

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Удосконалення методу позиціонування маніпулятора робота за  
допомогою ПДД регулятора  
(тема)

Виконав:  
студент II курсу, групи КІТПВМ-22-2  
Лещенко Д.Д.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-  
інтегровані технологічні процеси і  
виробництва  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Сичова О.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Невлюдов І. Ш.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Я Лещенко Данил Дмитрович, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

« 11 » Січня 2024 р.



(підпис)

Лещенко Д.Д.

(прізвище, ініціали)

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_

*Леценку Данилу Дмитровичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення методу позиціонування маніпулятора робота за допомогою ПІД-регулятора

затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 03.11. 2023 р. № 1287 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 17. 01. 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження – автоматизоване управління позиціонуванням маніпулятора робота у просторі. Маніпулятор робота має такі параметри: висота поворотної бази робота маніпулятора 155 мм, довжина першого плеча 120 мм, вантажопідйомність до 2 кг. Середа моделювання та дослідження – Matlab та Simulink. На суглоби подаються синусоїдальний та крокуючий сигнали.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ. 4.1 Аналіз технічного завдання. 4.2 Аналіз вимог технічного завдання. 4.3 Аналіз типів маніпуляторів роботів. 4.4 Огляд сучасних методів автоматизації в робототехніці. 4.5 Аналіз застосування ПІД регулятора для позиціонування маніпуляторів. 4.6 Розробка моделі маніпулятора робота. 4.7 Розробка кінематичної схеми маніпулятора. 4.8 Створення моделі маніпулятора у Simulink. 4.9 Покращення позиціонування маніпулятора за рахунок додавання ПІД регуляторів. 4.10 Удосконалення схеми маніпулятора. 4.11 Додавання ПІД регуляторів. 4.12 Налаштування ПІД регуляторів. 4.13 Порівняння результатів дослідження

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – 17 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	3.11.2023	Виконано
2	Аналіз літератури та супутніх джерел	10.11.2023	Виконано
3	Аналіз технічного завдання	12.11.2023	Виконано
4	Аналіз типів маніпуляторів роботів	15.11.2023	Виконано
5	Огляд сучасних методів автоматичної в робототехніці	17.11.2023	Виконано
6	Розробка моделі маніпулятора робота	20.11.2023	Виконано
7	Розробка кінематичної схеми маніпулятора	25.11.2023	Виконано
8	Створення моделі маніпулятора у Simulink	26.11.2023	Виконано
9	Удосконалення схеми маніпулятора	01.12.2023	Виконано
10	Додавання ПІД-регуляторів	05.12.2023	Виконано

Дата видачі завдання

03.11.2023

Студент



(підпис)

Лещенко Д.Д.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

Сичова О.В.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 61 с., 41 рис., 1 табл., 28 джерел.

### ПІД-РЕГУЛЯТОР, РОБОТ МАНІПУЛЯТОР, ПОЗИЦІОНУВАННЯ, MATLAB, SIMULINK

Удосконалення методу позиціонування маніпулятора робота за допомогою ПІД-регулятора є актуальною та перспективною задачею в сучасній робототехніці. Використання ПІД-регулятора дозволяє досягти високої точності та стійкості позиціонування, що є важливим для підвищення ефективності виробництва та якості виготовлених продуктів.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого управління позиціонуванням маніпулятора робота у просторі.

Предмет дослідження – методи позиціонування маніпуляторів роботів.

Мета роботи – дослідження та оптимізація систем автоматичного управління для ефективного позиціонування маніпулятора за допомогою ПІД-регулятора.

В даній роботі проведено аналіз існуючих методів позиціонування та вибір найбільш ефективних з них для дослідження. Результати досліджень використовуються для покращення точності та надійності позиціонування маніпулятора в певних умовах роботи.

Розроблено ескіз робота маніпулятора, на основі якого було створено САД-модель за допомогою додатку для Matlab Simulink. Змодельовано рух маніпулятора за використанням динамічної ланки з прямою та зворотною кінематикою. За допомогою блоку Signal Editor було створено три сигнали, що подаються окремого на кожний рухомий елемент маніпулятора.

## ABSTRACT

Explanatory Note: 61 pages, 41 figures, 1 table, 28 sources.

PID CONTROLLER, MANIPULATOR ROBOT, POSITIONING,  
MATLAB, SIMULINK

Improving the positioning method of a robot manipulator using a PID controller is a relevant and promising task in modern robotics. The use of a PID controller allows achieving high accuracy and stability in positioning, which is crucial for enhancing manufacturing efficiency and product quality.

The research object is the process automated control of the positioning of a robot manipulator in space.

The research subject is the methods of robot manipulator positioning.

The aim of the work is to develop a PID controller to enhance the positioning characteristics of a robot manipulator.

In this work, an analysis of existing positioning methods was conducted, and the most effective ones were selected for further investigation. The research results are utilized to improve the accuracy and reliability of the manipulator's positioning under specific working conditions.

A draft of the robot manipulator was developed, based on which a CAD model was created using the Matlab Simulink application. The motion of the manipulator was simulated using dynamic links with direct and inverse kinematics. Three signals, each applied to a separate moving element of the manipulator, were created using the Signal Editor block.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз технічного завдання.....	10
1.1 Аналіз вимог технічного завдання .....	10
1.2 Аналіз типів маніпуляторів роботів .....	10
1.3 Аналіз методів позиціонування та їх вплив на точність .....	15
1.4 Огляд сучасних методів автоматички в робототехніці .....	17
1.5 Аналіз застосування ПІД регулятора для позиціонування маніпуляторів.....	19
1.6 Висновки до першого розділу .....	21
2 Розробка моделі маніпулятора робота .....	22
2.1 Розробка кінематичної схеми маніпулятора .....	22
2.2 Створення моделі маніпулятора у Simulink .....	26
2.3 Висновки до другого розділу .....	37
3 Позиціонування маніпулятора за рахунок додавання ПІД-регуляторів .....	38
3.1 Удосконалення схеми маніпулятора .....	38
3.2 Додавання ПІД-регуляторів .....	41
3.3 Налаштування ПІД-регуляторів .....	45
3.4 Висновки до третього розділу.....	52
4 Експериментальні дослідження.....	53
4.1 Аналіз отриманих результатів .....	53
4.2 Висновки до четвертого розділу.....	55
Висновки .....	56
Перелік джерел посилання .....	57
Додаток А Код програми.....	63
Додаток Б Публікації до кваліфікаційної роботи .....	64
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	69

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

ПД – пропорційно інтегрально диференційний;

CRH – Clearpath Robotics Husky;

CAD – Computer-Aided Design;

FC – Feedback Control;

UR – Universal-Robots.

## ВСТУП

В сучасному технологічному світі, автоматизація та точне позиціонування маніпуляторів є важливим завданням в багатьох галузях промисловості та технологій. Високоточне керування рухом об'єктів вимагає використання ефективних та надійних методів регулювання.

Одним із найпоширеніших та ефективних методів управління системами є використання ПІД-регуляторів. Цей підхід дозволяє досягати високої точності та надійності в роботі маніпуляторів у різних умовах експлуатації.

Метою даної роботи є дослідження та оптимізація систем автоматичного управління для ефективного позиціонування маніпулятора за допомогою ПІД-регулятора. Робота спрямована на вивчення принципів функціонування ПІД-регулятора, визначення його параметрів для оптимального керування маніпулятором та експериментальне підтвердження отриманих результатів.

У процесі виконання роботи буде проведено аналіз існуючих методів позиціонування та вибір найбільш ефективних з них для дослідження. Результати досліджень використовуються для покращення точності та надійності позиціонування маніпулятора в певних умовах роботи.

Вивчення та оптимізація методів автоматичного керування для позиціонування маніпулятора сприятиме підвищенню ефективності його роботи у різних сферах застосування.

## 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

### 1.1 Аналіз вимог технічного завдання

Згідно з технічним завданням маніпулятор робота має такі параметри:

- висота поворотної бази робота маніпулятора – 155 мм;
- довжина першого плеча – 120 мм;
- довжина другого плеча – 170 мм;
- вантажопідйомність маніпулятора – до 2 кг;

Необхідно вирішити проблему позиціонування маніпулятора у просторі за рахунок використання пропорційно інтегрально диференційного регулятора, що дозволить поліпшити точність та швидкість роботи.

