Цей

маніпулятор схожий на промисловий “double-SCARA” виготовлений «Mitsubishi Electric» (маніпулятор паралельної структури з двома ступенями вільності, також відомий як “five-bar”) для швидкої обробки матеріалів, і має назву DexTAR.

Для демонстрації можливостей маніпулятора DexTAR, було обрано операцію захоплення і переміщення у необхідне положення сталевих кульок діаметром 8мм. Тому кінцевим органом обрано присоску і мініатюрний пневматичний привід (AEVC від Festo) для її вертикального переміщення(у межах 10мм). Оскільки ланки маніпулятора мають вільно обертатися між собою, не можливе використання зовнішніх пневматичних трубок(одна для приводу, інша для присоски) тому, що вони б заплутувалися. Таким чином магістраль було проведено через чотири суглоба механізму.

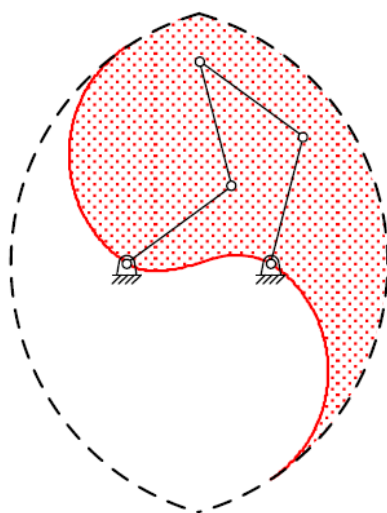
Робочий простір у декартовій системі координат. Як пояснюється у [10], плоский п’яти-шарнірний маніпулятор має чотири режими роботи, кожен з яких представляю одне рішення завдання зворотної кінематики. Для перемикання режимів роботи, маніпулятор повинен пройти через особливості тип 1.

На рис. 1.14 зображені чотири режими роботи для теоретичної конструкції [10]. Однак ці теоретичні результати не враховують механічні перешкоди реального робота.

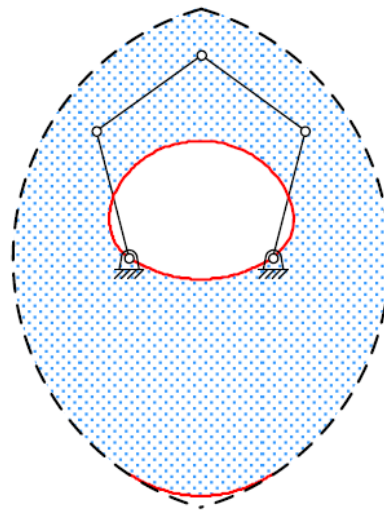
Для прототипу *DexTAR*, є тільки два випадки механічних перешкод, які вже було згадано. Перший є зіткнення двох привідних ланок між собою, а другий це обмеження кута між двома веденими ланками, через проходження трубки для вакуумної присоски. Для знаходження всіх можливих механічних впливів, було проведено дискретизацію у активних суглобах механізму. Кожному приводу присвоєно значення кутів θ_1 та θ_2 , та розраховано відстань між O_1A_1 та O_2A_2 (Рис. 1.13). Оскільки ширина плеча складає 38мм, а безпечний зазор складає 2мм, відстань між O_1A_1 та O_2A_2 складе 40мм, щоб гарантувати безперешкодне переміщення. Крім того кут A_2CA_1 має бути більше 15° .

В результаті активний спільний простір фактичного прототипу маніпулятора показаного на рис. 1.15. Зона де виникають механічні перешкоди закреслена

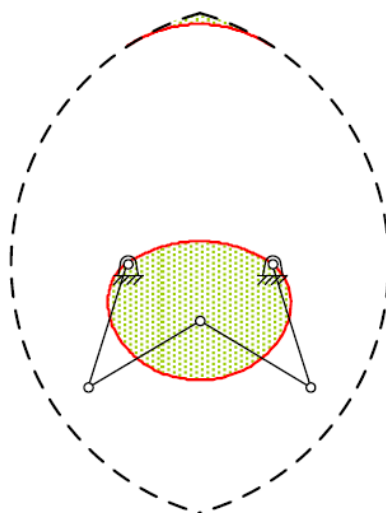
чорним кольором. Таким чином активний робочий простір зображується одним з чотирьох малюнків у відповідних кольорах (тобто за винятком білої зони, чорної пунктирної лінії та червоної кривої лінії (яка відповідає особливості тип 2)).



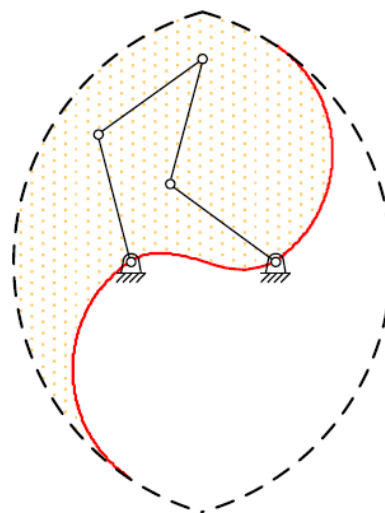
(а) Режим роботи $-+$



(б) Режим роботи $++$



(в) Режим роботи $--$



(г) Режим роботи $+ -$

Рис. 1.14 Чотири можливих режими роботи маніпулятора.

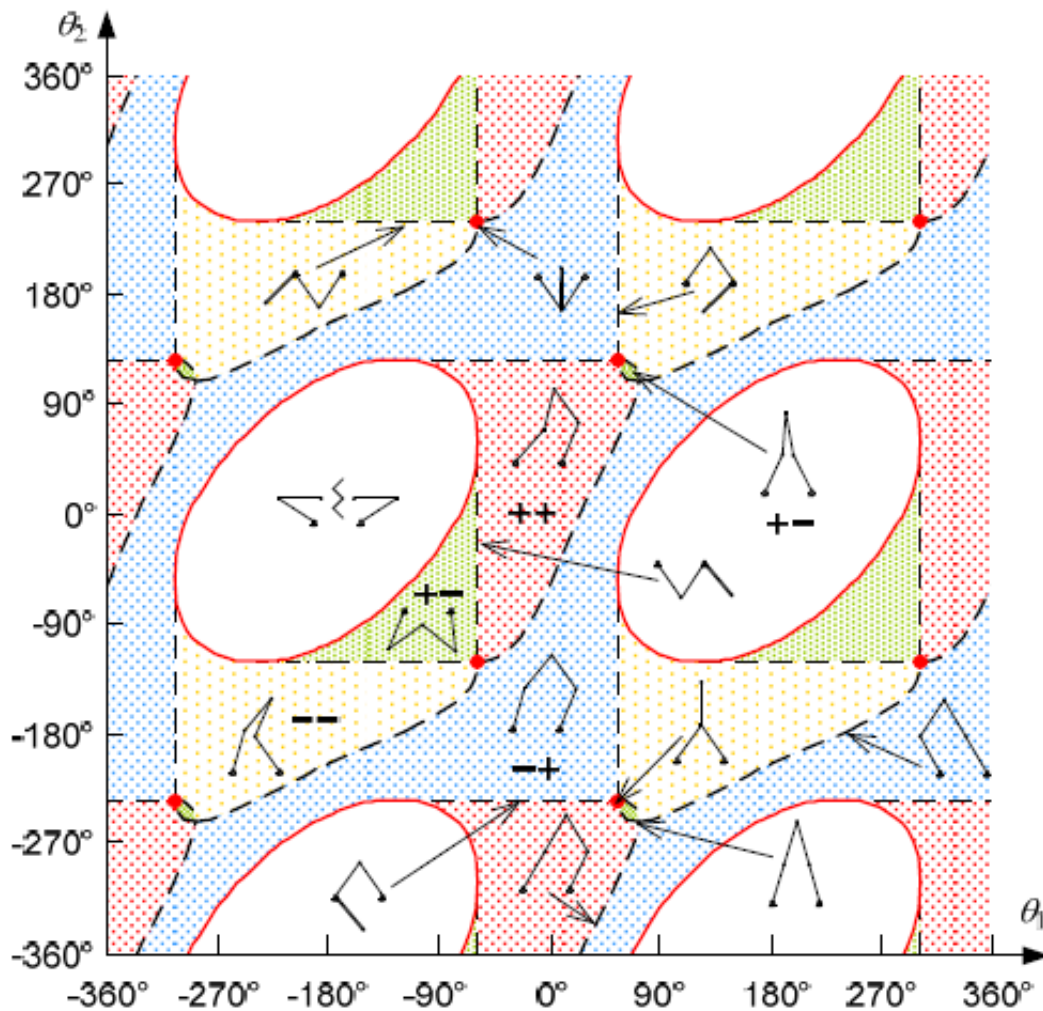


Рис. 1.15 Можливі переешкоди у роботі зумовлені особливостями тип 2 (червоні лінії) та тип 1 (чорні пунктирні лінії), без урахування механічних переешкод.

Хоча можливість вибору між режимами роботи що буде використано для прокладання траєкторії і контролю маніпулятора, зроблено основний акцент на переміщення металевих кульок у відповідні положення без особливого контролю за траєкторією. У теорії недосяжною залишаються лише смуга вздовж кордонів робочої зони.

1.5. Мета і задачі роботи.

Проаналізувавши існуючі зразки плоских маніпуляторів паралельної структури з важільними приводами, можемо стверджувати що перспектива втілення у промислове виробництво прототипу DexTAR є доволі виправдана. Даний варіант виконання є значною мірою вдосконалений, у порівнянні з

індустріальним маніпулятором – RP-5АН. Перспективи такого маніпулятора можуть бути розширенні при доопрацюванні конструктивних особливостей, на місці розташування робочого органу доцільним може бути встановлення поворотного механізму, що надасть роботу додатковий ступінь вільності. Але при цьому прототип DexTAR не позбавлений певних вад, яких необхідно позбутися, та деякі показники що можуть бути поліпшені. До таких показників можна віднести зменшення динамічних навантажень на приводах та покращення кінематичних характеристик механізму без втрати корисного робочого простору. Шляхи виконання даної задачі можемо визначити за такою послідовністю:

- розробка кінематичної схеми маніпулятора;
- аналіз прямої та зворотної кінематичних залежностей;
- складання схематичної моделі маніпулятора та симуляція його роботи з різними геометричними параметрами для аналізу кінематичних та динамічних показників;
- Визначення раціональних геометричних параметрів які забезпечують підвищення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами;
- втілення отриманих раціональних геометричних параметрів у повноцінній тривимірній моделі та симуляція її роботи шляхом переміщення робочого органу по типовій траєкторії.

Елементи наукової новизни:

- визначені кінематичні залежності між положенням робочого органу та кутами повороту приводів маніпулятора;
- визначені раціональні геометричні параметри які забезпечують підвищення кінематичних характеристик плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами.

Практична цінність:

- встановлені силові показники приводів маніпулятора при виконанні типових траєкторій переміщення робочого органу.

2. СТРУКТУРА І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЛОСКОГО МАНІПУЛЯТОРА ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ВАЖІЛЬНИМИ ПРИВОДАМИ.

2.1. Кінематичні особливості плоского маніпулятора.

Плоский п'ятишарнірний маніпулятор, схематичне зображення якого представлено на *рис 2.1*, здебільшого має призначення по захопленню та переміщенню деталей або їх сортування. Маючи велику жорсткість системи здатний дуже швидко здійснювати переміщення без суттєвих втрат точності позиціонування.

Переміщення робочого органу маніпулятора здійснюється від електродвигунів розташованих у точках S_1 та S_2 (*Рис 2.1.*), ротори яких жорстко з'єднані з привідними ланками A_1 та A_2 , які в свою чергу шарнірами поєднуються з послідовними ланками B_1 та B_2 , що об'єднані спільним шарніром у місці встановлення виконавчого органу у точці P .

Як пояснюється у [10], плоский п'ятишарнірний маніпулятор має чотири режими роботи (*Рис. 2.2*), кожен з яких представляє собою одне рішення завдання зворотної кінематики.

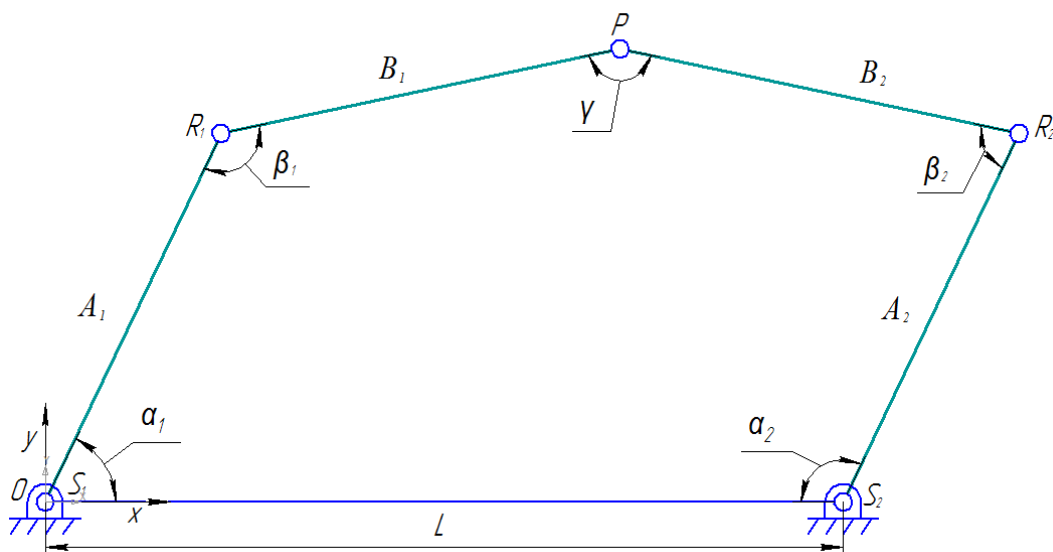


Рис. 2.1. Кінематична схема маніпулятора.

На *рис 1.14.* можна побачити чотири теоретичні режими роботи маніпулятора, де закреслений простір є досяжним у відповідному режимі роботи. Проте дані схеми є лише теоретичними і не враховують механічні перешкоди.

2.2. Пряма задача кінематики.

Виходячи з кінематичної схеми механізму (*Рис. 2.1*), відомих розмірів та кутів повороту приводів необхідно визначити координати робочого органу.

Таким чином з довжини ланок (A_1, A_2) механізму та кутів (α_1 та α_2) повороту електродвигунів, за прямокутним трикутником знаходимо значення l_1 та l_2 , після чого C_1 та C_2 (*Рис. 2.2.*).

$$l_1 = A_1 \cdot \cos(\alpha_1 \cdot \text{deg}) \quad l_2 = A_2 \cdot \cos(\alpha_2 \cdot \text{deg})$$

$$C_1 = A_1 \cdot \sin(\alpha_1 \cdot \text{deg}) \quad C_2 = A_2 \cdot \sin(\alpha_2 \cdot \text{deg})$$

Щоб одержати величину відрізка l , скористаємось одним з чотирьох варіантів формули, в залежності від кутів α_1 та α_2 .

$$l = L - l_1 + l_2 - \text{якщо } \alpha_1 < 90^0, \alpha_2 > 90^0.$$

$$l = L - l_1 - l_2 - \text{якщо } \alpha_1 < 90^0, \alpha_2 < 90^0.$$

$$l = L + l_1 - l_2 - \text{якщо } \alpha_1 > 90^0, \alpha_2 < 90^0.$$

$$l = L + l_1 + l_2 - \text{якщо } \alpha_1 > 90^0, \alpha_2 > 90^0.$$

З різниці між C_1 та C_2 , отримуємо значення C_3 .

$$C_3 = |C_1 - C_2|$$

З прямокутного трикутника R_1R_2P , одержуємо величину відрізка D ,

$$D = \sqrt{l^2 + C_3^2}$$

після чого можна визначити кут γ .

$$\gamma = \left(\frac{\arccos \left(\frac{B_1^2 + B_2^2 - D^2}{2 \cdot B_1 \cdot B_2} \right)}{\text{deg}} \right)$$

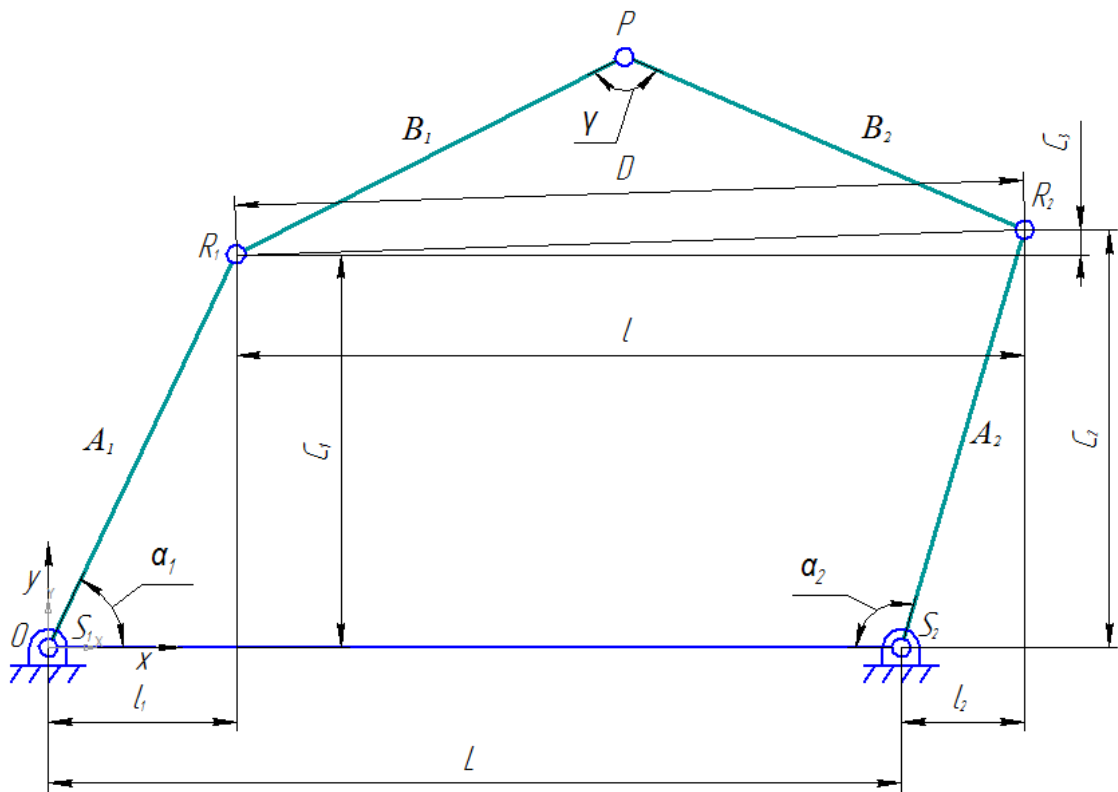


Рис 2.2. Схема першого етапу розрахунку прямої задачі кінематики.