### 1.2 Аналіз типів маніпуляторів роботів

Маніпулятори – це роботи, що є спеціалізованими на виконанні різноманітних завдань, що вимагають точності і докладного керування об'єктами або матеріалами. Існує кілька типів роботів-маніпуляторів, кожен з яких має свої особливості та галузь застосування:

- промислові маніпулятори – це маніпулятори, що використовуються у промисловості для автоматизації виробничих процесів. Роботи такого типу можна знайти в асамблейних лініях, заводах з виробництва та складських приміщеннях;

- медичні маніпулятори – це роботи, що використовуються в медичних установах для хірургічних операцій або діагностики;

- службові роботи використовуються для обслуговування та підтримки в різних галузях, таких як готельно-ресторанний бізнес та логістика.

- мобільні маніпулятори можуть переміщатися та виконувати завдання в різних середовищах.

Кожен з цих типів роботів-маніпуляторів має свою унікальну область застосування та може вирішувати специфічні завдання у відповідних галузях.

Через стрімкий розвиток масштабів промисловості з'явилась необхідність розвитку автоматизованих технологій. Для прикладу промислового маніпулятора слід розглянути серію роботів маніпуляторів від компанії Universal-Robots, що створенні для автоматизація циклічних процесів. Продукція цієї компанії представлена лінійкою з трьох полегшених маніпуляційних пристроїв з розімкненим кінематичним ланцюгом: UR3, UR5, UR 10 (рис 1.1) .

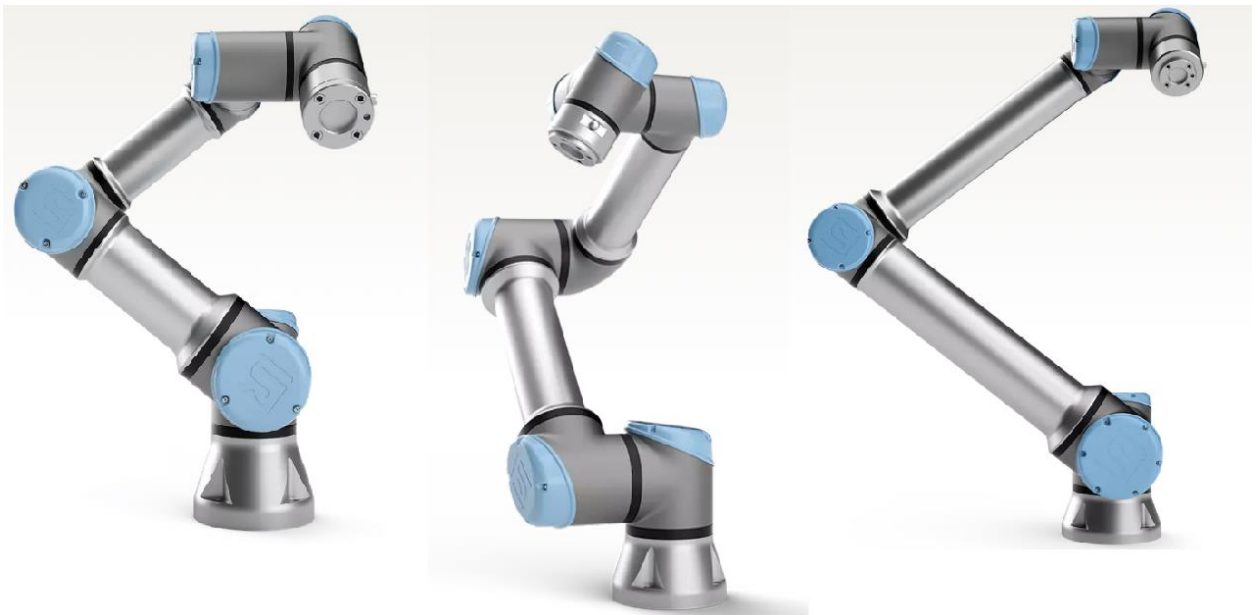


Рисунок 1.1 – Маніпуляційні пристрої UR3, UR5, UR10

Всі ці моделі мають 6 ступенів свободи. Universal-Robots виробляє тільки кутові переміщення. Роботи-маніпулятори розподілено на класи, що залежать від граничного допустимого корисного навантаження також іншими відмінностями є радіус робочої зони, вага та діаметр робочої основи.

Основою перевагою даної серії є проста мова програмування, що дає змогу операторам, що не володіють спеціальними навичками, швидко їх налаштувати. Програмування відбувається шляхом серії простих пересувань робочого органу маніпулятора в необхідні положення, або ж натисканням стрілок у програмі на планшеті [2].

У якості використання роботів-маніпуляторів у медицині слід розглянути робота-хірурга Da Vinci. Він є системою для хірургічних втручань, що використовує роботизовані маніпулятори. Основою метою даного робота є забезпечення більш точного та стабільного інструментарію для проведення операцій. Цей робот-хірург був розроблений американською компанією Intuitive Surgical (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Da Vinci

Da Vinci складається з консолі для хірурга та роботизованих маніпуляторів, що вмонтовано в хірургічний стіл. Хірург має змогу керувати роботом за допомогою консолі. Ця система надає хірургу можливість використовувати точні рухи, що особливо важливо при операціях, де необхідно уникнути пошкоджень навколишніх тканин. Хірург отримує зображення робочого поля за допомогою спеціальних камер, що встановлено в хірургічному інструменті. Da Vinci використовується для найрізноманітніших видів хірургічних втручань, включаючи видалення пухлин, реконструкцію органів та інші процедури [3].

У якості використання роботів-маніпуляторів у службовій сфері слід розглянути робота KUKA KR AGILUS, що був розроблений німецькою компанією Kuka. Це робот з шістьма ступенями свободи, що призначений для використання в промисловості. Він відомий своєю точністю та швидкістю [4].

На рис. 1.3 зображено KUKA KR AGILUS:



Рисунок 1.3 – Робот-маніпулятор KUKA KR AGILUS

Цей робот може використовуватися для різноманітних завдань, включаючи збирання, монтаж, пакування та обробку матеріалів. Крім того, він має компактну конструкцію, що дозволяє використовувати його в обмежених просторах.

KUKA KR AGILUS є одним з прикладів високотехнологічного промислового робота-маніпулятора, який знаходить широке застосування в автоматизованих виробничих лініях та інших промислових областях.

Розглянемо Clearpath Robotics Husky у якості прикладу мобільного маніпулятора. Clearpath Robotics Husky - це мобільна роботизована платформа з маніпулятором, розроблена компанією Clearpath Robotics. Цей робот призначений для використання в дослідницьких та промислових цілях.

На рисунку 1.4 зображено Clearpath Robotics Husky:



Рисунок 1.4 – Clearpath Robotics Husky

Husky має колісну платформу, що дозволяє йому переміщатися в різних середовищах, включаючи нерівні та складні терени. Він оснащений маніпулятором, який дозволяє виконувати різноманітні завдання, такі як підйом та переміщення об'єктів [5].

Цей робот широко використовується в дослідницьких проектах, де потрібна комбінація мобільності та здатності до маніпулювання об'єктами. Він може використовуватися для вибору та перевезення предметів у важкодоступних або небезпечних умовах.

Clearpath Robotics Husky є одним з прикладів мобільного робота-маніпулятора, який знаходить застосування в дослідженнях, а також в промисловості та логістиці.

### 1.3 Аналіз методів позиціонування та їх вплив на точність

Методи поцінування в робототехніці можуть значно впливати на точність та швидкість руху робота. Основні методи:

а) Відкриті петлі керування (Open-loop control). Відкриті петлі керування використовуються для виконання простих завдань, де немає потреби в постійному відстеженні позиції. Рух відбувається заздалегідь спланованим чином без зворотного зв'язку при цьому точність даного методу низька, адже немає можливості корегувати рух під час виконання завдання, точність залежить від точності попереднього планування. Швидкість є потенційно високою, бо немає затримок на зворотній зв'язок та корекцію;

б) Закриті петлі керування (Closed-loop control). Закриті петлі керування використовують зворотній зв'язок для постійного відстеження позиції та корекції руху в реальному часі. Це дозволяє коригувати рух у разі виникнення похибок. Точність даного методу досить висока, адже зворотній зв'язок дозволяє негайно реагувати на похибки та корегувати рух, що покращує точність. Швидкість на відміну від першого методу є потенційно нижчою,

адже відкритим петлям через зворотній зв'язок потрібен додатковий час на зворотній зв'язок та корекцію;

в) Гібридні системи керування. Гібридні системи комбінують відкриті та закриті петлі керування. Наприклад може використовуватись відкрита петля для грубого позиціонування, а закрита для точної корекції. Точність залежить від конвертної конфігурації, відправлення може бути точнішим завдяки корекції, але це може займати більше часу. Залежність від конкретної конфігурації може бути комбінаціями швидкості відкритої та точності закритої петлі.