За тим же трикутником R_1R_2P , знаходимо кут β_{12} (Рис 2.3.)

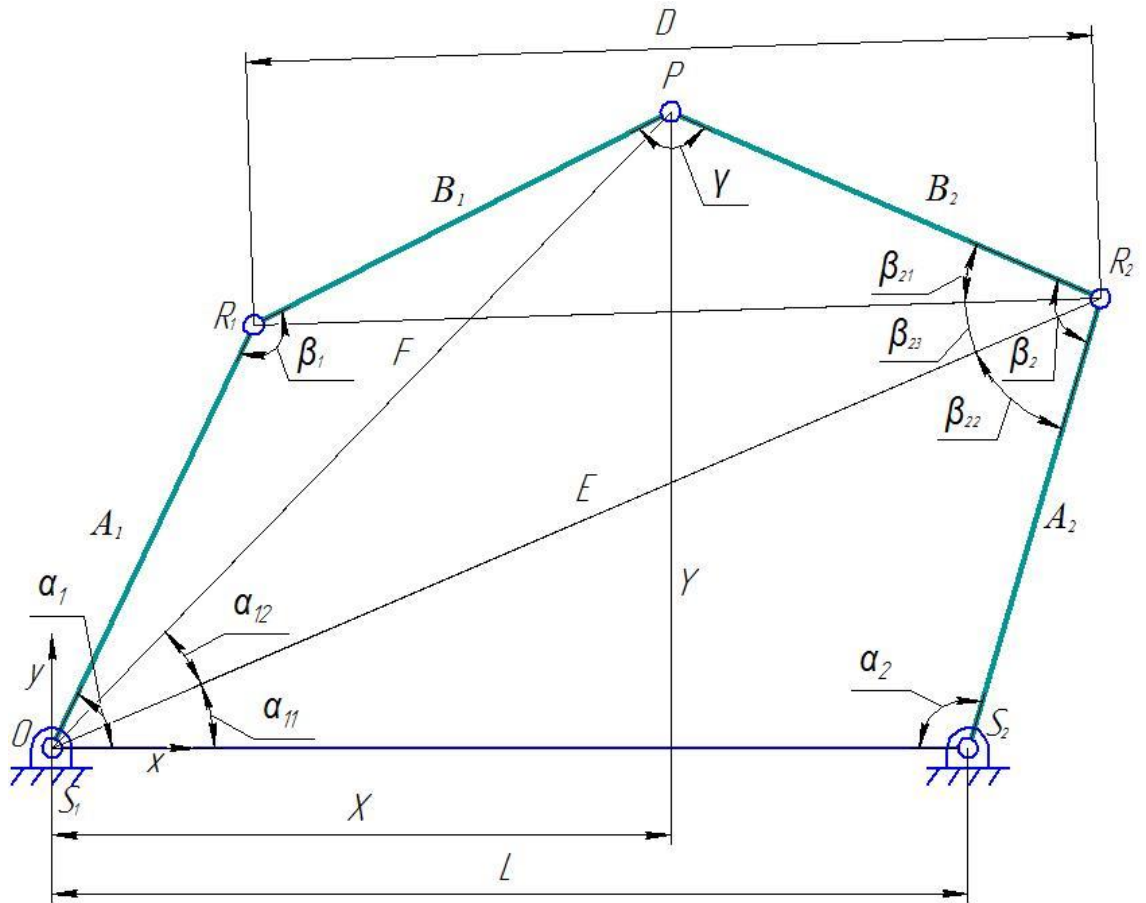


Рис 2.3. Схема другого етапу розрахунку прямої задачі кінематики.

$$\beta_{21} = \left(\frac{\arccos\left(\frac{D^2 + B_2^2 - B_1^2}{2 \cdot D \cdot B_2}\right)}{\text{deg}} \right)$$

З трикутника $S_1S_2R_2$ визначаємо кут α_{11} ,

$$\alpha_{11} = \frac{\arctg\left(\frac{1}{\frac{\frac{L}{A_2} - \cos(\alpha_2 \cdot \text{deg})}{\sin(\alpha_2 \cdot \text{deg})}}\right)}{\text{deg}}$$

відрізок E

$$E = A_2 \cdot \frac{\sin(\alpha_2 \cdot \text{deg})}{\sin(\alpha_{11} \cdot \text{deg})}$$

та кут β_{22} віднімаючи вже відомі α_{11} і α_2 .

$$\beta_{22} = 180 - \alpha_{11} - \alpha_2$$

З трикутника $S_1R_1R_2$ знаходимо кут β_{23} .

$$\beta_{23} = \left(\frac{\arccos\left(\frac{D^2 + E^2 - A_1^2}{2 \cdot D \cdot E}\right)}{\text{deg}} \right)$$

За трикутника S_1PR_2 визначаємо величину відрізка F , використовуючи одну з формул, в залежності від величини кута γ .

$$F = \sqrt{E^2 + B_2^2 - 2 \cdot E \cdot B_2 \cdot \cos[(\beta_{21} + \beta_{23}) \cdot \text{deg}]} - \text{при } \gamma < 180^0$$

$$F = \sqrt{E^2 + B_2^2 - 2 \cdot E \cdot B_2 \cdot \cos[(\beta_{21} - \beta_{23}) \cdot \text{deg}]} - \text{при } \gamma > 180^0$$

Після чого знаходимо кут α_{12} , за трикутником $S_1S_2R_2$,

$$\alpha_{12} = \left(\frac{\arccos\left(\frac{F^2 + E^2 - B_2^2}{2 \cdot E \cdot F}\right)}{\text{deg}} \right)$$

що дозволить отримати значення X та Y використовуючи формули:

$$X = F \cdot \cos[(\alpha_{11} + \alpha_{12}) \cdot \text{deg}]$$

$$Y = F \cdot \sin[(\alpha_{11} + \alpha_{12}) \cdot \text{deg}]$$

2.3. Зворотна задача кінематики.

Зворотна задача кінематики плоского маніпулятора паралельної структури з важільним приводом полягає у визначенні кутів повороту приводів маніпулятора (α_1 та α_2), при відомих координатах розташування виконавчого органу – X та Y та значенні довжини ланок – A_1 , A_2 , B_1 та B_2 і відстані між приводами – L (Рис 2.4).

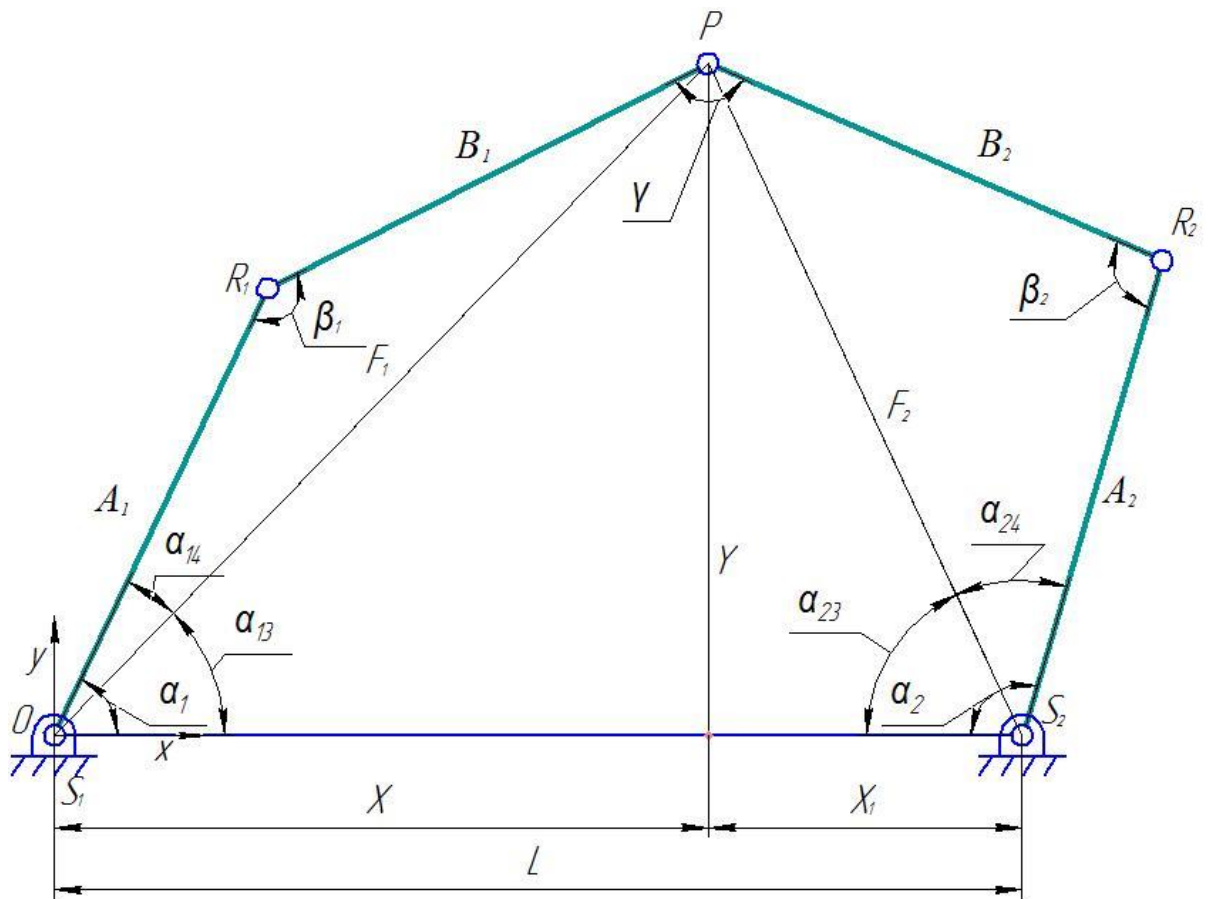


Рис 2.4. Схема розрахунку зворотної задачі кінематики.

Визначаємо X_1

$$X_1 = L - X$$

З утворених прямокутних трикутників знаходимо довжини відрізків F_1 та F_2 .

$$F_1 = \sqrt{Y^2 + X^2}$$

$$F_2 = \sqrt{Y^2 + X_1^2}$$

Після чого використовуючи відомі значення довжини відрізків одержуємо кути α_{13} та α_{23} .

$$\alpha_{13} = \frac{\arctg\left(\frac{y}{x}\right)}{\deg}$$

$$\alpha_{23} = \frac{\arctg\left(\frac{y}{x_1}\right)}{\deg}$$

При відомих значеннях довжини відрізків А, В, F, з відповідним індексом, можемо визначити кути α_{14} та α_{24} .

$$\alpha_{14} = \frac{\arccos\left(\frac{A_1^2 + F^2 - B_1^2}{2 \cdot A_1 \cdot F_1}\right)}{\deg}$$

$$\alpha_{24} = \frac{\arccos\left(\frac{A_2^2 + F_1^2 - B_2^2}{2 \cdot A_2 \cdot F_2}\right)}{\deg}$$

Тепер в залежності від режиму роботи визначаємо кути α_1 та α_2 .

$$\alpha_1 = \alpha_{13} + \alpha_{14} \qquad \alpha_2 = \alpha_{23} + \alpha_{24}$$

$$\alpha_1 = \alpha_{13} - \alpha_{14} \qquad \alpha_2 = \alpha_{23} - \alpha_{24}$$

Об'єднавши даний алгоритм у два відповідних рівняння, одержуємо такі вирази:

$$q_1(X, Y) = \frac{\arctg\left(\frac{Y}{X}\right)}{\deg} + \frac{\arccos\left(\frac{A_1^2 + \left(\sqrt{X^2 + Y^2}\right)^2 - B_1^2}{2 \cdot A_1 \cdot \sqrt{X^2 + Y^2}}\right)}{\deg}$$

$$q_2(X, Y) = \frac{\arctg\left(\frac{Y}{L - X}\right)}{\deg} + \frac{\arccos\left(\frac{A_2^2 + \left(\sqrt{(L - X)^2 + Y^2}\right)^2 - B_2^2}{2 \cdot A_2 \cdot \left(\sqrt{(L - X)^2 + Y^2}\right)}\right)}{\deg}$$

*при режимі роботи «++»

2.3. Аналіз кінематичних залежностей.

Для дослідження кінематичних залежностей механізму складаємо математичну модель маніпулятора, за основні розміри приймаємо базовий варіант прототипу викладеного у [10]. Таким чином:

- Відстань між приводами $L=275\text{мм}$.
- Довжини ланок – A_1, A_2, B_1, B_2 – рівні між собою і складають 230мм .

Прикладом переміщення обираємо кругову інтерполяцію робочого органу у режимі роботи – «++» по радіусу $R=80\text{мм}$. Центром описуваного кола обираємо координати $X=137.5$, $Y=300\text{мм}$.

Після чого будуємо графіки залежності переміщення виконавчого органу по координатам X та Y від часу (Рис 2.5).

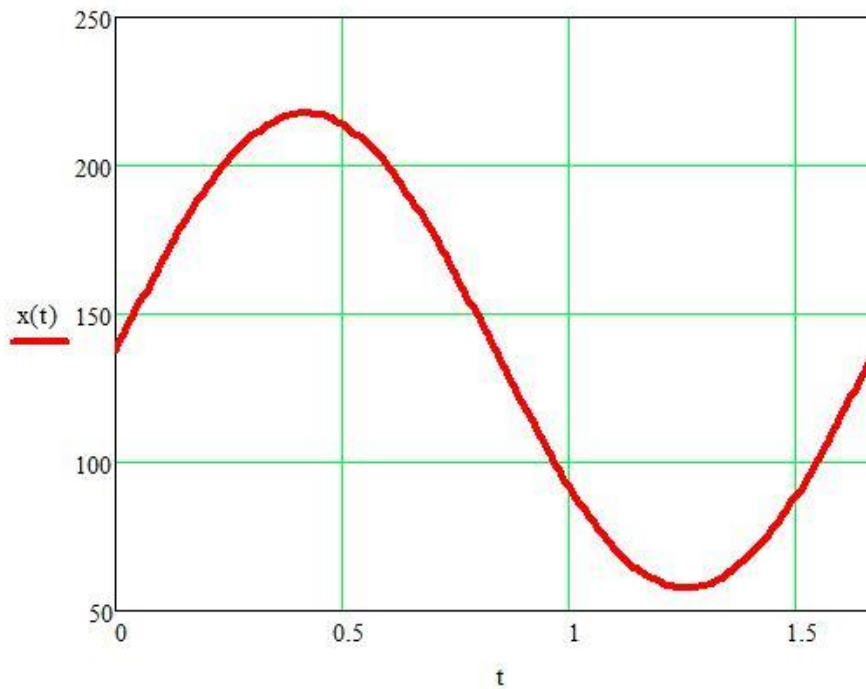


Рис 2.5 (а) Графіки залежності переміщення виконавчого органу по координатам X від часу – t ..

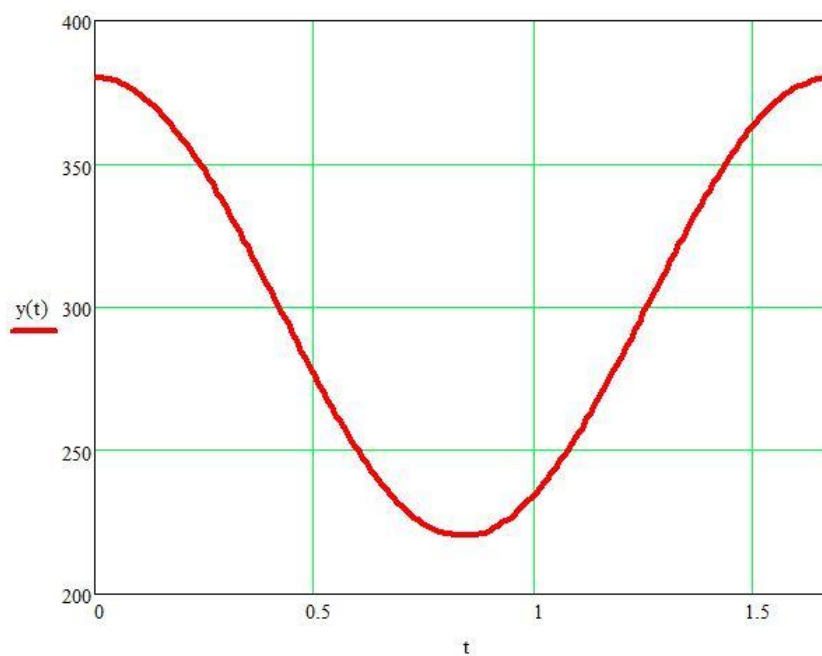


Рис 2.5 (б) Графіки залежності переміщення виконавчого органу по координатам Y від часу – t .

Також з графіка залежності координат X від Y протягом часу – t (Рис 2.6), можемо побачити траєкторію переміщення робочого органу маніпулятора у координатній площині.