Вибір типу приводу (наприклад, електричний, пневматичний, гідравлічний) суттєво впливає на точність та швидкість руху робота. Кожен тип приводу має свої переваги та обмеження.

Електричний привід зазвичай має високу точність та можливість швидкого реагування на команди керування, але швидкість може бути обмежена механічними характеристиками.

Гідравлічний привід забезпечує високу силу, але може мати меншу точність та швидкість у порівнянні з електричним приводом.

Пневматичний привід швидший за гідравлічний, але може мати меншу точність та силу.

Динаміка системи та маса об'єкта значно впливає на можливості позиціонування. Важке навантаження вимагає потужний привід та більшу точність в системі керування, тобто сильніший привід та більш точну систему керування для стабільного позиціонування, а відповідно при легкій масі дозволити швидке та менш точне позиціонування.

Вплив зовнішніх факторів, таких як терміновості завдань, умов оточуючого середовища (наприклад, наявність вібрацій та впливу вітру), можуть суттєво впливати на точність та швидкість руху. Терміновість у вимушених ситуаціях може бути необхідним скорегувати швидкість руху за рахунок точності, або уникнути пошкодження або небезпеки. Наявність

вібрацій або сильного впливу вітру може вимагати додаткових заходів для забезпечення точності.

Вплив методів позиціонування на точність та швидкість руху робота дуже значущий. Вирішення цих завдань вимагає комплексного підходу, обміркування впливу кожного чинника, врахування вимог конкретного завдання та можливостей обраної технічної конфігурації.

#### 1.4 Огляд сучасних методів автоматички в робототехніці

Існує п'ять основних методів автоматички в робототехніці, що представлено на рисунку нижче. На рис. 1.5 основні методи автоматички в робототехніці.

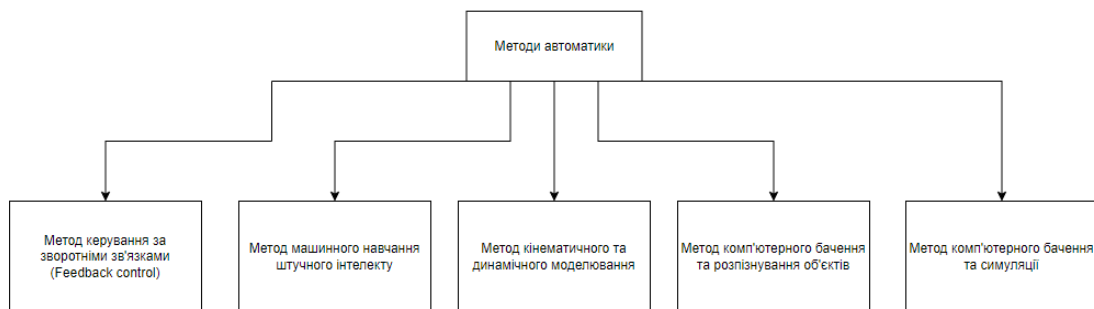


Рисунок 1.5 – Методи автоматички в робототехніці

Метод керування за зворотніми зв'язками (Feedback Control). Цей метод використовує зворотній зв'язок від датчиків для того щоб коригувати керуючий сигнал та управляти поведінкою робота. Датчики збирають інформацію про поточний стан системи та передають її контролеру. Контролер обробляє цю інформацію та вирішує, як коригувати керуючий сигнал для досягнення бажаного результату. Застосовується в різних галузях, включаючи промислових роботів та автономних транспортних засобах і медичних роботах.

Методи машинного навчання та штучного інтелекту. Ці методи використовують алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту для навчання роботів вирішувати завдання на основі великої кількості даних. Робот навчається на прикладах або на основі великої кількості симульованих сценаріїв, де йому надаються вхідні дані та очікувані вихідні результати. Застосовується в автономних транспортних засобах, роботах для обробки даних на розпізнавання об'єктів, а також у сферах штучного зору та обробки природної мови.

Методи кінематичного та динамічного моделювання. Ці методи використовують математичні моделі, щоб описати рухи та поведінку робота. Рух та поведінка робота описується рівняннями, які враховують кінематичні та динамічні властивості систем. Використовуються для проектування та аналізу рухомих систем, таких як маніпулятори та мобільні роботи.

Методи комп'ютерного бачення та розпізнавання об'єктів. Використання камер та сенсорів для збору інформації про навколишнє середовище та обробки інформації для прийняття рішень. Камери та сенсори збирають зображення або дані про навколишнє середовище, алгоритми обробляють ці дані для визначення об'єктів та їх характеристик. Застосовуються в мобільних роботах, автономних транспортних засобах та в інших ситуаціях, де необхідно розпізнавати об'єкти в навколишньому середовищі.

Методи віртуального середовища та симуляції. Використання віртуальних середовищ та симуляції для тестування та навчання роботів у безпечних умовах. Робот працює у віртуальній обстановці, що дозволяє проводити тести без ризику пошкоджень або втрат. Застосовується для навчання та тестування автономних систем, особливо в сферах автономної навігації та штучного інтелекту.

Ці методи представляють різноманітні підходи до автоматизації та керування роботами у сучасній робототехніці. Кожен з них має свої переваги та використовується залежно від конкретних завдань та вимог системи.

Для досліджень було обрано методи кінематичного та динамічного моделювання.

### 1.5 Аналіз застосування ПД регулятора для позиціонування маніпуляторів

Провівши аналіз усіх представлених робіт маніпуляторів, що використовуються у різних сферах автоматичної роботи, постала проблема підвищення точності позиціонування. Найбільш надійним та розумним рішенням є використання ПД-регуляторів для підвищення точності позиціонування маніпуляторів. Тобто правильне налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора дасть змогу більш точно позиціонувати маніпулятор.

Маніпулятори є ключовими компонентами в робототехніці, використовуються для виконання різноманітних завдань, включаючи монтаж, обробку матеріалів, пакування та багато інших. Ефективне позиціонування маніпуляторів є критично важливим для досягнення точності та надійності в роботі.

Підстава ПД-регулятора (пропорційний, інтегральний, диференціальний) лежить в його можливості враховувати не тільки поточний стан системи, а й історію та швидкість змін.

До переваг використання ПД-регуляторів можна віднести:

- висока точність позиціонування, комбінація пропорційного, інтегрального та диференціального компонентів дозволяє досягти високої точності в управлінні та позиціонуванні;

- стійкість до збуджень: завдяки інтегральному та диференціальному компоненту ПД-регулятор може компенсувати збудження та шуми у системі;

– широкий спектр застосування: ПД-регулятори можна успішно використовувати в різних сферах, включаючи промисловість, автомобільну промисловість, медицину та інші.

До недоліків можна використання ПД-регуляторів можна віднести:

– необхідність налаштування коефіцієнтів: для кожного конкретного випадку необхідно підібрати оптимальні значення коефіцієнтів ПД-регулятора;

– чутливість до нелінійностей: ПД-регулятори можуть бути чутливими до нелінійностей у системі, що може призводити до неправильної роботи;

– потреба у високій якості вимірювальних пристроїв: точність вимірювань величин, яку регулюємо, має значення для успішної роботи ПД-регулятора.

Застосування ПД-регуляторів для позиціонування маніпуляторів складається з декількох алгоритмічних етапів. Для початку необхідно створити кінематичну модель. Ця модель описує взаємозв'язок між кутами суглобів та позицією ефектора.

Пряма та зворотня кінематики пряма дозволяє знаходити позицію та орієнтацію кінцевого ефектора в просторі при заданих кутах суглобів. Зворотня кінематика, навпаки, дозволяє знаходити необхідні кути суглобів для досягнення бажаної позиції ефектора.