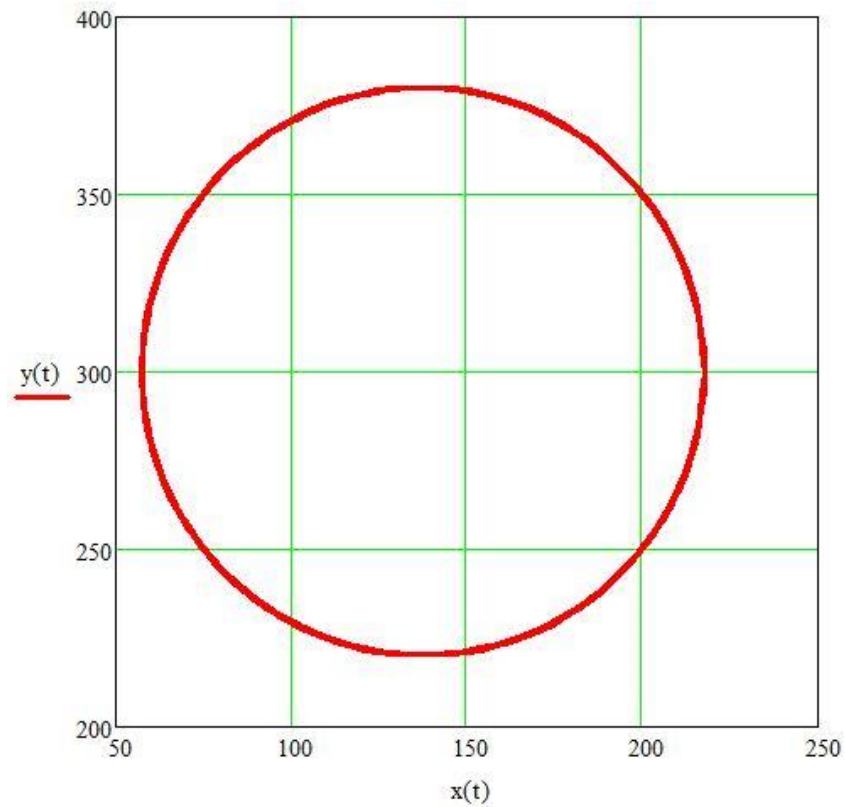


Рис. 2.6 Графік залежності $X(t)$ від $Y(t)$ (траєкторія переміщення робочого органу протягом визначеного часу).

При переміщенні виконавчого органу маніпулятора, по визначеній вище траєкторії, спостерігаємо таку залежність кутів повороту приводів маніпулятора протягом визначеного часу (Рис 2.7).

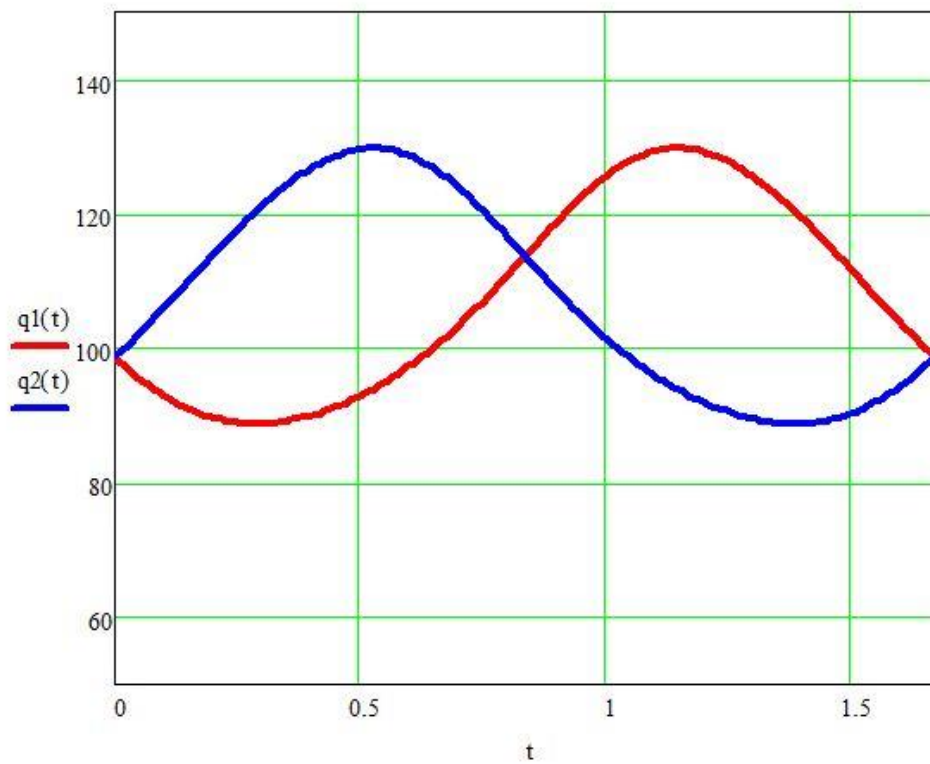


Рис. 2.7 Графік залежності кутів повороту приводів(q_1 та q_2) маніпулятора за час t , при круговій інтерполяції.

Після чого складемо модель переміщення робочого органу маніпулятора по прямій з постійною швидкістю, траєкторію переміщення зображено на *рис. 2.8*.

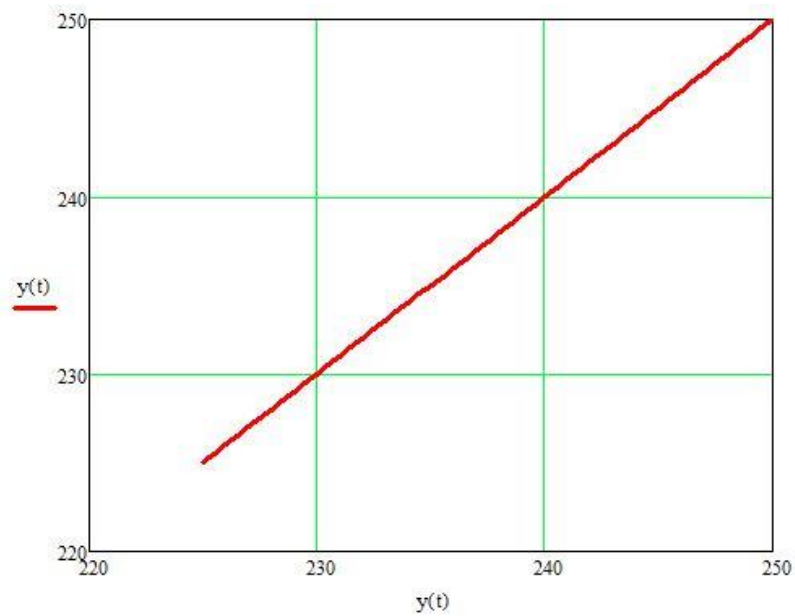


Рис. 2.8. Траєкторія переміщення робочого органу по прямій.

При цьому можна побачити залежність переміщення робочого органу маніпулятора по координатам від часу переміщення (рис. 2.9)

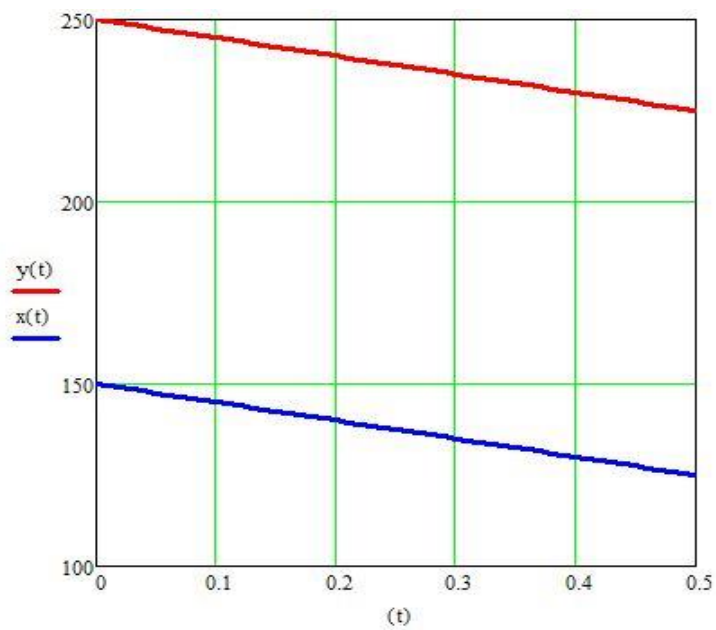


Рис 2.9. залежність переміщення робочого органу по координатам x , y протягом часу.

Залежність кутів повороту приводів маніпулятора від часу t , зображено на рис 2.10.

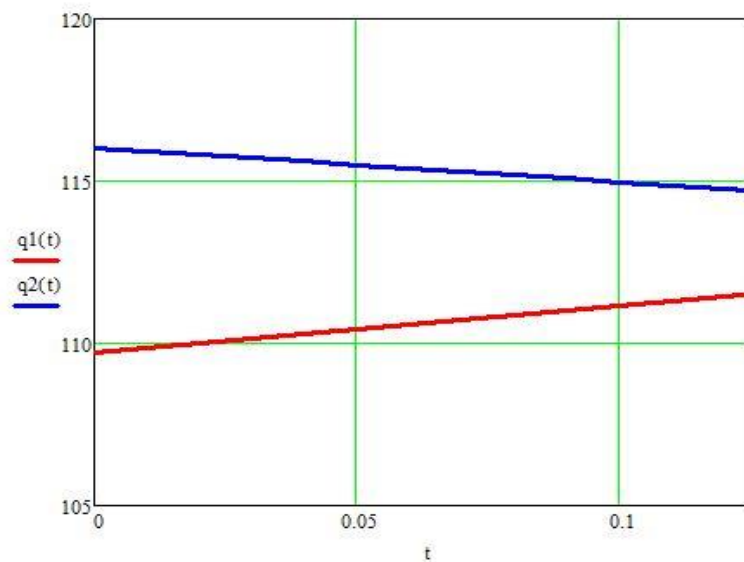


Рис. 2.10. Величина кута повороту приводів маніпулятора протягом часу лінійного переміщення робочого органу.

2.4. Визначення оптимальних кінематичних параметрів маніпулятора.

Для визначення оптимальних параметрів механізму проводимо ряд дослідів у програмному середовищі *SolidWorks Moution*. Склавши спрощений, схематичний варіант маніпулятора з відповідними довжинами ланок, відстані між приводами, присвоюємо умовну вагу та центри мас ланкам механізму. Завантажуємо програму переміщення кожного з приводів, заздалегідь складену у середовищі *MathCad* (програма складає ряд значень положень кожного з приводів маніпулятора, які відповідають круговому переміщенню робочого органу по радіусу 60мм, при режимі роботи «++»). Після розрахунку переміщення маніпулятора маємо можливість побудови цілого ряду графіків залежностей, зокрема: графік величини крутного моменту на приводах механізму (Рис. 2.9 а,б), графік величини повороту приводі (Рис. 2.9 в,г), графік швидкості повороту(Рис 2.9 д,е) та графік прискорення (Рис. 2.9 ж,з) протягом визначеного часу,

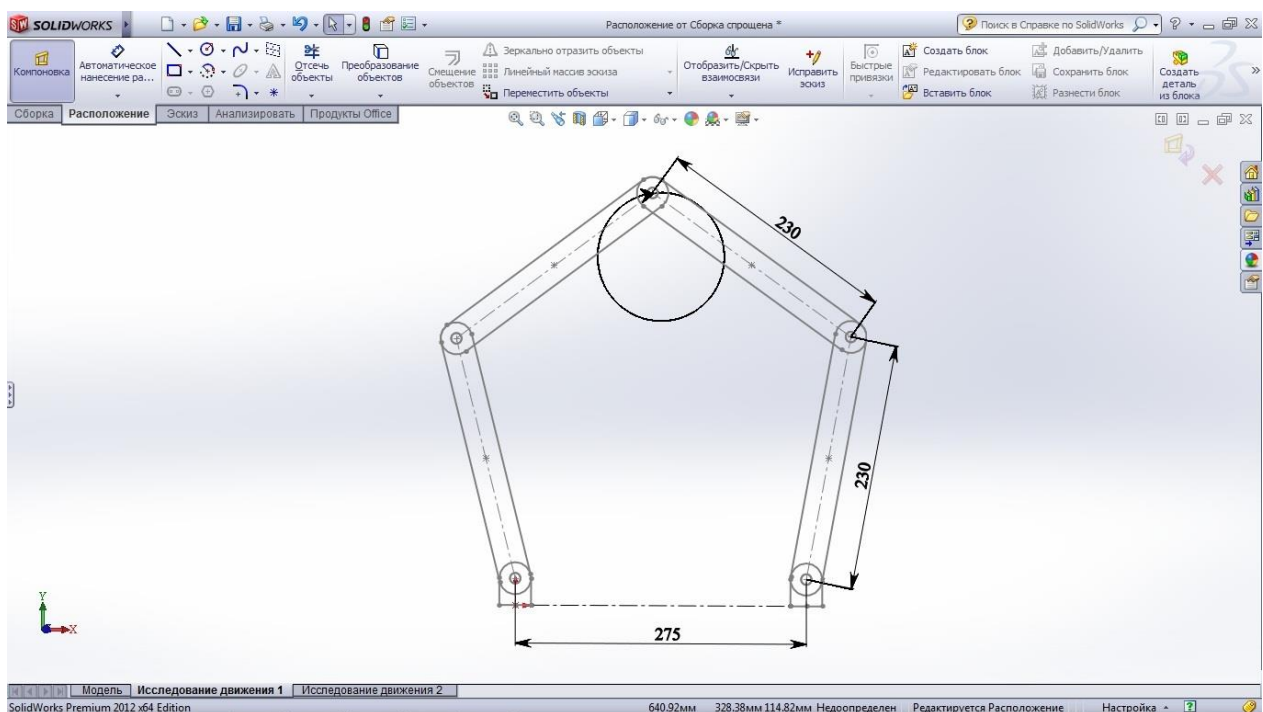


Рис. 2.8. Схематична симуляція переміщення механізму.

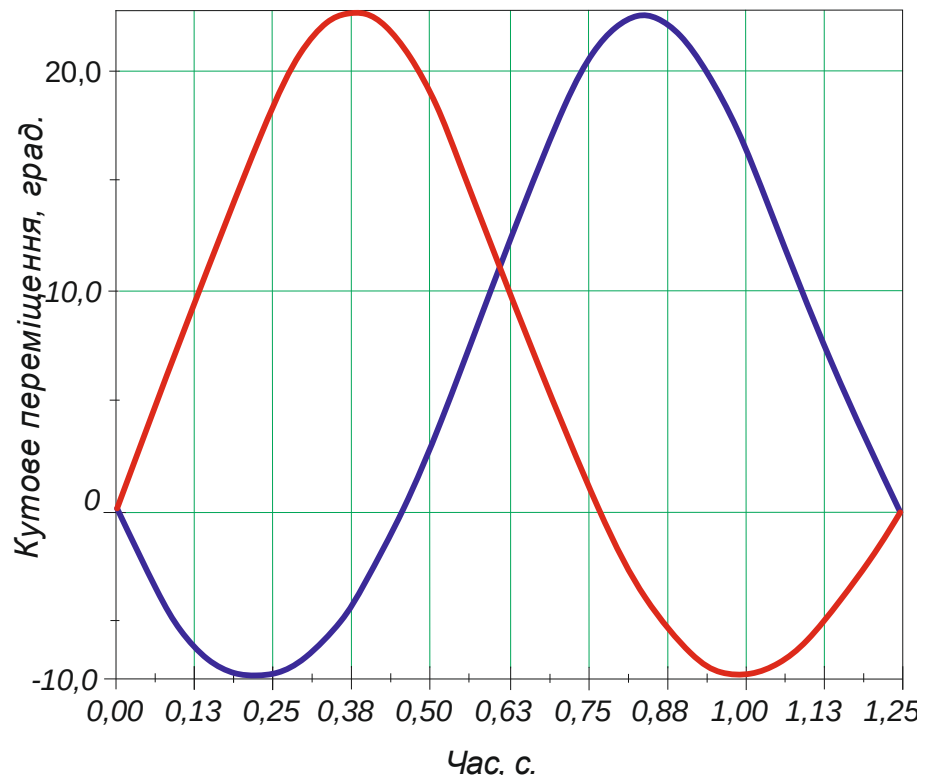


Рис. 2.9. а. Графік величини крутного моменту на приводах маніпулятора протягом часу t .

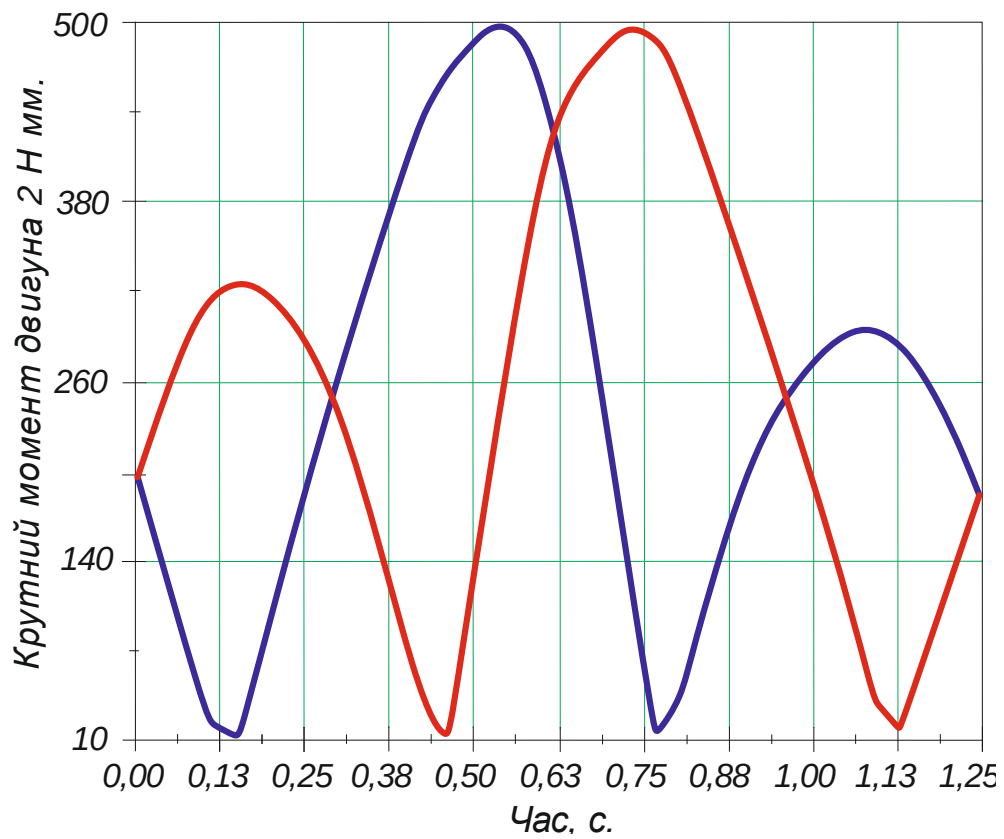


Рис 2.9 б. Графік величини повороту приводів протягом часу t .

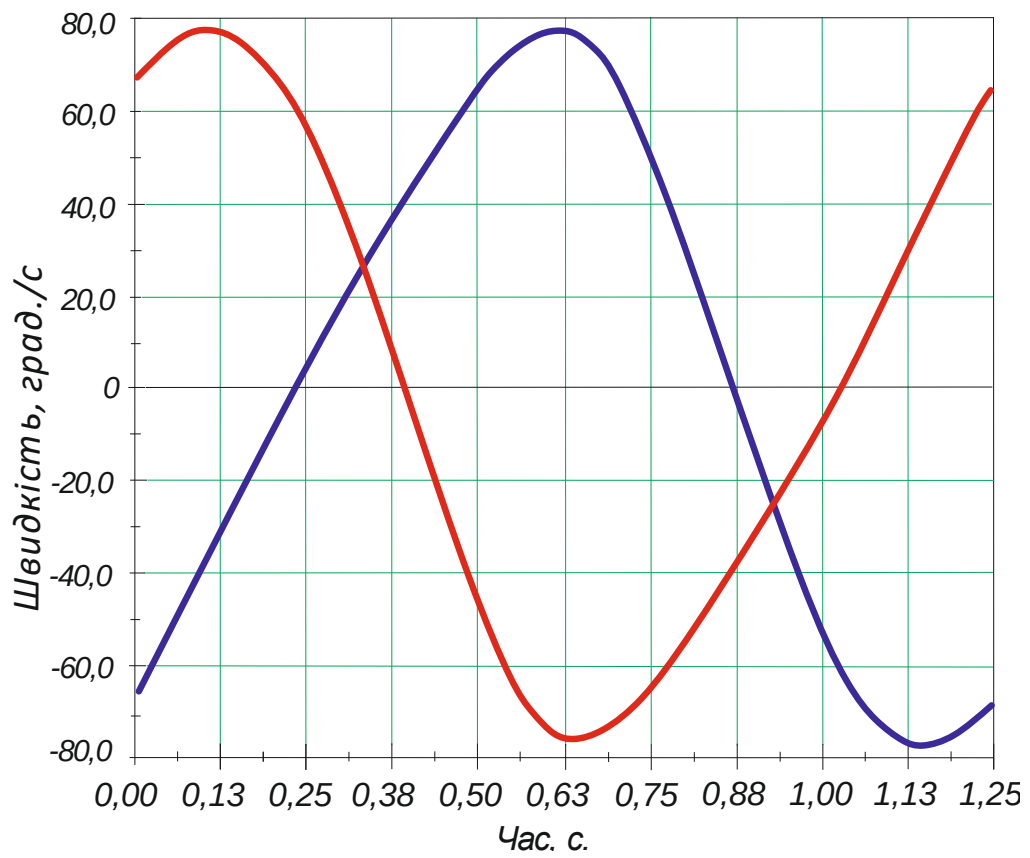


Рис 2.9 в. Графік швидкості приводів протягом часу t

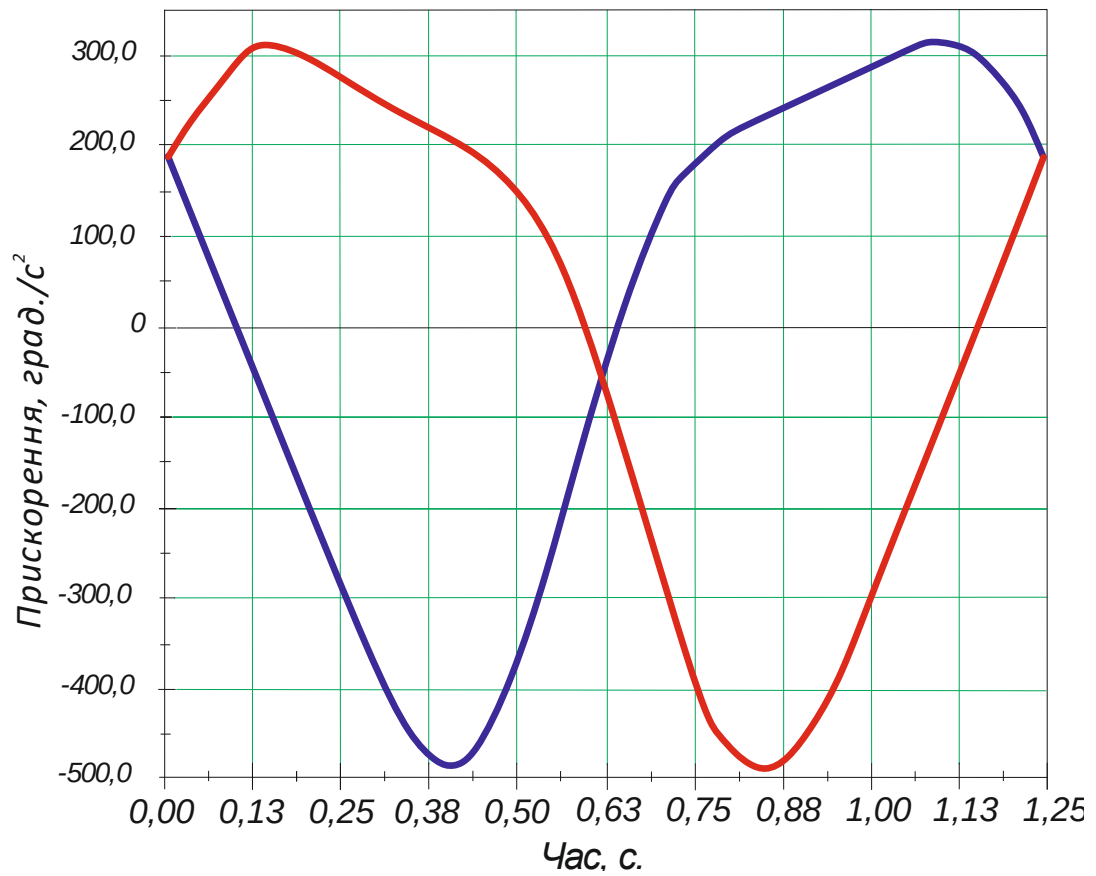


Рис.2.9 г. Прискорення приводів в залежності від часу.

Проводимо три етапи таких дослідів: в першому змінюємо величину відстані між приводами маніпулятора, в другому змінюємо довжину привідної ланки і у третьому змінюємо довжину ведених ланок механізму, при чому, у кожному наступному етапі величина що змінювалася у попередньому, приймається вже найбільш оптимальна. По кожному досліді за графіками визначаємо найбільші та найменші показники та отримані дані зводимо у відповідні таблиці по кожному етапу. За отриманими таблицями будуємо графіки що наочно відображають залежність відповідного параметру від змінюваної величини.

Таблиця 2.1

Перший етап дослідів – зміна відстані між приводами маніпулятора.

Параметри	Одиниці вимір.	Досл. 1	Досл. 2	Досл.3
Відстань між приводами	мм	275	300	250
Довжина привідних ланок	мм	230	230	230
Довжина ведених ланок	мм	230	230	230
Крутний момент	Н·мм	501,885	551,77	476,217
Переміщення min.	град	-7,9	-8,18	-7,65
Переміщення max.	град	22,93	22,23	22,58
Величина переміщення	град	30,83	30,41	30,23
Швидкість від'ємна	град/с	-77,42	-78,2	-76,74
Швидкість	град/с	77,42	76,76	78,09
Прискорення від'ємне	град/с ²	-486,09	-481,8	-489,79
Прискорення	град/с ²	316,03	326,22	308,28

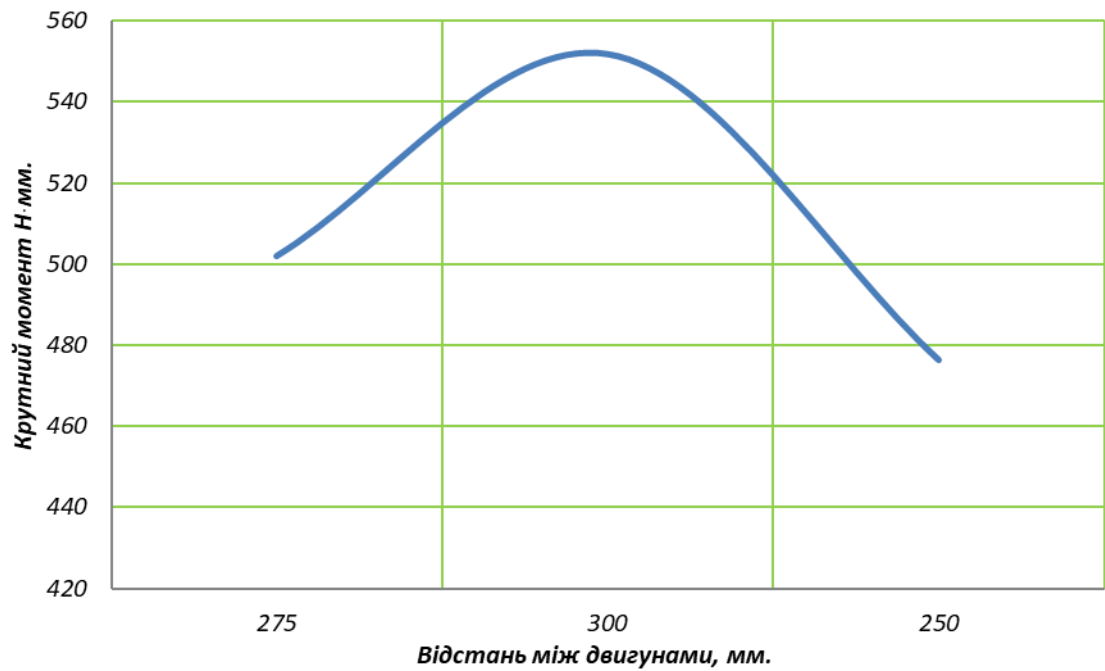


Рис. 2.10. Графік залежності крутного моменту на приводах від відстані між ними.

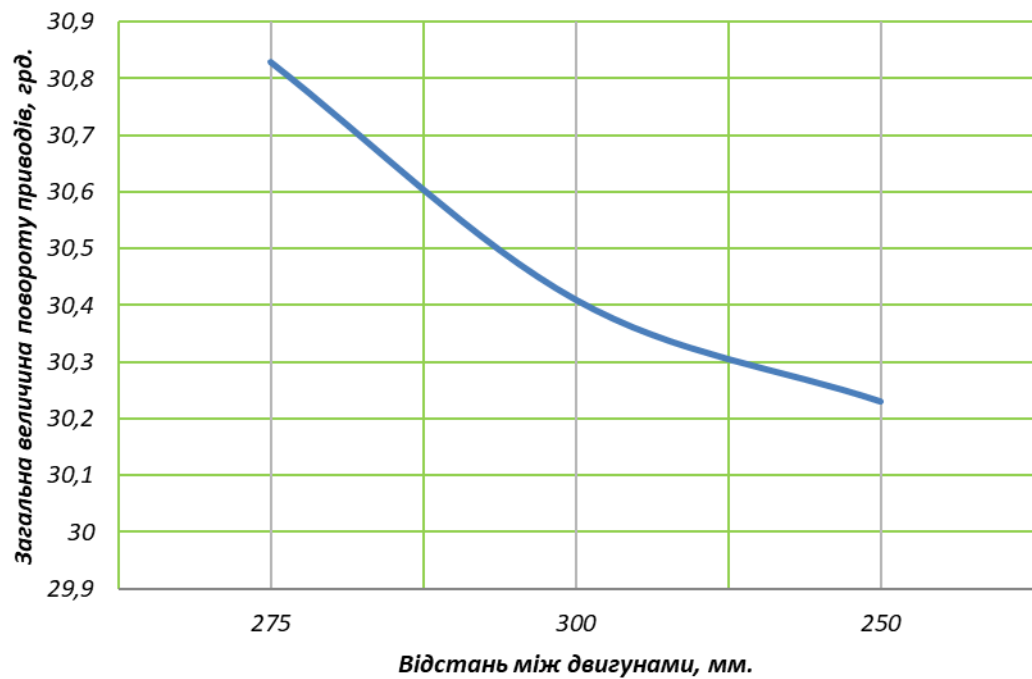


Рис.2.11 Графік залежності величини повороту приводів від відстані між ними.

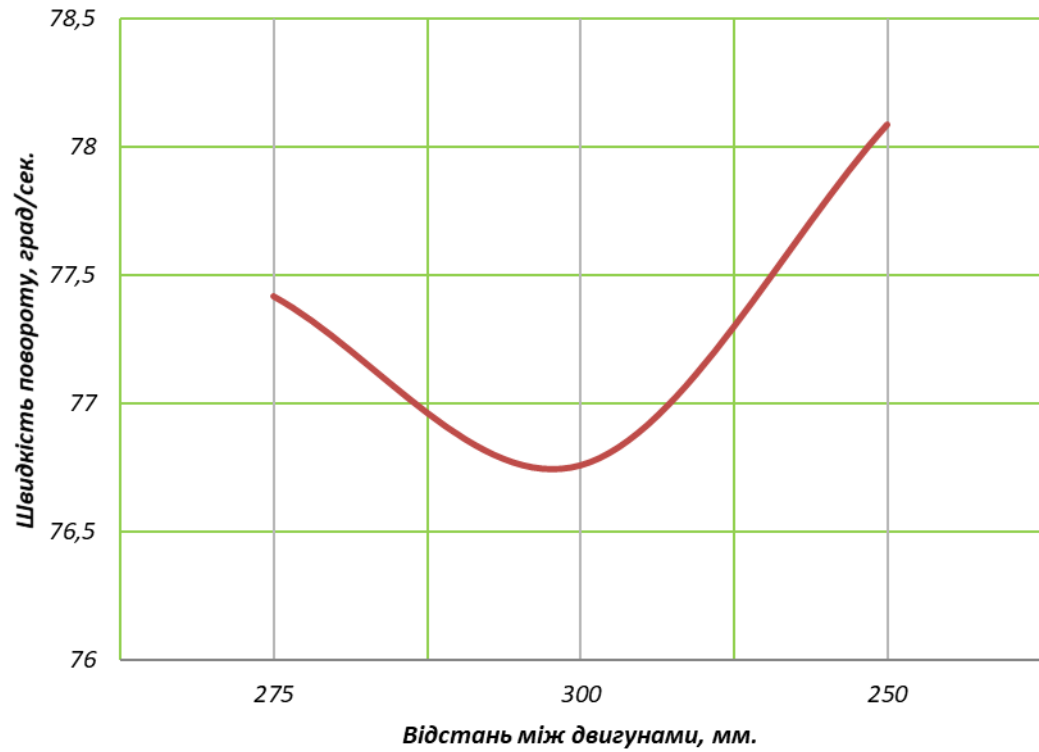
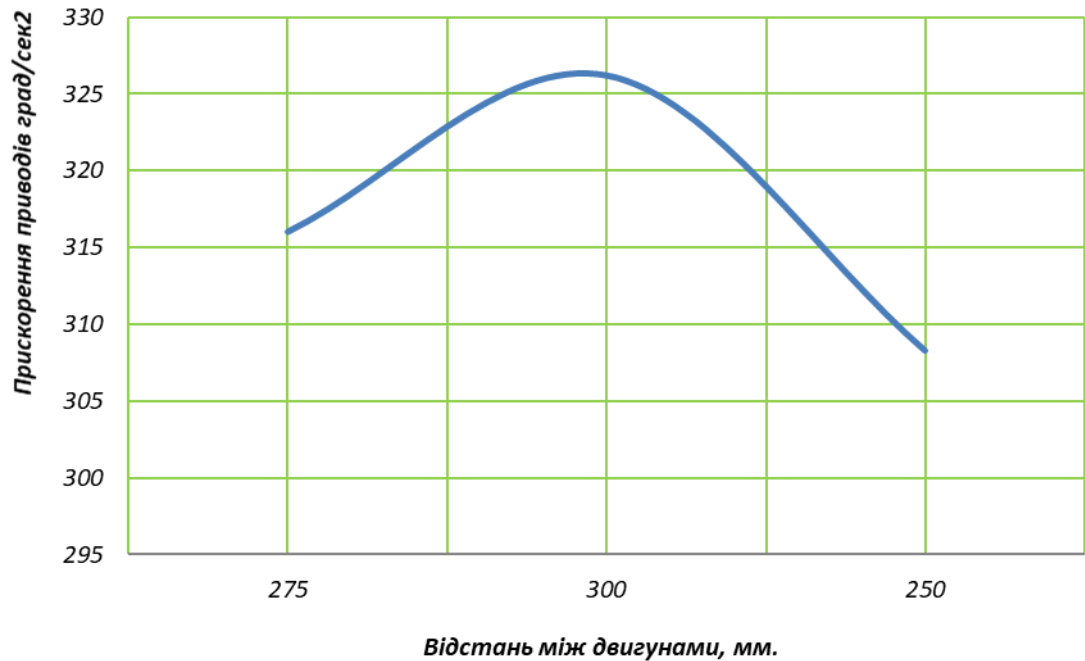


Рис. 2.12. Графік залежності швидкості повороту приводів від відстані між ними.



2.13. Графік залежності прискорення приводів від відстані між ними.

Провівши перший етап дослідів спостерігається тенденція зменшення крутного моменту при зменшенні відстані між приводами маніпулятора. Також спостерігаємо

зменшення величини повороту, зменшення прискорення, проте збільшення швидкості приводів механізму, таким чином за оптимальний варіант приймаємо відстань між приводами рівною 250мм. Та використовуємо це значення для подальших дослідів і переходимо до другого етапу.

Результати другого етапу дослідів зі зміною довжини привідної ланки зводимо до таблиці 2.2, за якою будуємо графіки залежності Рис. 2.14; 2.15; 2.16; 2.17.

Таблиця 2.2.

Другий етап дослідів – зміна довжини привідних ланок маніпулятора.