Поточна похибка та змінна похибка. У керуванні позиціонуваннями використовується принцип зворотної зв'язки датчики надають поточну інформацію про позицію ефектора, яка порівнюється з бажаною позицією. Похибка – різниця між ними. Пропорційна складова в ПД-регуляторі корегує сигнал пропорційна до поточної похибки. Це означає, що чим більша похибка, тим сильніше буде вплив на керування. Інтегральна складова накопичує похибки протягом часу та коригує керування відповідно. Це допомагає усунути статистичну помилку. Диференційна складова реагує на швидкість зміни похибки. Це допомагає уникнути перевищення та вибухів у керуванні.

Налаштування ПД-регуляторів. Налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора є важливим кроком. Вони повинні бути добре підібрані для конкретної системи, щоб досягти оптимального позиціонування. Часто налаштування виконується експериментальним шляхом, де спостерігається реакція системи на різні значення коефіцієнтів.

Використання ПД-регулятора для позиціонування маніпуляторів є ефективним методом, який дозволяє досягти високої точності та надійності у керуванні рухом маніпуляторів. Однак, для успішної роботи, важливо правильно налаштувати коефіцієнти ПД-регулятора та забезпечити високу якість вимірювань.

## 1.6 Висновки до першого розділу

В результаті виконання першого розділу магістерської кваліфікаційної роботи проведено аналіз предметної області та технічного завдання. Розглянуто основні сучасні методи автоматичного керування в робототехніці у даній роботі було використано метод керування за зворотніми зв'язками та методи кінематичного та динамічного моделювання. Також було проведено аналіз переваг та недоліків ПД регуляторів.



Необхідну позицію зобразимо як радіус вектор  $\vec{r}$ . Через те, що позиція робочого тіла нам відома то необхідно щоб фланцева точка опинилась в потрібному місці, що є вказаним як  $\vec{r}$ . Цей вектор розраховується як  $\vec{R}$  проведеного до кінцевої точки РО, вектора його орієнтації  $\vec{v}_0$ , відносно базової системи координат:

$$\vec{r} = \vec{R} - \vec{v}_0 \quad (2.1)$$

Далі розглянемо перехід фланцевої точки в потрібне положення. Воно здійснюється за рахунок поворотів ланок  $a$  і  $b$  в шарнірах А,В,С. У точку шарніру В помістимо початок базової системи координат. Вісь обертання шарніра А спрямовано уздовж осі Z, осі В та С спрямовано перпендикулярно Z. Для того щоб розв'язати обернену задачу кінематики необхідно використати геометричний підхід. З геометрії можна побачити, що вектор дорівнює сумі векторів ланок  $\vec{a}$  та  $\vec{b}$ . Кути  $\theta$ ,  $y_1$  та  $y_2$  – це кути повороту ланок А,В та Z.

Розглянувши трикутник, що обмежено векторами  $\vec{r}$ ,  $\vec{a}$  та  $\vec{b}$  по теоремі косинусів можна знайти кути  $\alpha$  та  $\beta$ . Нехай довжини векторів будуть дорівнювати:

$$|\vec{r}| = r \quad |\vec{a}| = a \quad |\vec{b}| = b \quad (2.2)$$

Тоді за допомогою теореми косинусів виразимо кути  $\alpha$  та  $\beta$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a^2 + r^2 - b^2}{2ar}\right) \quad \beta = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - r^2}{2ab}\right) \quad (2.3)$$

Поглянувши на геометричну схему можна побачити що:

$$\theta = \arctan = \left(\frac{r_y}{r_x}\right) \qquad \theta = \arctan = \left(\frac{r_z}{r}\right) \qquad (2.4)$$

Відповідно:

$$y_1 = w + a \qquad y_2 = 180^0 - \beta \qquad (2.5)$$

Перемістивши фланцеву точку в необхідне положення слід правильно зорієнтувати робочий орган. Для того щоб зробити це необхідно знати координати вектора  $\vec{v}$  відносно до фланцевої точки.

$$E' = [\vec{x}\vec{y}\vec{z}] \qquad (2.6)$$

Вектор  $\vec{x}'$ , що є спрямовано по ланці  $b$ , вектор  $\vec{y}'$  - уздовж шарнірного з'єднання  $f1$ . Для того щоб знайти базис  $E'$  слід спочатку визначити матрицю переходу від базової системи координат та локальної системи координат. Цю матрицю можна отримати шляхом комбінації поворотів на шарнірах  $A, B$  та  $C$ :

$$E' = CE_0 \qquad (2.7)$$

де

$$C = R_C R_B R_A \qquad (2.8)$$

Через те що матриця  $E_0$  одинична, тоді

$$E' = C = R_C R_B R_A \quad (2.9)$$

Для того щоб перемістити робоче тіло в задану позицію, необхідно зробити поворот що дорівнює кутам  $\varphi_1$  та  $\varphi_0$ .

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{v_y}{v_z}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{v_y^2 + v_z^2}}{V}\right) \quad (2.10)$$

де  $V = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$  – це довжина робочого органу,  
 $v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$  – це координати вектора  $\vec{v}$

Відповідно за допомогою цих розрахунків можна досить швидко переходити від лінійних координат до кутів поворотів сервоприводів, тобто таким чином керування маніпулятором може стати значно легшим .

Перед тим як приступити до створення CAD-моделі маніпулятора у програмному забезпеченні Simulink, слід спочатку створити кінематичну модель маніпулятора на якій можна побачити, з яких частин буде складатися маніпулятор (рис 2.2).

З рисунку 2.2 можна побачити що маніпулятор складається з двох суглобів, що позначено на рисунку як Shoulder та Elbow, рухомої бази, що позначено як Base та безпосередньо руки маніпулятора, що позначено як Forearm.

Після побудови кінетичної моделі, було побудовано ескіз моделі маніпулятора, що необхідний для побудови моделі у Simulink. На цій моделі можна побачити розміри кожного з елементів та розрахувати положення цих елементів у просторі x,y,z, що не необхідним під час побудови моделі.

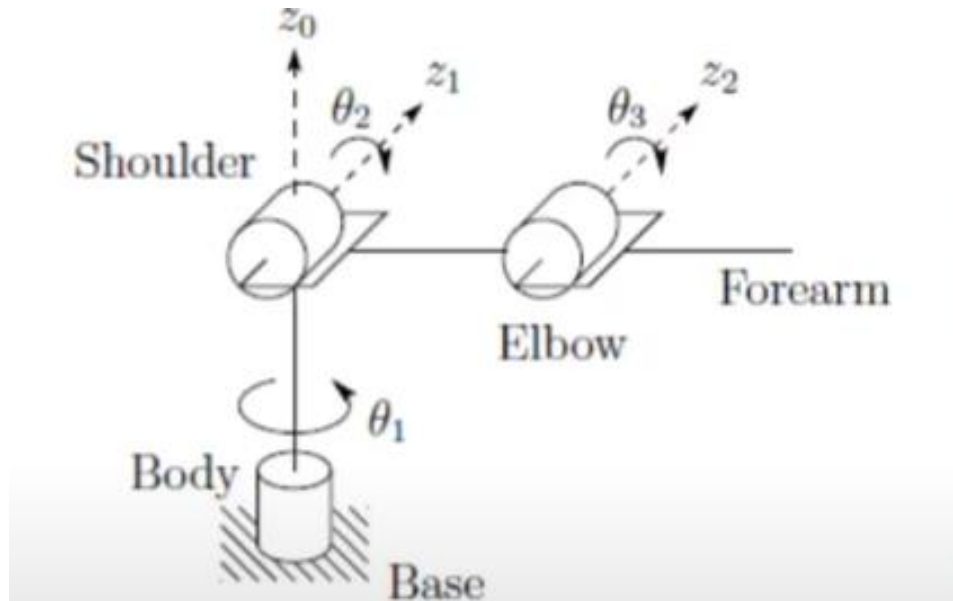


Рисунок 2.2 – Кінематична модель маніпулятора

## 2.2 Створення моделі маніпулятора у Simulink

На рис. 2.3 подано ескіз маніпулятора.

Для побудови моделі маніпулятора роботу використовувалися такі елементи з бібліотеки Simulink:

- word frame – цей блок представляє глобальну систему відліку в моделі. Ця рамка є інерційною і знаходиться в стані абсолютного спокою;
- rigid transform – цей елемент використовується для розташування просторі елементу solid, якому ми можемо придати форму;
- revolute Joint – цей елемент відповідає за симуляцію рухомих суглобів маніпулятора;
- weld joint – цей елемент є імітацією захвату маніпулятора;
- the mechanism configuration block – визначає параметри сили тяжіння та моделювання механізму, до якого підключається блок.

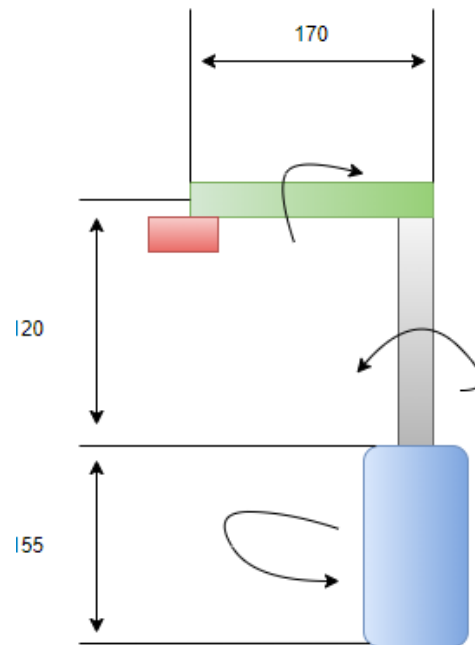


Рисунок 2.3 – Ескіз маніпулятора робота

Почнемо зі створення моделі бази робота маніпулятора та виставимо відповідні розміри для цього елемента (рис. 2.4, рис. 2.5).

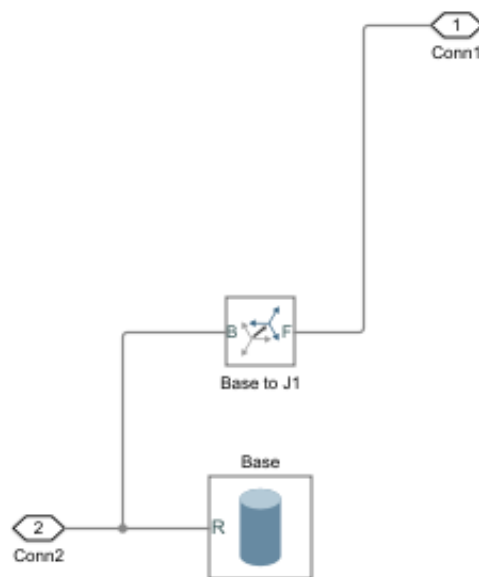


Рисунок 2.4 – Схема елемента бази робота

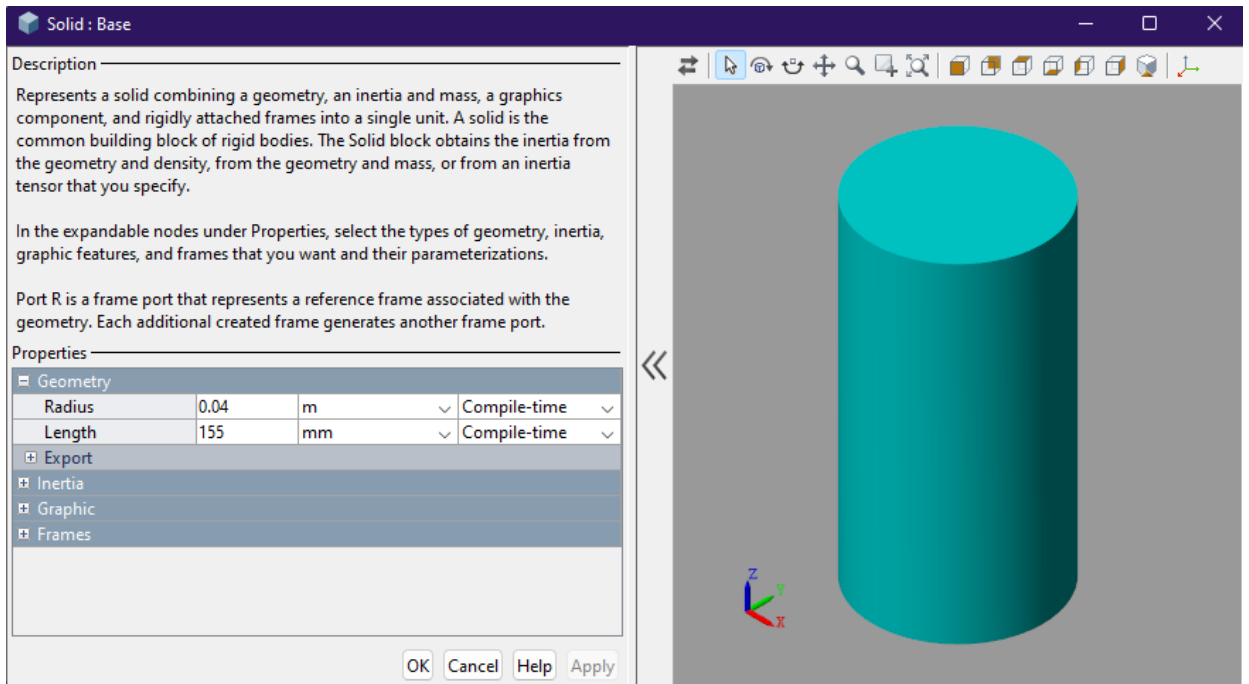


Рисунок 2.5 – Визначення розмірів бази робота

Наступним кроком буде додання елемента Revolute Join 1, що відповідає за рух бази робота, та наступної частини робота маніпулятора, яка називається Link1 та проставляємо необхідні розміри цього елемента (рис. 2.6, рис. 2.7).