Параметри	Одиниці вимір.	Досл. 1	Досл. 2	Досл.3
Довжина привідних ланок	мм	220	210	200
Відстань між приводами	мм	250	250	250
Довжина ведених ланок	мм	230	230	230
Крутний момент	Н·мм	437	412	393
Переміщення min.	Град	-7,45	-7,26	-7,11
Переміщення max.	Град	24,31	26,26	28,52
Величина переміщення	Град	31,76	33,52	35,63
Швидкість від'ємна	град/с	-81,14	-86,23	-92,55
Швидкість	град/с	80,7	83,66	87,08
Прискорення від'ємне	град/с ²	-508,05	-528	-550,81
Прискорення	град/с ²	332,51	374,37	422,48

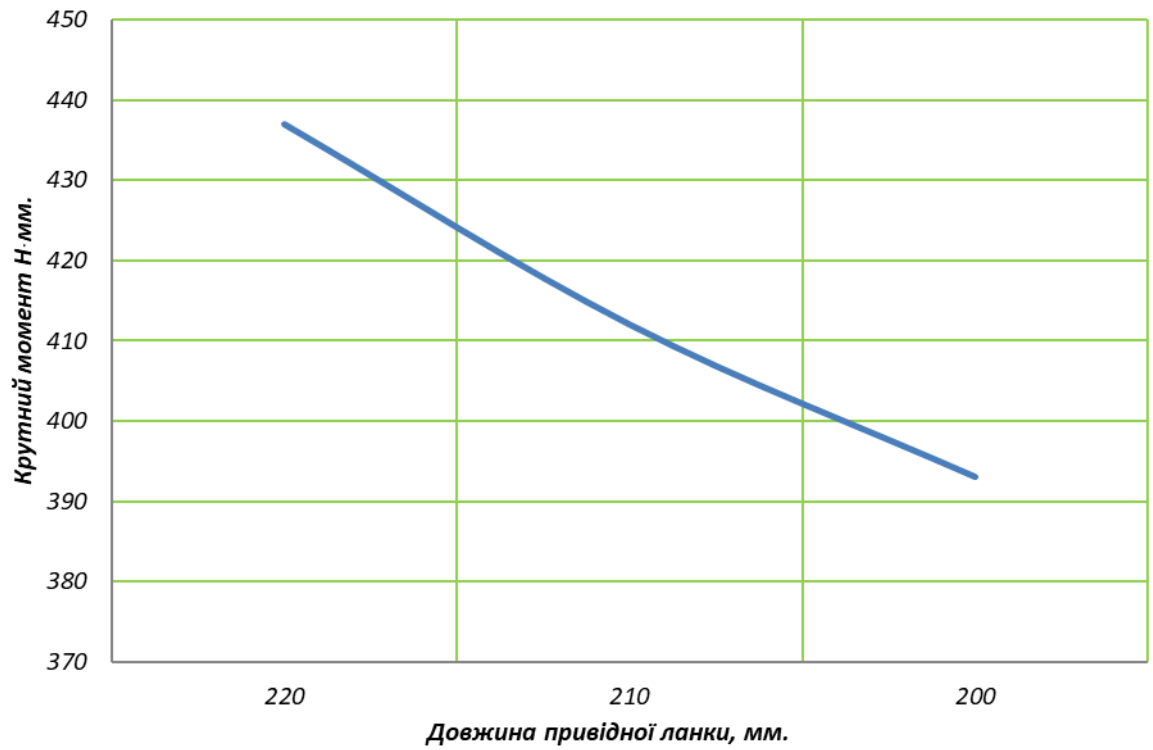


Рис. 2.14 Графік залежності крутного моменту на приводах від довжини привідної ланки маніпулятора.

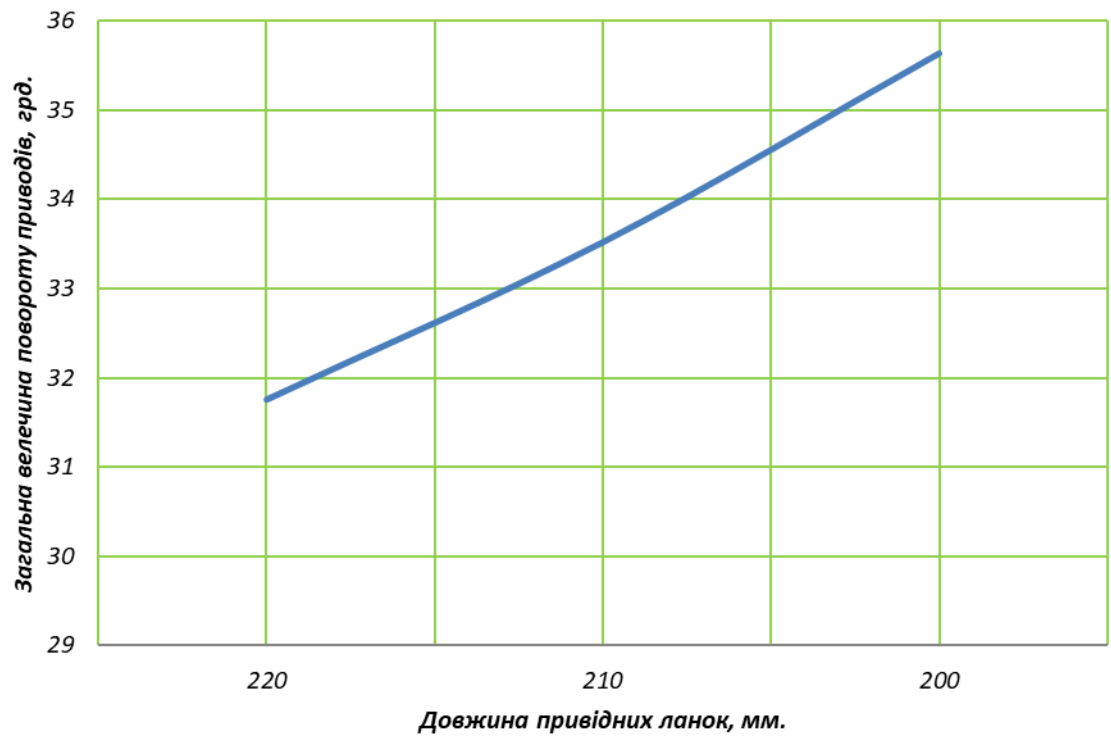


Рис. 2.15 Графік залежності величини повороту приводів від довжини привідної ланки маніпулятора.

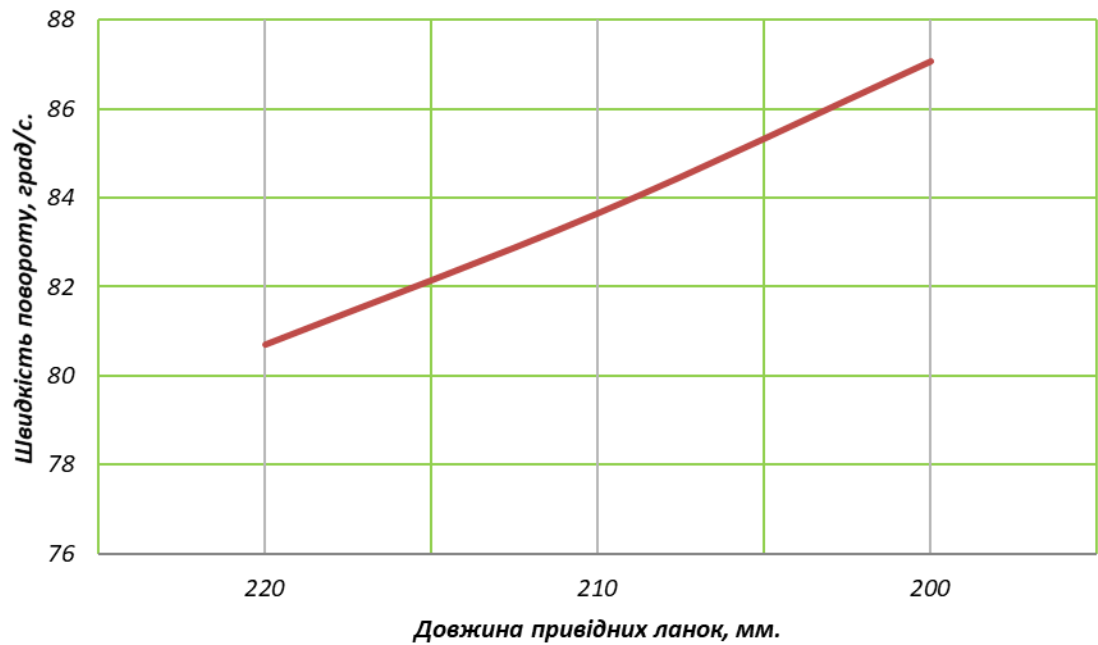


Рис. 2.16 Графік залежності швидкості повороту приводів від довжини привідної ланки маніпулятора.

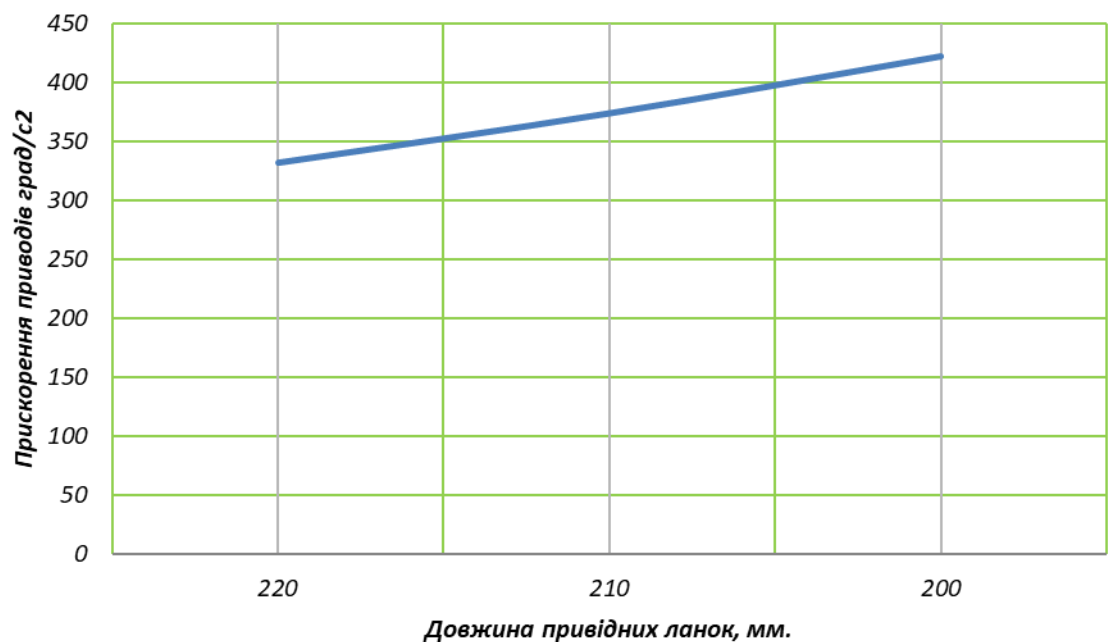


Рис. 2.17 Графік залежності прискорення повороту приводів від довжини привідної ланки маніпулятора.

Після проведення другого етапу дослідів спостерігаємо таку залежність, при зменшенні довжини привідної ланки:

- крутний момент на приводах механізму зменшується;
- величина повороту приводів зростає;

- швидкість повороту приводів зростає;
- прискорення приводів зростає.

За даними показниками приймаємо варіант з довжиною ланки 200мм, так як зменшення крутного моменту на приводах маніпулятора є більш суттєвою ніж всі інші показники і має більший вплив на точність механізму. З даним параметром переходимо до третього етапу.

На цьому етапі проводимо зміну довжини веденої ланки маніпулятора та аналогічно до попередніх етапів результати зводимо до таблиці(Табл. 2.3) , за якою будуємо графіки залежностей, рис 2.18; 2.19; 2.20.

Таблиця 2.3

Третій етап дослідів – зміна довжини ведених ланок маніпулятора.

Параметри	Одиниці вимір.	Досл. 1	Досл. 2	Досл.3
Відстань між приводами	мм	220	240	250
Довжина привідних ланок	мм	250	250	250
Довжина ведених ланок	мм	200	200	200
Крутний момент	Н·мм	394	393	392
Переміщення min.	град	-7,04	-7,19	-7,25
Переміщення max.	град	29,23	27,91	27,76
Величина переміщення	град	36,27	35,1	35,01
Швидкість від'ємна	град/с	-96,74	-90,2	-88,61
Швидкість	град/с	86,5	87,77	88,59
Прискорення від'ємне	град/с ²	-551	-552,02	-554,7
Прискорення	град/с ²	465,22	395,28	377,17

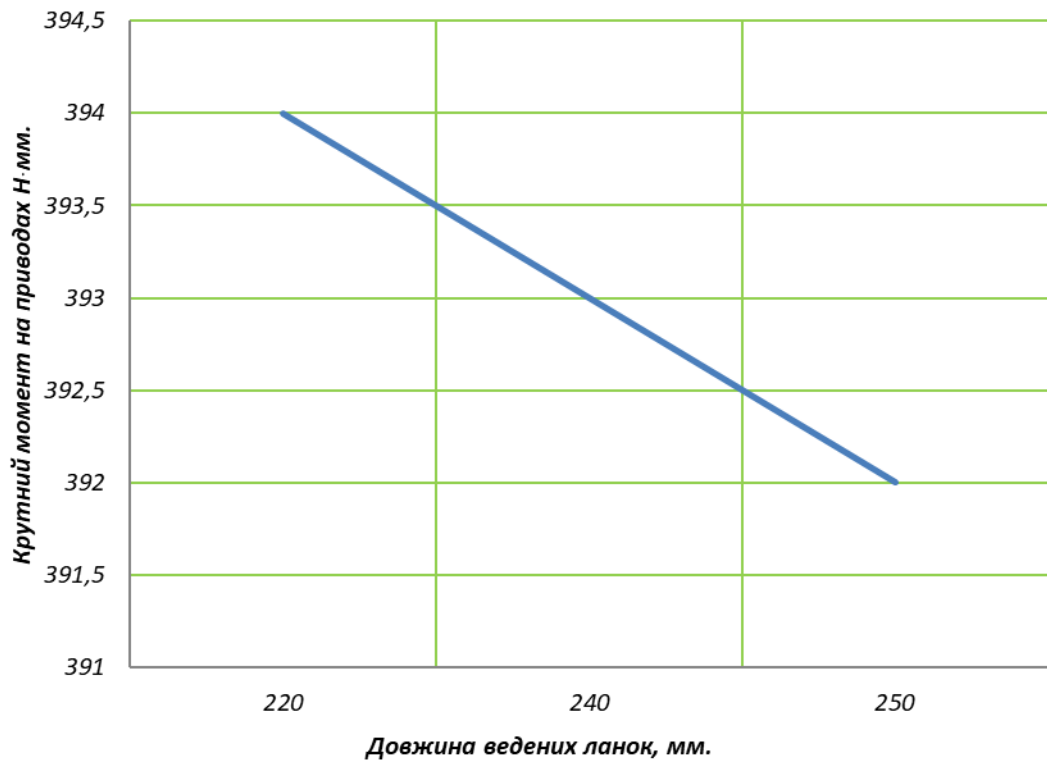


Рис. 2.18 Графік залежності крутного моменту приводів від довжини ведених ланки маніпулятора.

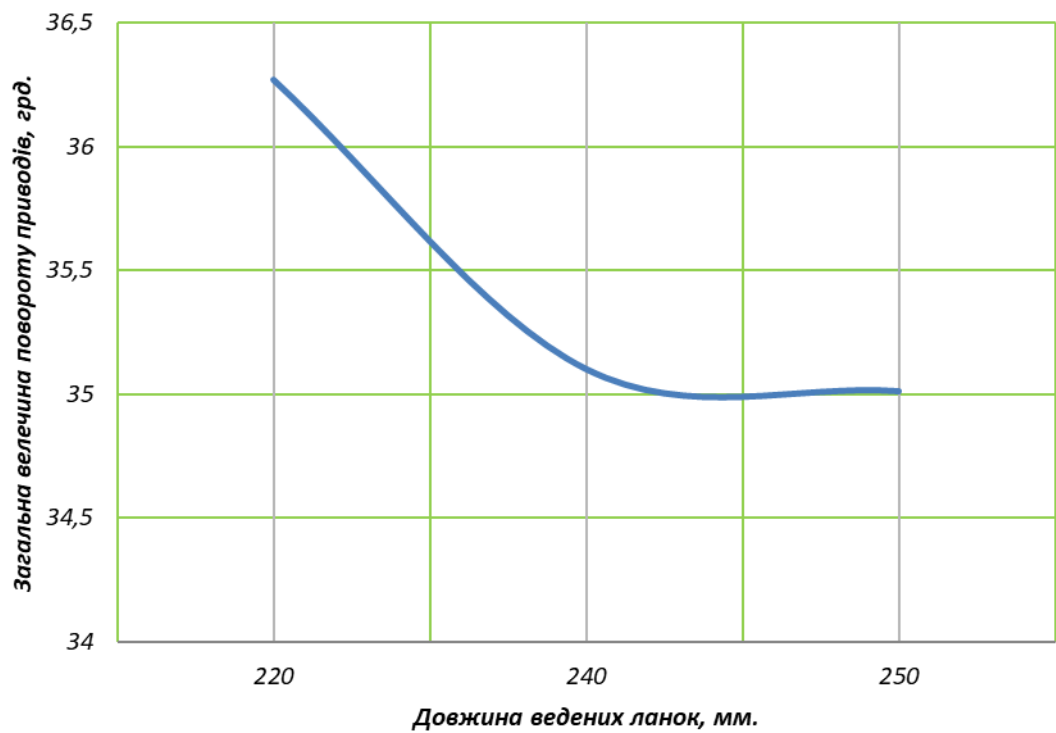


Рис. 2.19 Графік залежності величини кута повороту приводів від довжини ведених ланки маніпулятора.

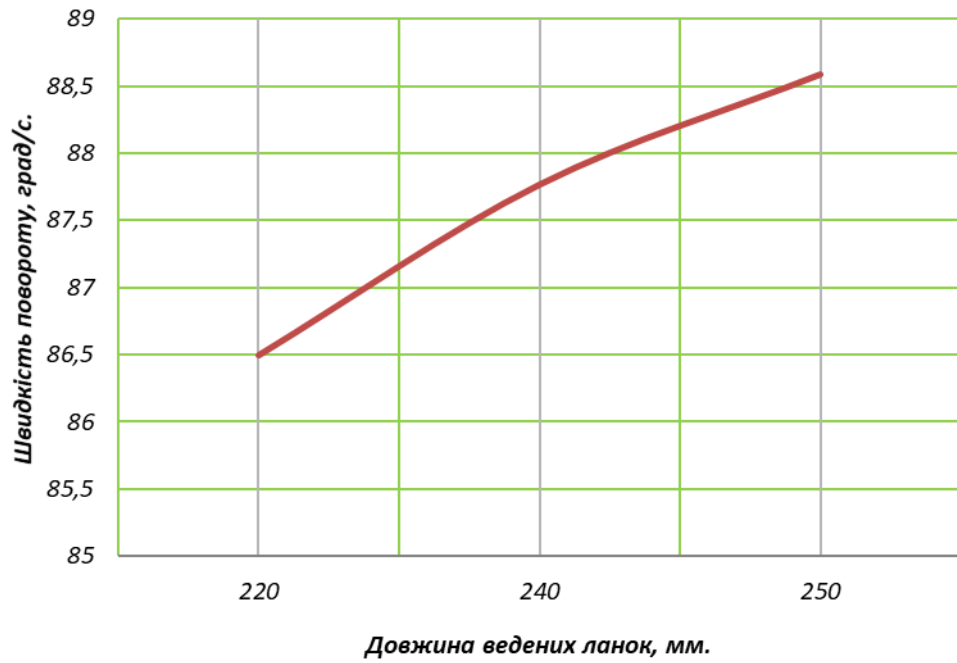


Рис. 2.20 Графік залежності швидкості повороту приводів від довжини ведених ланки маніпулятора.