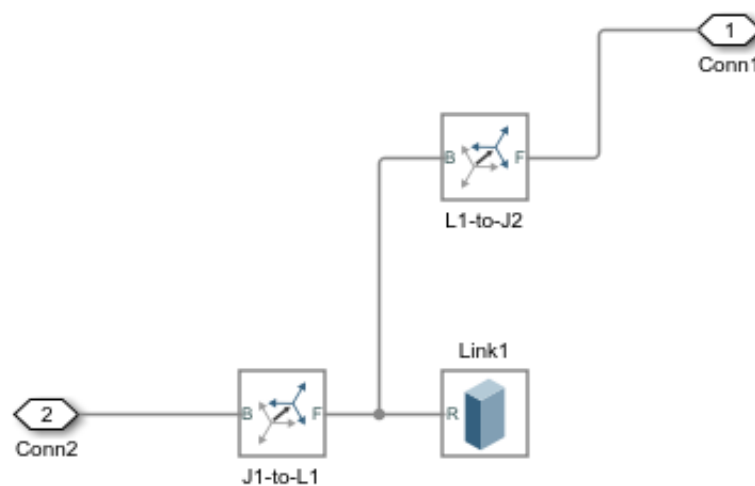


Рисунок 2.6 – Схема елемента Link1

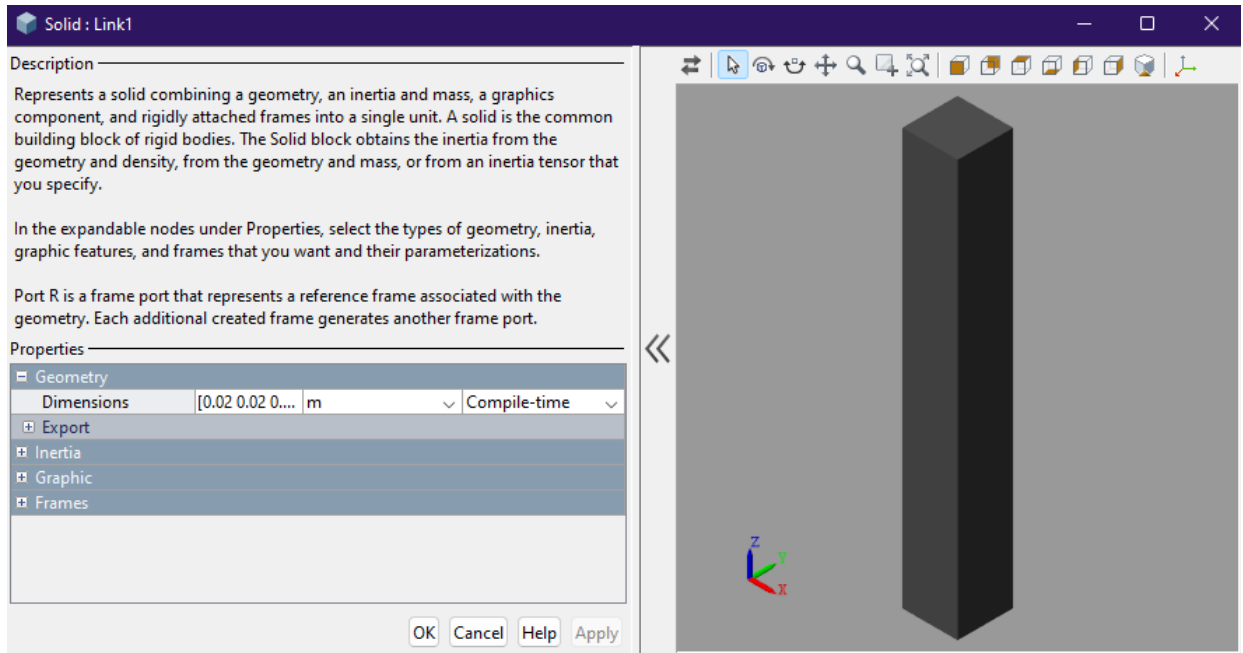


Рисунок 2.7 – Визначення розмірів елемента Link1

Наступним кроком буде додання елемента Revolute Join 2, що відповідає за рух суглобу між елементами Link1 та Link2, та наступної частини робота маніпулятора, яка називається Link2 та проставляємо необхідні розміри цього елемента (рис. 2.8, рис. 2.9).

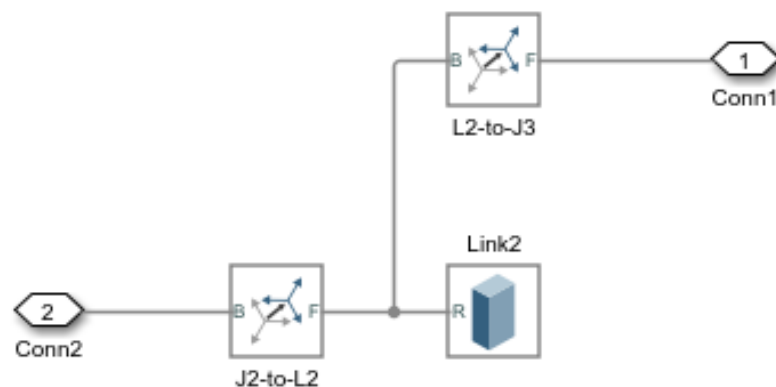


Рисунок 2.8 – Схема елемента Link2

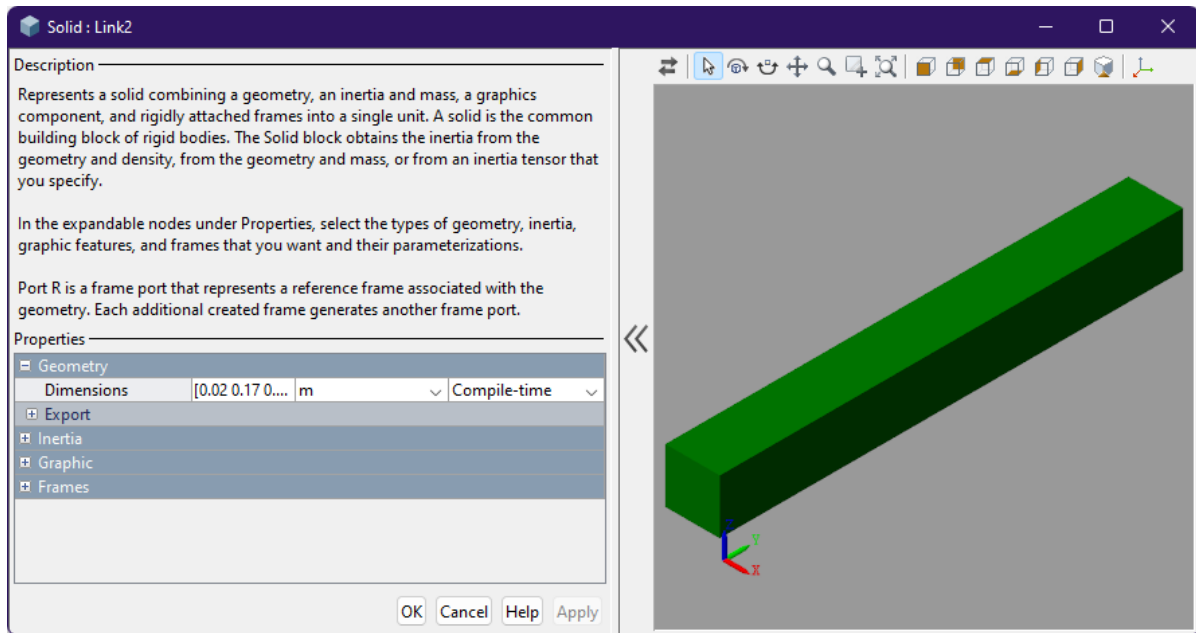


Рисунок 2.9 – Визначення розмірів елемента Link2

Наступним кроком буде додання елемента Revolute Join 3, що відповідає за рух суглобу між елементами Link2 та Link3, та наступної частини робота маніпулятора, яка називається Link3 та проставляємо необхідні розміри цього елемента (рис. 2.10, рис. 2.11).

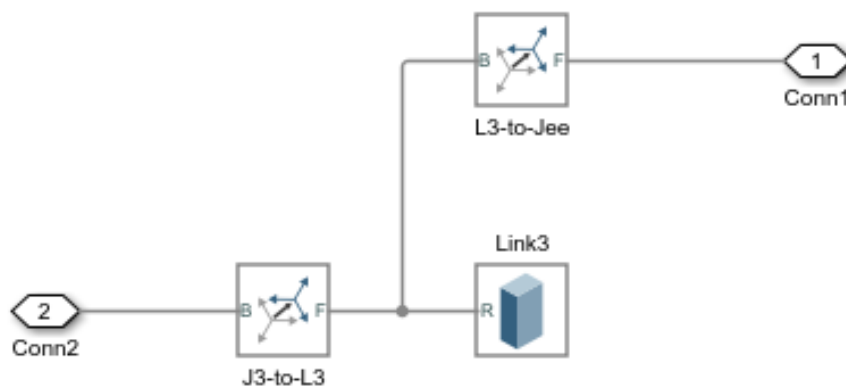


Рисунок 2.10– Схема елемента Link3

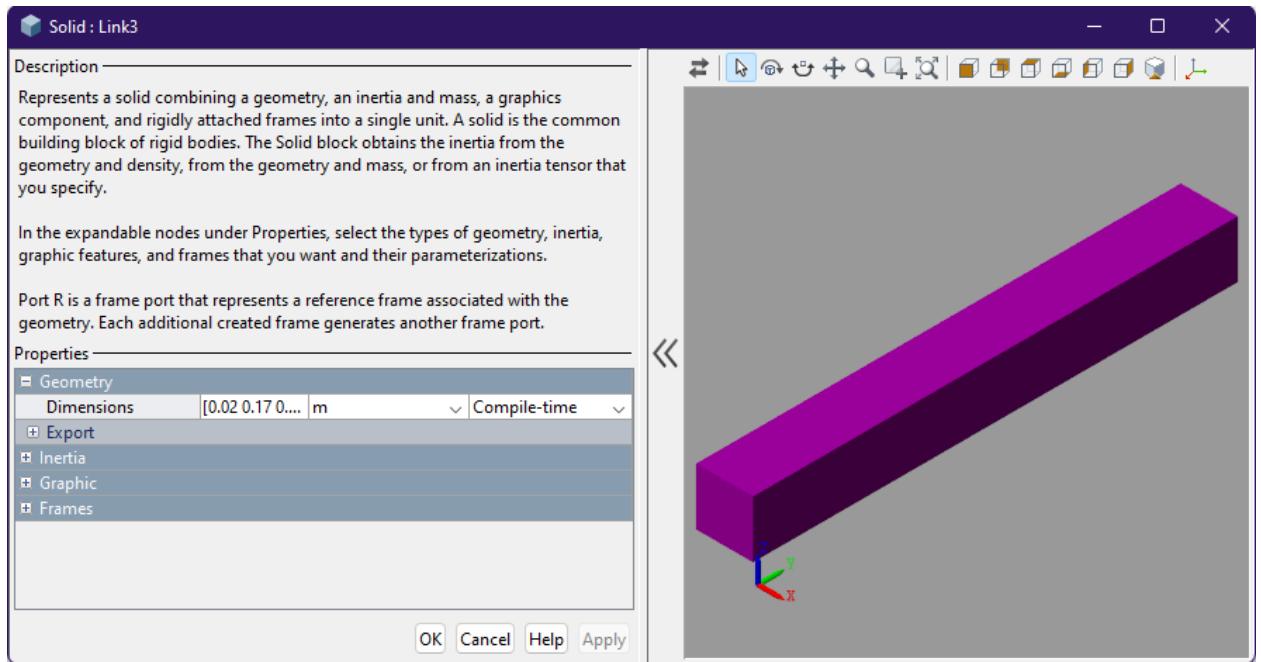


Рисунок 2.11 – Визначення розмірів елементу Link3

Далі слід додати елемент Jee, що поєднує Link3 з маніпулятором робота та визначити його розміри (рис. 2.12, рис. 2.13).



Рисунок 2.12 – Схема елементу маніпулятора

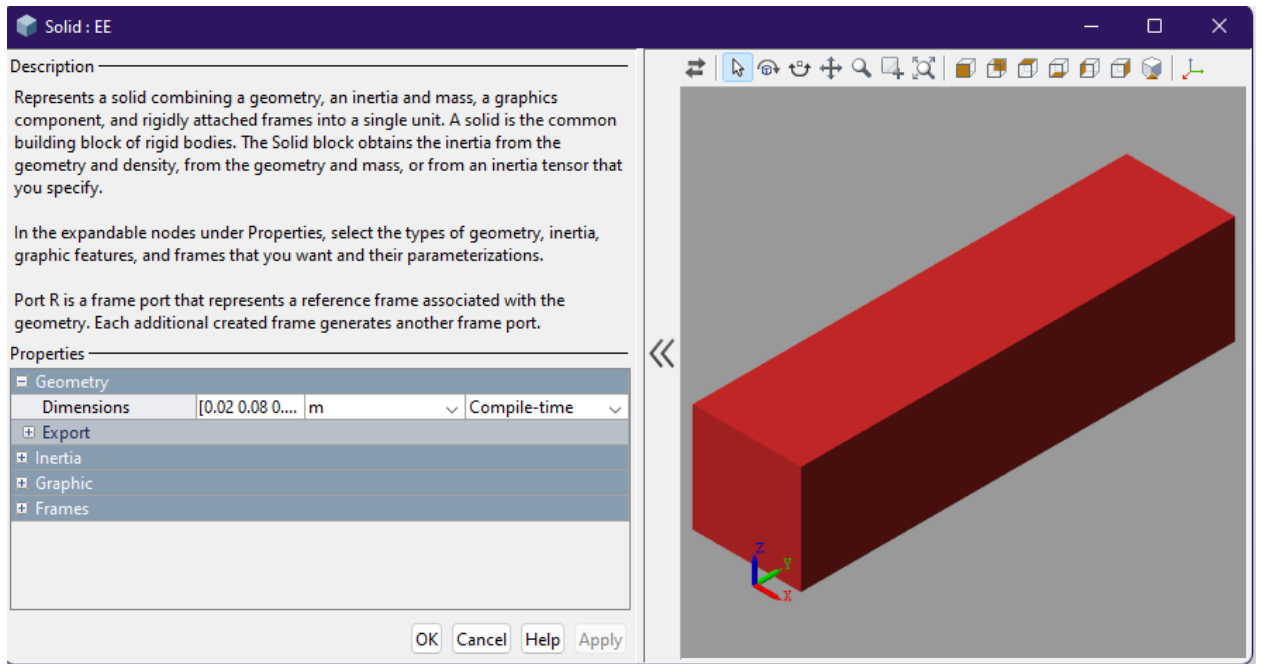


Рисунок 2.13 – Визначення розмірів елемента маніпулятора

Таким чином, на рис. 2.14 представлена модель маніпулятора, побудована у Simulink.

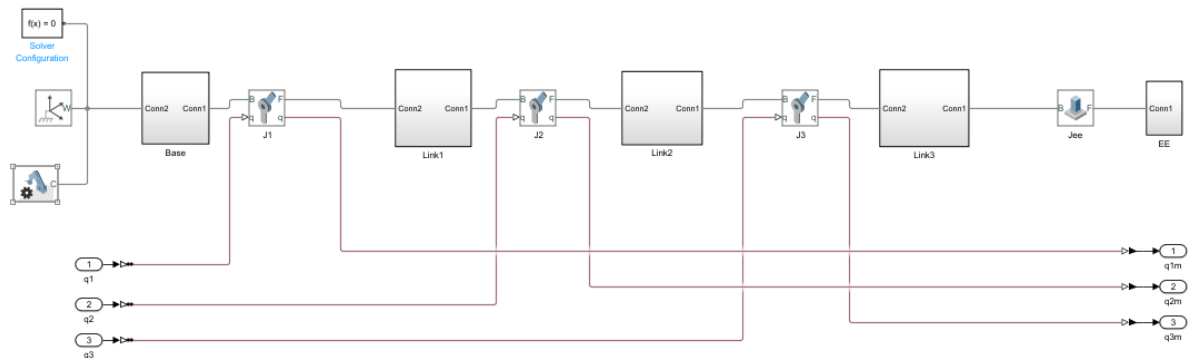


Рисунок 2.14 – Модель маніпулятора робота, побудована у Simulink

Після побудови моделі за допомогою пакету Simulink було виконано симуляцію її роботи (рис 2.15).

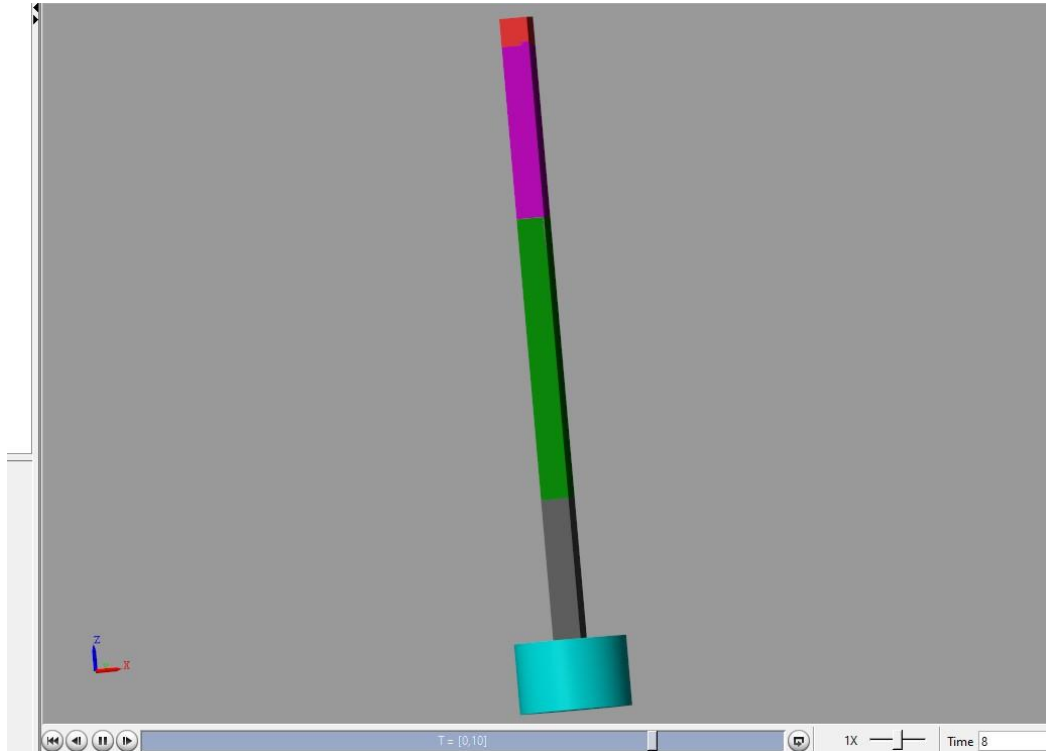


Рисунок 2.15 – CAD-модель маніпулятора

### 2.3 Забезпечення руху маніпулятора за допомогою динамічної ланки

Після створення CAD-моделі маніпулятора слід додати динамічний закон, що дасть змогу маніпулятору рухатися. Для цього було створено додаткове звено, що складається з блоків Get Transform та Coordinate Transformation Conversion.