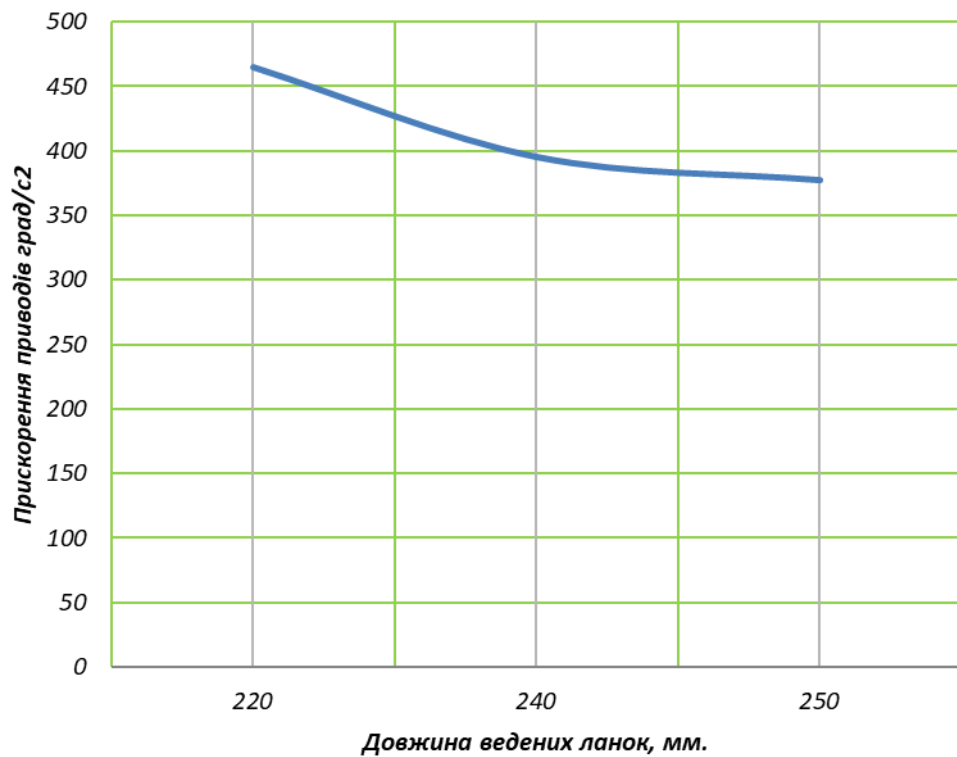


Рис. 2.21 Графік залежності прискорення приводів від довжини ведених ланки маніпулятора.

По результатам проведеного етапу, спостерігаємо незначне зниження крутного моменту, величини кута повороту, прискорення приводів та певне зростання

швидкості повороту при збільшенні довжини ведених ланок. Виходячи з чого приймаємо довжину ведених ланок 250мм .

Таким чином після проведення трьох етапів досліджень можемо стверджувати що: при зменшенні відстані між приводами маніпулятора крутний момент на роторі привода знижується, при зменшенні довжини привідної ланки крутний момент також знижується проте при зменшенні довжини веденої ланки крутний момент зростає. Звідси випливає висновок: при проектуванні плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами необхідно враховувати ці залежності і відстань між приводами та довжину привідних ланок робити меншою, а довжину ведених ланок більшою. Отже маємо основні конструкційні розміри маніпулятора, за якими можемо побудувати повноцінну 3d-модель маніпулятора, при наявності якої здійснити проведення більш точних динамічних дослідів, що і буде виконано у третьому розділі роботи.

3. ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МАНІПУЛЯТОРА.

3.1. Розробка тривимірної моделі маніпулятора.

За основу конструкції, використовуємо досвід канадських науковців, які виготовили прототип подібного маніпулятора[10]. Але, враховуючи проведені дослідження та проаналізувавши кінематичні залежності у конструкції, основні розміри приймаємо відповідно до висновків що отримано у попередньому розділі. Таким чином: відстань між приводами маніпулятора складає – 250мм, довжина привідної ланки – 200мм, довжина веденої ланки – 250мм.

Станиною маніпулятору слугує сталевая плита – 1(Рис. 3.1) , яка водночас служить робочим столом у ній можуть бути зроблені отвори для закріплення допоміжних механізмів, та оснастки. До плити за допомогою гвинтів кріпляться чотири циліндричні колони – 2, що сполучають плиту з основою – 3, на якій встановлюються два приводи маніпулятора – 4. Безпосередньо до роторів приводів кріпляться привідні ланки – 5, що в свою чергу через шарнірні з'єднання сполучені з веденими ланками – 6, які поєднані спільним шарніром – 7, на якому встановлюється виконавчий орган(найімовірніше пневматична присоска).

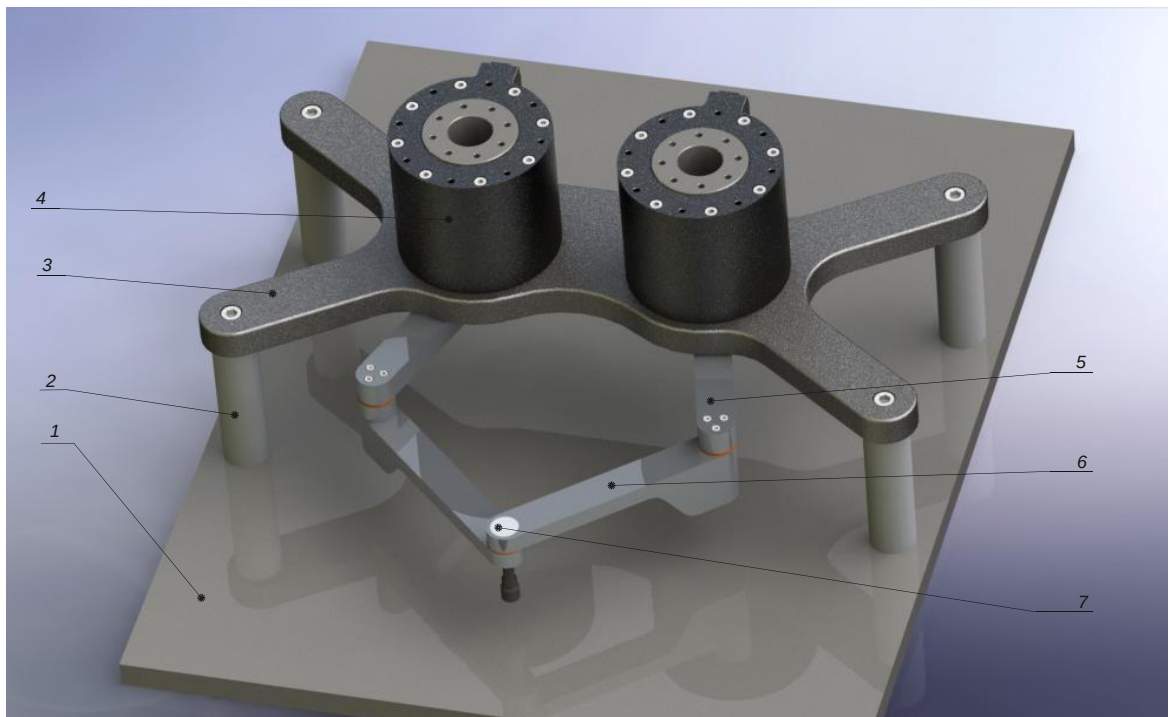


Рис. 3.1. Тривимірна модель маніпулятора.

3.2. Симуляція переміщення моделі маніпулятора.

Маючи у наявності готову тривимірну модель, доцільним буде проведення дослідів по аналізу динамічних показників при переміщенні робочого органу по відповідній траєкторії.

При виконанні симуляції переміщення з моделі вилучаємо приводи, через те, що вони сприймаються програмою як пасивні елементи і створюють додаткові інертні маси, що матиме вплив на результати досліджень.

За вже відомим алгоритмом, тільки на повноцінній 3d-моделі, виконуємо симуляцію переміщення робочого органу по колу діаметром 50мм, *рис 3.2*, та по результатам будуємо чотири графіки показників величин, що виникають на приводах маніпулятора.

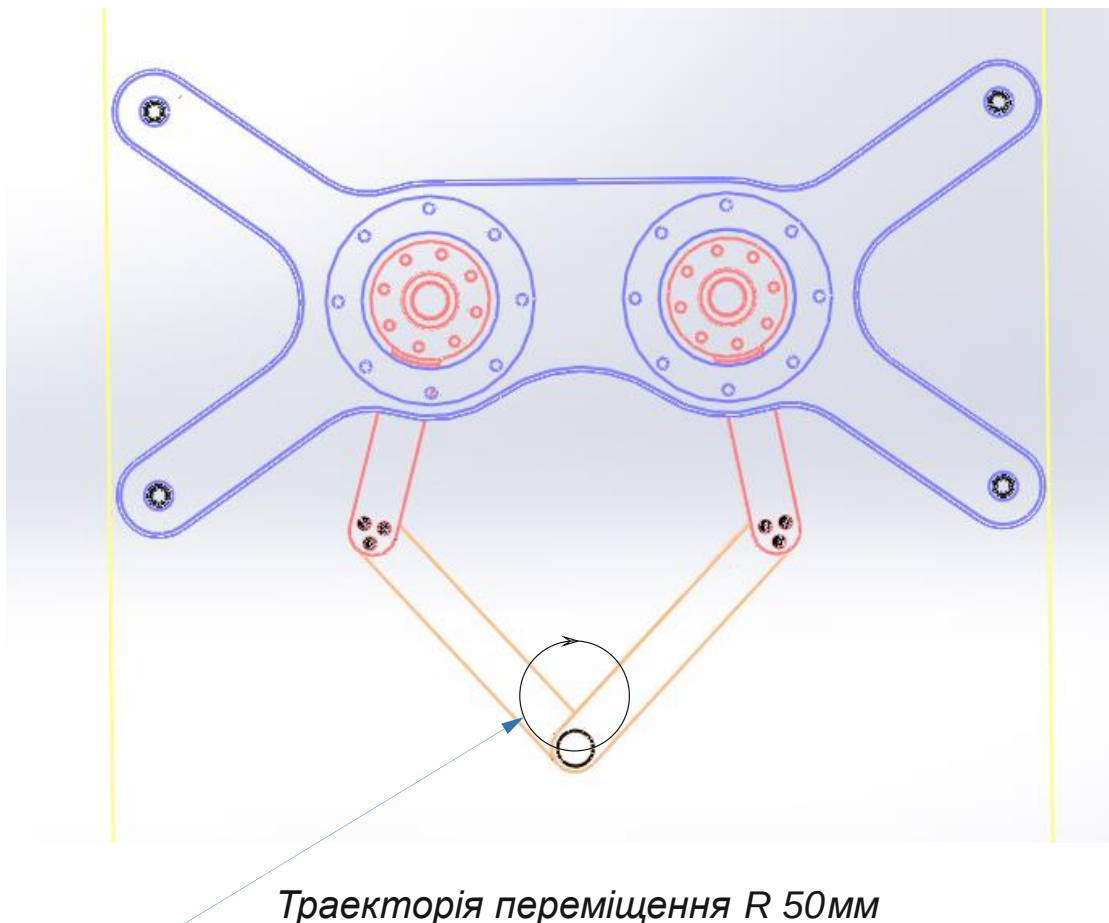
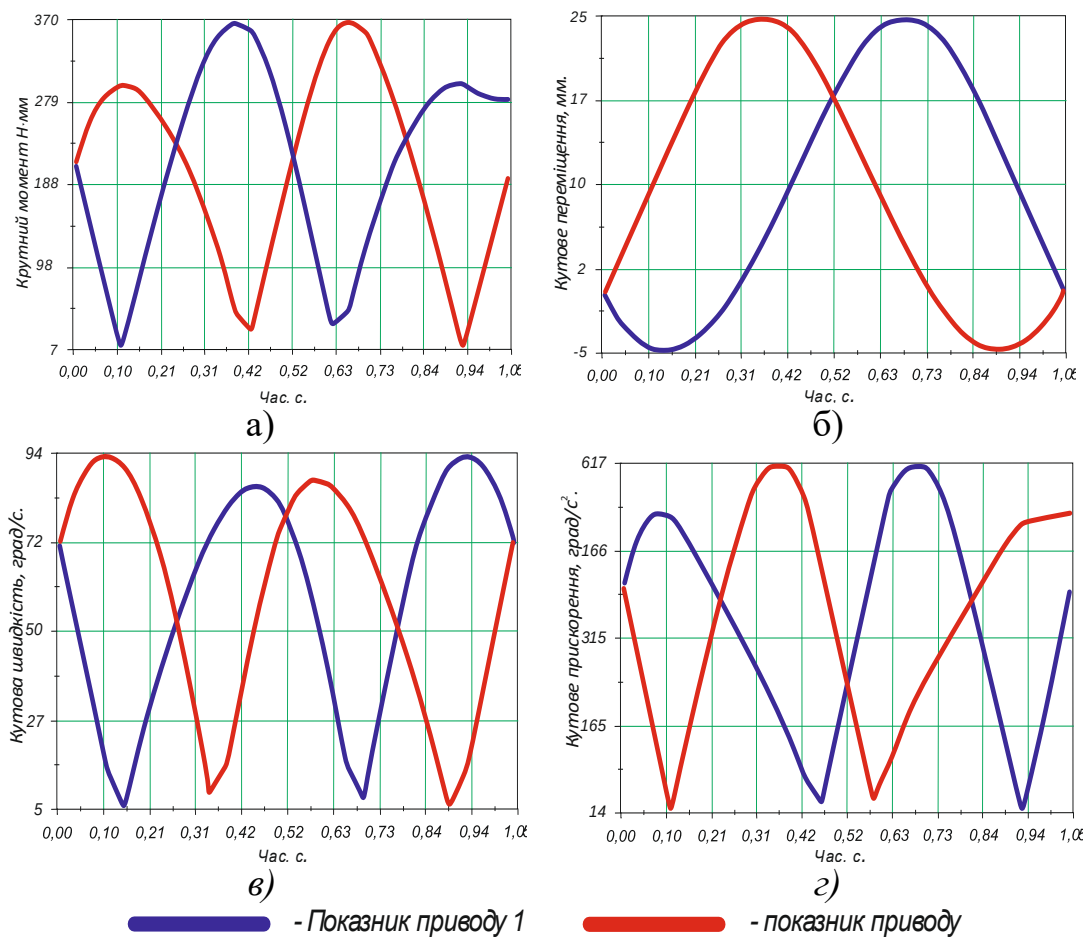


Рис. 3.2 Симуляція переміщення виконавчого органу маніпулятора по траєкторії кола діаметром 100мм.



а – крутним момент що виникає на приводах маніпулятора;
 б – кутове переміщення приводів;
 в – кутова швидкість приводів;
 г – кутове прискорення приводів.

Рис. 3.3 Графіки показники величин, що виникають на приводах маніпулятора при переміщенні виконавчого органу по колу діаметром 100мм.

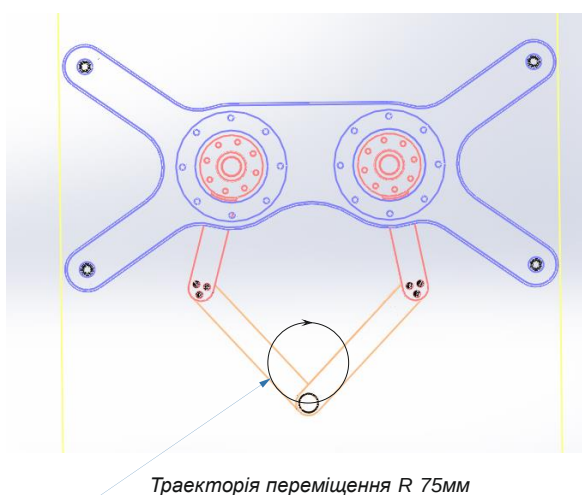
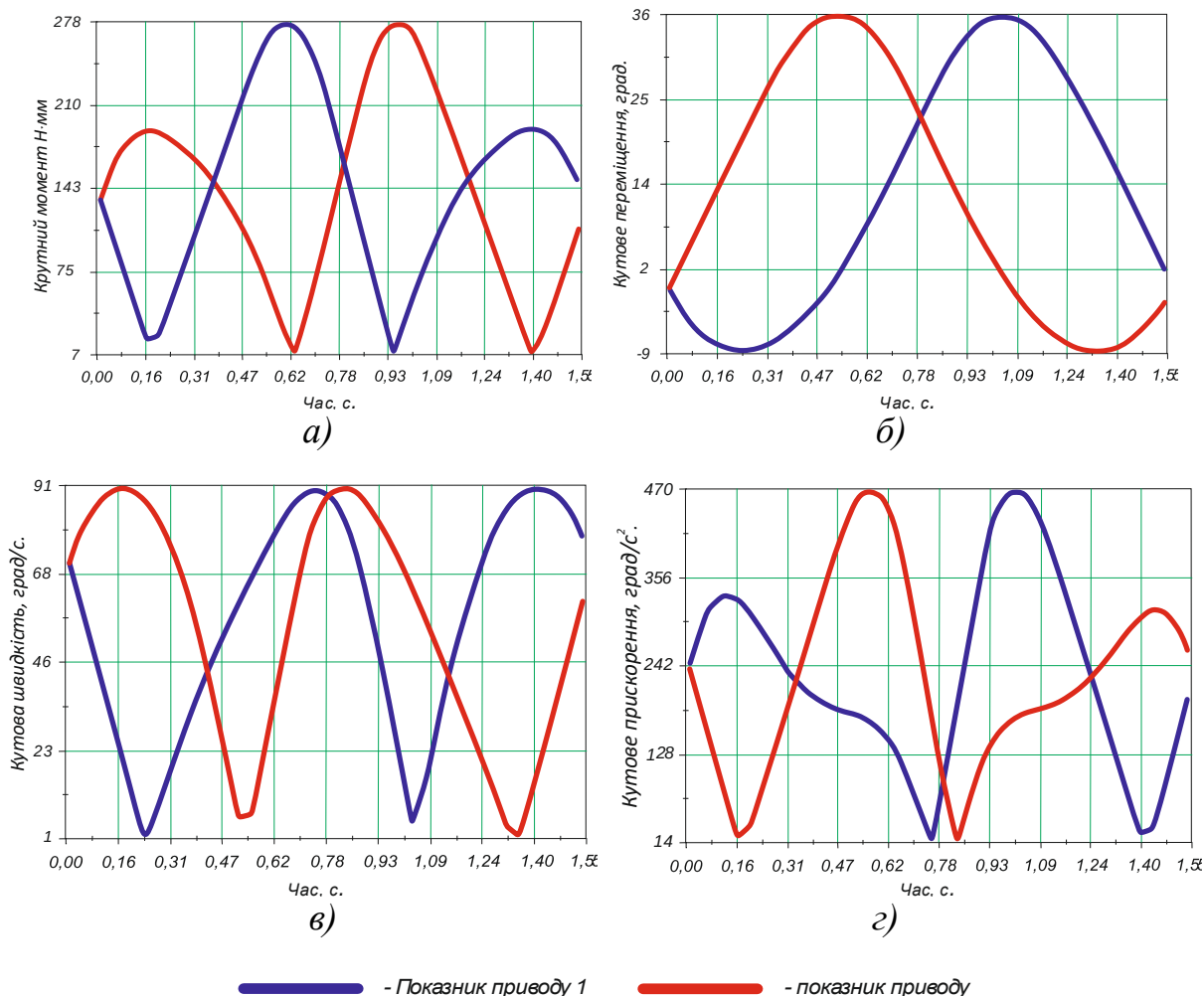


Рис. 3.4. Симуляція переміщення виконавчого органу маніпулятора по траєкторії кола діаметром 150мм.



а – крутним момент що виникає на приводах маніпулятора;
 б – кутові переміщення приводів;
 в – кутова швидкість приводів;
 г – кутове прискорення приводів.

Рис. 3.5. Графіки показники величин, що виникають на приводах маніпулятора при переміщенні виконавчого органу по колу діаметром 150мм.

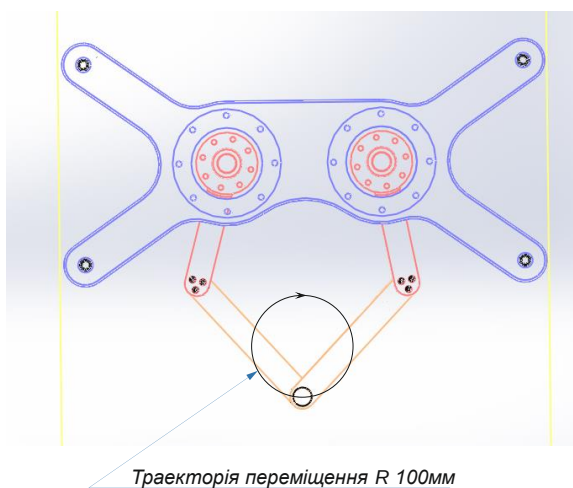
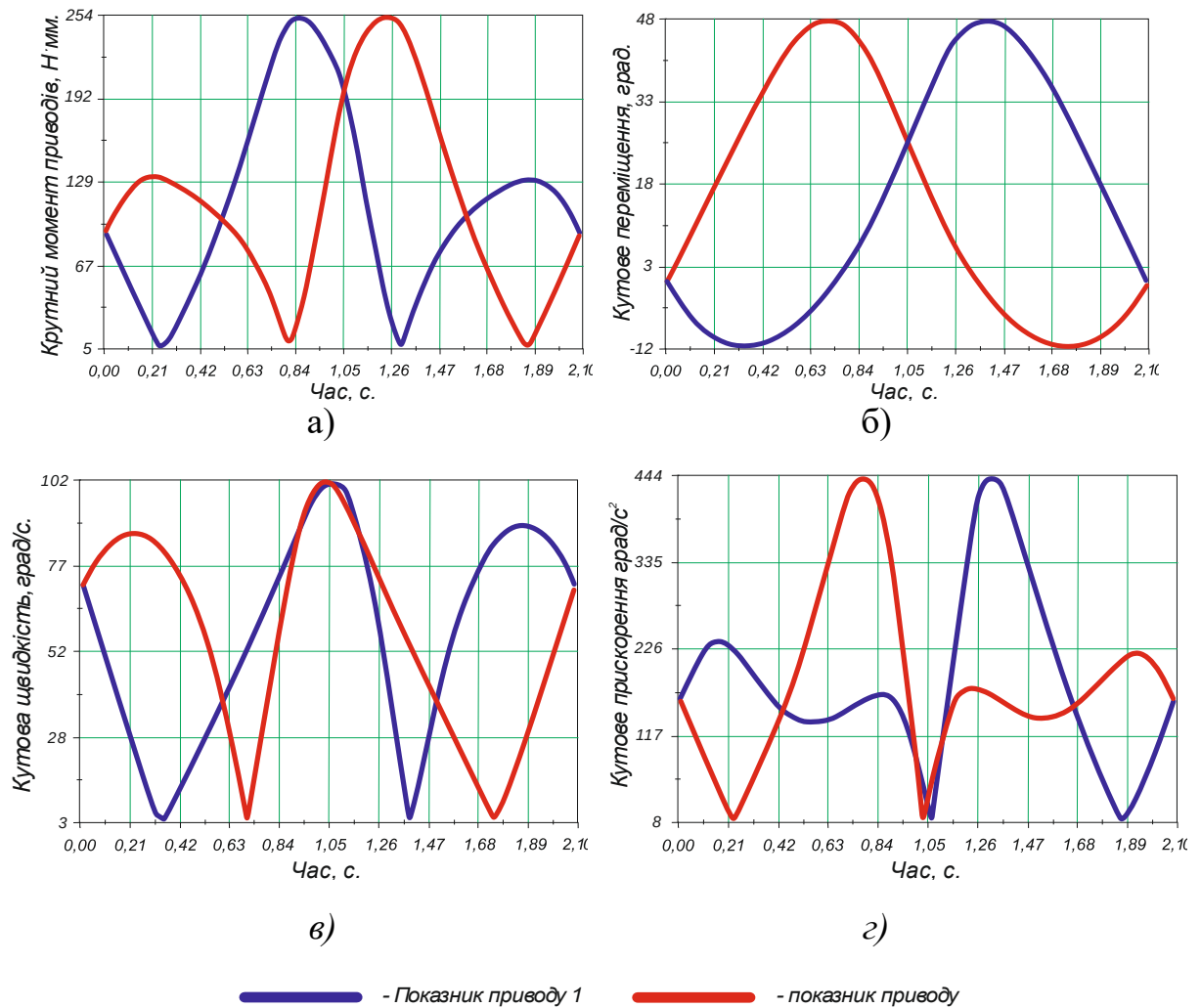


Рис. 3.6. Симуляція переміщення виконавчого органу маніпулятора по траєкторії кола діаметром 200мм.



а – крутним момент що виникає на приводах маніпулятора;
 б – кутове переміщення приводів;
 в – кутова швидкість приводів;
 г – кутове прискорення приводів.

Рис. 3.5. Графіки показники величин, що виникають на приводах маніпулятора при переміщенні виконавчого органу по колу діаметром 100мм.

Після проведення ряду дослідів з симуляції переміщення робочого органу маніпулятора з постійною лінійною швидкістю, отримано такі показники навантаження приводів:

- при переміщенні по колу діаметром 100мм максимальний крутний момент склав – 370Н·мм; кут повороту від -5 до 25°; максимальна швидкість повороту – 94°/с; Кутове прискорення – 617°/с²;
- при переміщенні по колу діаметром 150мм максимальний крутний момент склав – 278Н·мм; кут повороту від -9 до 36°; максимальна швидкість повороту – 91°/с; Кутове прискорення – 470°/с²;
- при переміщенні по колу діаметром 200мм максимальний крутний момент склав – 254Н·мм; кут повороту від -12 до 48°; максимальна швидкість повороту – 102°/с; Кутове прискорення – 444°/с².

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПЛОСКОГО МАНІПУЛЯТОРА ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ВАЖІЛЬНИМИ ПРИВОДАМИ

4.1. Загальні вихідні дані

Проектний механізм призначений для різноманітних робіт по переміщенню та сортуванню невеликих деталей при великій швидкості переміщення без втрат точності позиціонування. База для порівняння – маніпулятор RP-5АН від Mitsubishi Electric, що має аналогічну компоновку і виконує схожі операції. Застосування проекту дасть змогу збільшити корисний робочий простір, навантажувальну здатність та інші.

Техніко-економічні показники базового та проектного верстатів зведено до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники

№ п/п	Показники	Одиниця	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1	Програма виробництва деталей	шт./рік	10000	10000
2	Штучний час обробки однієї деталі	хв.	0,12	0,12
3	Площа, яку займає маніпулятор	м ²	0,25	0,85
4	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	0,6	3,0
5	Категорія ремонтної складності:			
	а) механічної частини	УРО	23	20
	б) електричної частини	УРО	19	14
6	Розряд роботи: верстатника	розряд	3	3
7	Оптова ціна базового маніпулятора	грн.	2460000	—

4.2 Визначення витрат на конструкторську підготовку виробництва

Конструкторська підготовка виробництва складається з етапів проектування об'єкта з послідовним розвитком та уточненням окремих розрахунків та конструкторських рішень. Роботи виконуємо в такій послідовності:

4.2.1 Встановлюємо етапи конструкторської підготовки виробництва:

- технічне завдання;
- технічна пропозиція;
- ескізний проект;
- технічний проект;
- робочий проект.

4.2.2 Встановлюємо групу новизни та складності об'єкта, який конструюється [1.дод.1].

4.2.3 Визначаємо кількість деталей, які підлягають розробці, диференціюючи їх за видами. За допомогою коефіцієнтів переводу [1.дод.2] деталі різних видів переводять в “умовні деталі”.

4.2.4 Трудомісткість технічного і робочого проектів визначаємо як добуток відповідної загальної кількості “умовних деталей” на трудомісткість однієї умовної деталі [1.дод.3] в залежності від групи новизни та складності об'єкта, який конструюється.

4.2.5 Трудомісткість технічного завдання, технічної пропозиції, ескізного проекту визначаємо відповідно групі новизни і складності об'єкта [1.дод.3].

4.2.6 Трудомісткість проектування електричних, гідравлічних, пневматичних принципів і монтажних схем, які входять до складу робочого об'єкта, визначаються в залежності від їх новизни і складності [1.дод.4].

4.2.7 Використовуючи дані трудомісткості етапів робіт конструкторської підготовки виробництва, розроблюємо сітьовий графік, який дозволяє організувати процес так, щоб виконати його в найкоротший термін. Оскільки розрахунки сітьового графіка відносяться до організаційно-планових, доцільно винести їх в окремий розділ, після закінчення економічного обґрунтування [1.розд.2].

4.2.8 Після визначення трудомісткості робіт розраховуємо витрати на конструкторську підготовку виробництва (вартість проекту $B_{пк}$).

4.2.9 Всі отримані результати зводимо до табл.4.2

Таблиця 4.2.

Результати розрахунку трудомісткості та витрат конструкторської підготовки виробництва.

№ п/п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Технічне завдання	Технічна пропозиція	Ескізний проєкт	Технічний проєкт	Робочий проєкт	Всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Група новизни	грн.	III					III
2	Група складності	грн.	III					III
3	Кількість деталей коефіцієнт переводу в “умовні деталі”:	шт.						
	а) корпусних масою більш 100кг					2x5	2x10	
	вб) оригінальних, які не є литими та корпусними					7x1	7x1	
	в) використаних з іншого виробу					3x0,5	3x0,2	
	г) стандартних нормалізованих					31x0,15	31x0,15	
	д) покупних деталей та виробів					3x0,15	3x0,15	
4	Кількість умовних деталей	шт.				23,6	32,7	
5	Норма на умовну деталь	нормо год.				3,4	4,3	
7	Загальна трудомісткість	нормо год.	40	370	405	80,24	140,61	1035,9
8	Середньогодинна заробітна плата конструктора	грн./ год.	113,25	102,66	97,54	98,79	90,86	
9	Зарплата основна (Z_o)	грн.	4530,00	37984,2	39503,7	7926,91	12775,82	102720,6
10	Зарплата додаткова (Z_d) 10% від Z_o	грн.	453,00	3798,42	3950,37	792,69	1277,58	10272,06
11	Відрахування у соціальні фонди 22% від (Z_o+Z_d)	грн.	1096,26	9192,18	9559,90	1918,31	3091,75	24858,39
12	Витрати на відрядження до 5% від Z_o	грн.	226,50	1899,21	1975,19	396,35	638,79	5136,03
13	Накладні витрати 50% від Z_o	грн.	2038,50	17092,9	17776,7	3567,11	5749,12	46224,29
14	Всього вартість проекту ($B_{пк}$)	грн.	8344,26	69966,9	72765,8	14601,37	23533,07	189212,0

4.3 Визначення витрат на технологічну підготовку виробництва

4.3.1 Технологічну підготовку виробництва здійснюємо відповідно до вимог “Єдиної системи технологічної підготовки виробництва”, яка встановлює такі етапи:

- технологічний контроль креслень, їх налагодження та розмноження;
- розробка технологічних процесів:
 - а) виготовлення деталей;
 - б) складання вузлів;
- конструювання спеціального оснащення та нестандартних засобів механізації та автоматизації;
- виготовлення спеціального оснащення та нестандартних засобів механізації та автоматизації;
- перепланування та перевстановлення обладнання.

Перш ніж починати визначення трудомісткості і витрат на технологічне проектування, необхідно провести аналіз технологічності конструкції і визначити перелік тих етапів, які слід включити до технологічної підготовки виробництва даного об’єкта.

4.3.2 Трудомісткість технологічної підготовки виробництва визначаємо в такій послідовності.

В залежності від кількості деталей та вузлів різної технологічної складності і на підставі диференційованих норм часу визначають трудомісткість проектування технологічних процесів виготовлення деталей і складання вузлів [1, дод.5]

Трудомісткість останніх етапів робіт технологічної підготовки виробництва визначають у відсотках від трудомісткості проектування технологічних процесів обробки деталей та складання вузлів.

4.3.3 Після визначення трудомісткості виконання етапів робіт з технологічної підготовки виробництва визначаємо вартість проекту V_m .

4.3.4 Всі виконані розрахунки зводимо до таблиці 4.3.

4.3.5 У випадку, коли новий об’єкт складається з невеликої кількості деталей (наприклад, ріжучий інструмент), витрати на підготовку виробництва можливо розрахувати за формулами, представленими в [1, дод.6.]

Витрати на технологічну підготовку.

№ п/п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Кількість	К-ть норм. год на одиницю	Заг. к-ть нор. год	Середньогодинна зарплата, грн/год	Зарплата основна З _о , грн.	Додаткова зарплата З _д , грн (10% З _о)	Відр у соц. страх та ін фонди, грн (38,2% (З _о +З _д))	Накладні витрати, грн (50% З _о)	Загальна вартість В _т , грн
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Технологічний контроль, їх відладка та розмноження	Норм/год			17,55	17,29	303,38	30,34	127,48	151,69	612,89
2	Розробка технологічних процесів виготовлення деталей: а) загальна кількість деталей б) в т.ч. по групах технологічної складності I II III IV	шт.	9,00 3,00 3,00 3,00	 4,50 9,00 17,00	 13,50 27,00 51,00	 10,83 10,83 13,68	 146,21 292,41 697,68	 14,62 29,24 69,77	 61,44 122,87 293,17	 73,10 146,21 348,84	 2295,54 295,36 590,73 1409,45
3	Розробка техпроцесів складання вузлів: а) загальна кількість вузлів б) в т.ч. по групах тех. складності I II III IV V VI VII		2,00	 2,70 5,60 0,00 0,00 1,00 1,00 0,00	 12,50 14,90 17,80 22,30 31,80	 0,00 0,00 17,80 22,30 0,00	 10,83 10,83 10,83 15,77 15,77	 0,00 0,00 250,27 351,67 0,00	 0,00 0,00 105,16 147,77 0,00	 0,00 0,00 125,13 175,84 0,00	 0,00 0,00 505,59 710,45 0,00
4	Спеціальне оснащення та нестандартні засоби механізації та автоматизації: а) проектування б) виготовлення	Норм/ год			52,64 43,87	13,68 10,83	720,12 475,08	72,01 47,51	302,59 199,63	360,06 237,54	1454,78 959,75
5	Перепланування та перевстановлення обладнання, а також утримання цехів у період підготовки виробництва	Норм/ год			26,32	10,83	285,05	28,50	119,78	142,52	575,85
6	Інші витрати				20,47	10,83	221,70	22,17	93,16	110,85	447,88
7	Всього вартість проекту В _т				292,44		3743,55	374,36	1573,04	1871,78	7562,73

4.4 Визначення витрат на виготовлення робота маніпулятора та обґрунтування його оптової ціни.

4.4.1 Трудомісткість виготовлення маніпулятора (T_o) визначають в нормо-годинах за формулою:

$$T_o = \sum_{i=1}^n T_i, \quad (4.1)$$

$T_o = T_l + T_k + T_z + T_m + T_n + T_c + T_s + T_f + T_n = 0 + 0 + 0 + 120 + 20 + 35 + 30 + 0 + 5 + 8 + 65 = 283$ н-год.

де $T_l, T_k, T_z, T_m, T_n, T_c, T_s, T_f, T_n$ – трудомісткість ливарних, ковальсько-штампувальних, зварювально-заготівельних, механічних, термічних, гальванічних, слюсарсько-складальних, фарбувальних, пакувальних та інших робіт.

3.4.2 Визначаємо основну заробітну плату виробничих робітників

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{ri} \cdot T_i, \quad (4.2)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

C_{ri} – середньо-годинна тарифна ставка робітників, які виконують i -тий вид робіт, з врахуванням шкідливих умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{op}^{мех} = 13.95 \cdot 120 = 1674 \text{ грн.}$$

- Витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{op_i} \cdot \frac{\Pi_{pp_i}}{100}, \quad (4.3)$$

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

Для механічних робіт:

$$B_o^{мех} = 1674 \cdot \frac{285}{100} = 4770.9 \text{ грн.}$$

- Цехові витрати:

$$K_{цех} = \sum_{i=1}^n Z_{op_i} \cdot \frac{\Pi_{цв(i)}}{100}, \quad (4.4)$$

де $P_{цв}$ – відсоток цехових витрат по кожному і-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$K_{цех}^{мех} = 1674 \cdot \frac{132}{100} = 2209.68 \text{ грн.}$$

4.4.3 Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Трудомісткість виготовлення й окремі види витрат, які включені в собівартість виготовлення верстата

Види робіт	Трудомісткість робіт, нормо год	Середній розряд	Середньо годинна тарифна ставка робітника, грн	Основна заробітна плата робітників, $Z_{ор}$, грн	Витрати на утримання і експлуатацію обладнання, B_o		Загальноцехові витрати, $K_{цех}$	
					%	грн	%	грн
Ливарні	-	-	-	-	-	-	-	-
Ковальсько-штампувальні	-	-	-	-	-	-	-	-
Зварювально-заготівельні	-	-	-	-	-	-	-	-
Механічні	120	4	13,95	1674	285	4770,9	132	2209,68
Термічні	20	3	15,56	311,2	310	964,72	182	566,384
Гальванічні	35	3	14,06	492,1	310	1525,51	182	895,622
Слюсарсько-складальні	30	4	13,95	418,5	210	878,85	142	594,27
Електро- та гідророботи	-	-	-	-	-	-	-	-
Фарбувальні	5	2	11,05	55,25	110	60,775	120	66,3
Пакувальні	8	2	10,23	81,84	110	90,024	120	98,208
Інші	65	3	12,56	816,4	220	1796,08	150	1224,6
Всього	283	-	-	3849,29	-	10086,9	-	5655,06

4.4.4 Собівартість виготовлення маніпулятора розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних і звітних калькуляцій. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{\text{вир}} = M_o + M_d + П_n + B_n + T_v - B_{zv} + E_{\text{тех}} + П_{\text{тех}} + З_{\text{ор}} + З_{\text{др}} + B_{\text{сс}} + З_{\text{щп}} + B_o + K_{\text{цех}} + K_{\text{зав}} + B_{\text{ін}} + K_{\text{пв}},$$

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

$П_n$ – покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби, грн;

B_n – напівфабрикати власного виробництва, грн;

B_{zv} – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн;

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн;

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

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

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

$З_{\text{щп}}$ – відшкодування зносу інструмента та пристосувань цільового призначення, грн;

$K_{\text{зав}}$, $K_{\text{пв}}$ – загальнозаводські витрати та позавиробничі витрати, грн;

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

Розрахунки M_o , M_d , $П_n$, B_{zv} , B_n зводимо до таблиці 4.5.

Склад матеріальних витрат на виріб

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця (шт, кг)	Витрати	Ціна, грн	Витрати на виріб, грн
1	2	3	4	5	6
1	Основні матеріали				
	Сталь 45	кг	20	8,384	167,68
	Сортова конструкційна сталь	кг	200	7,328	1465,60
	Сталь 45	кг	20	8,384	167,68
	Всього основних матеріалів				1722,93
2	Покупні, напівфабрикати, комплектуючі вироби:				
	Електродвигун 1,5 кВт	шт	2	23200	46400
	Електрообладнання			10400	10400
	Підшипники			230	230
	Гвинти			240	240
	Гумовотехнічні вироби			50,3	50,3
	Інші покупні			860	860
	Всього покупних				58180,3

4.4.5 Для визначення повної собівартості розрахунки зводимо до таблиці 4.6:

Повна собівартість виготовлення маніпулятора

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн
1	Матеріали основні	M_o	таблиця 1.5	1722,93
2	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	68,92
3	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	P_n	таблиця 1.5	58180,30
4	Транспортно-заготівельні витрати	B_t	6% від ($M_o + M_d + P_n$)	3598,33
5	Зворотні відходи (віднімаються)	$-B_{зв}$	5% від M_o	86,15
6	Паливо та енергія на технологічні цілі	$P_{тех}, E_{тех}$	74% від $З_{ор}$	2848,47
7	Всього матеріальні витрати			66505,10
8	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	таблиця 1.4	3849,29
9	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	384,93
10	Відрахування в фонд соціального страхування	$B_{сс}$	38,4% від ($З_{ор} + З_{др}$)	1625,94
11	Відшкодування зносу інструментів та пристосувань цільового призначення	$З_{цп}$	18% від $З_{ор}$	692,87
12	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	таблиця 1.4	10086,86
13	Цехові витрати	$K_{цех}$	таблиця 1.4	5655,06
14	Загальнозаводські витрати	$B_{зав}$	180% від $З_{ор}$	6928,72
15	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	8,3% від $З_{ор}$	319,49
16	Виробнича собівартість об'єкту	$C_{вир}$	$\Sigma_{ст}(7 \div 15)$	96048,26
17	Позавиробничі витрати	$K_{пв}$	1% від $C_{вир}$	960,48
18	Повна собівартість	$C_{пов}$	$C_{вир} + K_{пв}$	97008,75
19	Прибуток	P_n	28% від $C_{пов}$	27162,45
20	Оптова ціна верстана	$C_{опт}$	$C_{пов} + P_n$	124171

Розрахуємо повну собівартість маніпулятора:

$$C_{нов} = C_{вир} + K_{пв},$$

$C_{вир}$ - Виробнича собівартість об'єкту, грн.

$K_{пв}$ – Позавиробничі витрати, грн.

$$C_{нов} = 96048,26 + 960,48 = 97008,75, \text{ грн}$$

Розраховуємо прибуток

$$\Pi_n = 28\% \cdot C_{нов} = 97008,75 \cdot 28\% = 27162,45, \text{ грн}$$

Оптова ціна верстата

$$\Pi_{опт} = \Pi_n \cdot C_{нов} = 124171, \text{ грн}$$

3.5 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки) на новому обладнанні

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (4.5)$$

де B_3 – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування основних робітників, грн;

$B_{ел}$ – витрати на силову електроенергію, грн;

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

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн;

$B_{п}$ – витрати на утримання площі, грн;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн;

B_n – втрати на налагодження верстата.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування:

$$B_3 = C_r \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.6)$$

де C_r – середньо-годинна ставка робітника, грн.;

$T_{\text{нор}}$ – час обробки деталі, хв.;

K_d, K_c – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

В базовому варіанті:

$$B_3^{\text{баз}} = 14.56 \cdot \frac{0.12}{60} \cdot (1 + 0.1) \cdot (1 + 0.382) = 0.04 \text{ грн.}$$

$$B_3^{\text{пр}} = 14.56 \cdot \frac{0.12}{60} \cdot (1 + 0.1) \cdot (1 + 0.382) = 0.04 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{ел}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (4.7)$$

де $N_{\text{в}}$ – установлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи електродвигунів (приймають 0,65...0,8);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (приймають 0,5...0,8);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом (приймають 0,3...0,5);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів – (приймають 0,86...0,9);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства – (приймають 0,92...0,96);

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

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,3}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{0,12}{60} \cdot 1,08 = 0,0002 \text{ грн},$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{3 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,92} \cdot \frac{0,12}{60} \cdot 1,08 = 0,001 \text{ грн}.$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{дм}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{нор}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.8)$$

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

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

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

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{18 \cdot 23 \cdot 0,12}{60 \cdot 100} \cdot 1 = 0,008 \text{ грн},$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{12 \cdot 20 \cdot 0,12}{60 \cdot 100} \cdot 1 = 0,005 \text{ грн}.$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot P_{\text{вн}} + R_{\text{е}} \cdot P_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.10)$$

де $P_{\text{вн}}, P_{\text{ве}}$ – відповідно річні витрати на всі види ремонту на одну категорію ремонтної складності механічної та електричної частини верстата, грн./рік;

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

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{23 \cdot 380 + 19 \cdot 210}{3950} \cdot \frac{0,12}{60} = 0,006 \text{ грн},$$

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{20 \cdot 380 + 14 \cdot 210}{3950} \cdot \frac{0,12}{60} = 0,005 \text{ грн}.$$

Витрати на утримання площі:

$$B_{\text{п}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{ф}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.11)$$

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

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

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

$$B_{\pi}^{\text{баз}} = \frac{0,25 \cdot 4 \cdot 300}{3950} \cdot \frac{0,12}{60} = 0,0002 \text{ грн},$$

$$B_{\pi}^{\text{пр}} = \frac{0,85 \cdot 4 \cdot 300}{3950} \cdot \frac{0,12}{60} = 0,01 \text{ грн}.$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.12)$$

де H_a – норма амортизації, %;

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

Балансову вартість верстатів знаходимо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (4.13)$$

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

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

Таким чином:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 470000 \cdot (1 + 0,05 + 0,06 + 0,05) = 545200 \text{ грн},$$

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 124171 \cdot (1 + 0,05 + 0,05 + 0,03) = 140313 \text{ грн},$$

Верстат, що проектується, на балансі підприємства враховується за повної собівартістю виготовлення.

$$B_a^{\text{баз}} = \frac{545200 \cdot 15}{3950 \cdot 100} \cdot \frac{0,12}{60} = 0,04 \text{ грн},$$

$$B_a^{np} = \frac{140313 \cdot 15}{3950 \cdot 100} \cdot \frac{0.12}{60} = 0,01 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п.п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1	Заробітна плата робітника основна і додаткова з відрахуваннями в фонд соціального страхування	B_z	0,04	0,04
2	Силовa електроенергія	$B_{ел}$	0,0002	0,0011
3	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,008	0,005
4	Універсальний ріжучий інструмент	$B_{ін}$	-	-
5	Ремонт обладнання	B_p	0,006	0,005
6	Утримання приміщення	$B_{п}$	0,0002	0,0005
7	Амортизація обладнання	B_a	0,04	0,01
8	Налагодження обладнання	B_n		
9	Загальна сума	B_e	0,1	0,07

4.6 Розрахунок показників економічної ефективності

4.6.1 Річний економічний ефект, який отримує підприємство, розраховуємо за формулою:

$$E_p = (B_e^{\delta} - B_e^{np}) \cdot N_d - E_n \cdot K_{\epsilon}, \quad (4.15)$$

де B_e^{δ} - Загальна сума експлуатаційні витрати базового варіанту;

B_e^{np} - Загальна сума експлуатаційні витрати проектного варіанту;

N_d - кількість деталей, шт;

E_n - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень; $E_n=0,16$.

K_{ϵ} - додаткові капітальні витрати у виробника, грн:

$$K_{\epsilon} = B_{пк} + B_m + \Phi_{бал.пр} \cdot Q_{пр} - \Phi_{бал.б} \cdot Q_b, \quad (4.16)$$

де $B_{пк}$, B_m - відповідно, вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$Q_{пр}$ - потреба в об'єкті в проектному варіанті для виконання річної програми випуску деталей:

$$Q = \frac{N_d \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot K_{вн}}, \quad (4.17)$$

$$Q^{np} = Q^{баз} = \frac{10000 \cdot 0,12}{3950 \cdot 60 \cdot 1,1} = 0,046$$

де $K_{вн}$ - коефіцієнт виконання норм часу ($K_{вн}=1,0 \dots 1,2$)

$$K_{\epsilon} = 189212 + 59027 + 740107 \cdot 1 - 2853600 \cdot 1 = -1865254 \text{ грн.}$$

$$E_p = (0,3479 - 0,1414) \cdot 10000 - 0,16 \cdot (-1865254) = 300500 \text{ грн.}$$

4.6.3 В підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників (табл. 4.8)

Таблиця 4.8

Підсумкові техніко – економічні показники базового та проектного верстатів

№ з/п	Показники	Одиниця	Варіанти		Зміна, % (+,-)
			Базовий	Проектний	
1	Програма виробництва маніпуляторів	шт. / рік	-	1	-
2	Річне виробництво робіт (випуск виробів) із застосуванням маніпулятора	шт. / рік	10000	10000	-
3	Штучний час обробки виробу	хв.	0,12	0,12	-
4	Потреба в маніпуляторах для виконання річної програми випуску деталей	шт.	1	1	-
5	Коефіцієнт завантаження маніпулятора	η	0,046	0,046	-
6	Собівартість (повна) виготовлення	грн.	-	541014	-
7	Оптова ціна об'єктів	грн.	2460000	649217	-73,6
8	Собівартість одиниці обробки з застосуванням об'єктів	грн.	0,3479	0,1414	-59,4
9	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	-	248239	-
10	Річний економічний ефект	грн.	-	300500	-

ВИСНОВКИ

1. Провівши аналіз існуючих плоских маніпуляторів паралельної структури з важільними приводами, з'ясовано що даний тип маніпуляторів має великі перспективи розвитку, проте необхідні певні вдосконалення вже існуючих механізмів.
2. В роботі складена кінематична схема плоского маніпулятора, визначені основні залежності між переміщенням робочого органу та приводами маніпулятора.
3. На основі ряду дослідів визначено вплив геометричних параметрів маніпулятора на динамічні навантаження на приводи та встановлені раціональні співвідношення, а саме: відстань між приводами – довжина привідних ланок – довжина ведених ланок, 5:4:5, відповідно.
4. За раціональними геометричними параметрами розроблена тривимірна модель та проведена симуляція переміщення робочого органу по типовій траєкторії і визначені динамічні характеристики приводів робота.
5. Проведення аналізу динамічних показників плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами свідчить, що розроблений маніпулятора має зменшені навантаження на приводах, як наслідок менший вплив на точність робота в порівнянні з прототипом DexTAR.
6. Виконані всі необхідні економічні розрахунки. При цьому річний економічний ефект від впровадження плоского маніпулятора паралельної структури з важільними приводами у виробництво складає 300500 грн., що дозволяє зробити висновок про економічну доцільність впровадження робота у виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних гідравлічних машин. / Апаракін А.Р. // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 51-58.
2. Валявський, І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посіб. / І. А. Валявський, О. В. Лисенко, І. А. Лисенко ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 281 с.
3. Shcherbyna K. Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks / K. Shcherbyna, A. Hrechka, V. Mazhara, T. Diachenko//Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2020. – Вип.50. – С.159-164
4. Щербина К.К. Експериментальне дослідження деформації пружно-гвинтового хона / К.К. Щербина, М.М. Підгаєцький, В.А. Мажара, А.І. Гречка, Т.В. Дяченко // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 2. – С. 31-38.
5. Годунко М.О. Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого захватного пристрою / М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А. Мажара, В.К. Щербина, Р.А. Кравченко, В.В. Ключкін // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 27-33.
6. Годунко М.О. Дослідження можливості підвищення точності захватного пристрою робота за рахунок компенсуючої ланки затискного важеля. Годунко М.О., Мажара В.А., Кислун О.С., Щербина В.К., Писанка С.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки : зб. Наук пр. – Хмельницький : ХНУ, 2024. – Вип. №3. – С. 52-56.
7. Kyrychenko A. The principle of contradiction in scientific and pedagogical research on AI (methodological aspect) / A. Kyrychenko, Z. Stezhko // Вісник Львівського університету. Серія філос.-політолог. студії. - Львів: Видавничий дім «Гельветика», 2024. – Вип. 53. – С. 78-85.

8. Апаракін А.Р. Синтез схем навантаження силових елементів кулькогвинтового гідропідсилювача з аксіальною структурою приводу / А.Р. Апаракін, П.М. Єрємін, В.А. Мажара // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – Вип. 9 (40). – Ч. II. – С. 23-31.
9. Мажара В.А. Система автоматизованого проектування технологічного оснащення / В.А. Мажара, К.К. Щербина, А.М. Артюхов, С.А. Тененика, І.С. Шестаков // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.
10. Пузирьов О.Л. Аналіз ефективності впровадження волочильного стану для підготовки заготовок з металопрокату для верстатів з ЧПК / О.Л. Пузирьов, А.І. Гречка // Технології та інжиніринг. – К.: КНТУТД, 2024. – Вип. 5 (22). – С. 71-78.
11. Кириченко А. М. Аналіз кінематики верстата з двохкоординатним механізмом паралельної структури "біпод" / А. М. Кириченко, Л. В. Ленченко, С. М. Заїка // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - Тернопіль : ТДТУ, 2008. - № 2. - С. 74-81
12. Кириченко А. М. Дослідження кінематики трьохкоординатного верстата з комбінованою структурою / А. М. Кириченко, С. М. Заїка, Л. В. Ленченко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград : КНТУ, 2008. - Вип. 20. - С. 97-103.
13. Кириченко А. М. Визначення силових характеристик приводів обладнання з механізмами паралельної структури / А. М. Кириченко, С. М. Заїка // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук : КДПУ, 2008. - Вип. 5 (52), ч. 2. - С. 50-53.
14. Заїка С. М. Точність верстатів із плоскими механізмами паралельної структури / С. М. Заїка, А. М. Кириченко // Вісник Сумського державного університету. Серія "Технічні науки". - Суми : СумДУ, 2010. - № 4. - С. 19-23.
15. Кириченко А. М. Особливі положення плоских механізмів паралельної структури / А. М. Кириченко, С. М. Заїка, А. М. Федотьєв // Вісник

Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук : КДУ, 2010. - Вип. 5 (64), ч. 1. - С. 94-99.

16. Щербина К. Динамічний аналіз кульково-клинового хону в зоні малих переміщень / Щербина К., Мажара В., Торчілов Д., Заїка С., Масляніков В. // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2024. - №3 (337). - С.250-254.

17. Щербина К., Мажара В., Торчілов Д., Заїка А., Масляніков В. Дослідження повздожньої сталості пружно-гвинтового хону з гвинтовими канавками // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.493-499.

18. Щербина К., Заїка А., Заїка С., Мажара В., Скібінський Я. Управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини профілем інструментальної рейки // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.364-370.

19. Заїка, С., Заїка, А., Лисенко, О., & Скібінський, Я. (2025). Підвищення ефективності обробки отворів корпусних деталей із чавуну деформуючим протягуванням. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 357(5.1), 167-174.

20. Економічні розрахунки організаційно-планові розрахунки при розробці нових виробів. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – 36 с.

21. Планування діяльності підприємства. Методичні вказівки з використання сітьових методів в плануванні діяльності підприємства. – Кіровоград: КДТУ, 2002. – 30 с.