Блок Get Transform повертає однорідне перетворення між каркасами тіла на моделі дерева твердого тіла.

Блок Transformation Conversion перетворює перетворення координат із вхідного подання на вказане вихідне подання.

На рис. 2.16 подано схему додаткового динамічної ланки.

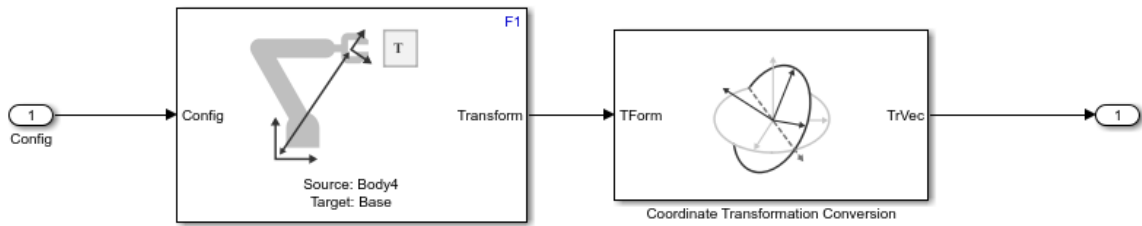


Рисунок 2.16 – Динамічна ланка

Після чого було додано блок Signal Editor, за допомогою якого можна подавати унікальні сигнали на окремі рухомі частини маніпулятора тобто на його суглоби. У блоці Signal Editor було створено сценарій: створено три сигнали, що окремо подаються на кожен з суглобів маніпулятора рис. 2.17.

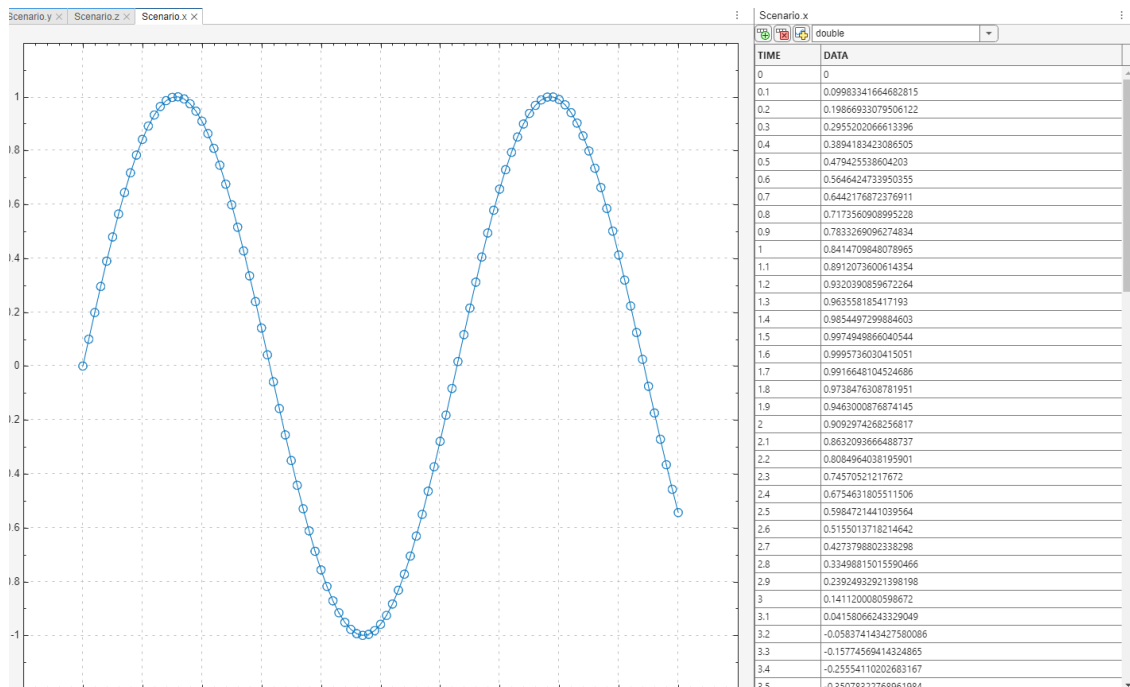


Рисунок 2.17 – Сигнали, що подаються на суглоби маніпулятора

На рис. 2.18 подано схему з динамічною ланкою та блоком Signal Editor

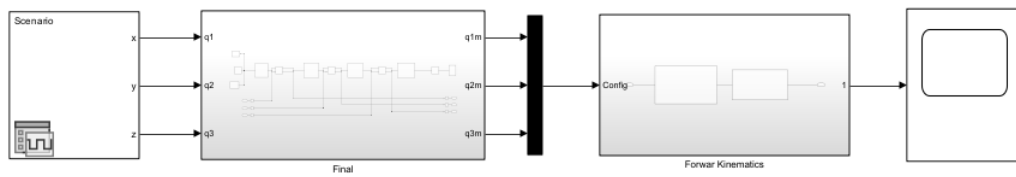


Рисунок 2.18 – CAD модель за динамічною ланкою та блоком Scenario

На рис. 2.19 - 2.21 подано результати руху маніпулятора

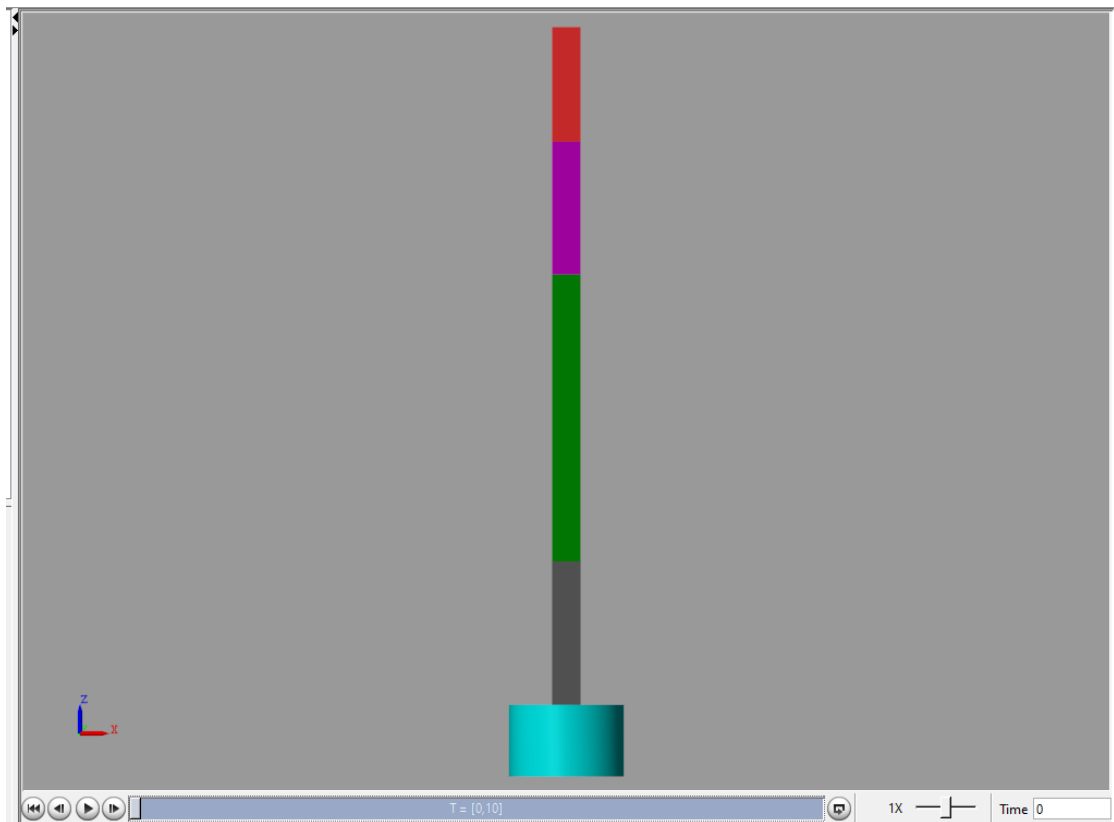


Рисунок 2.19 – Початкове положення маніпулятора

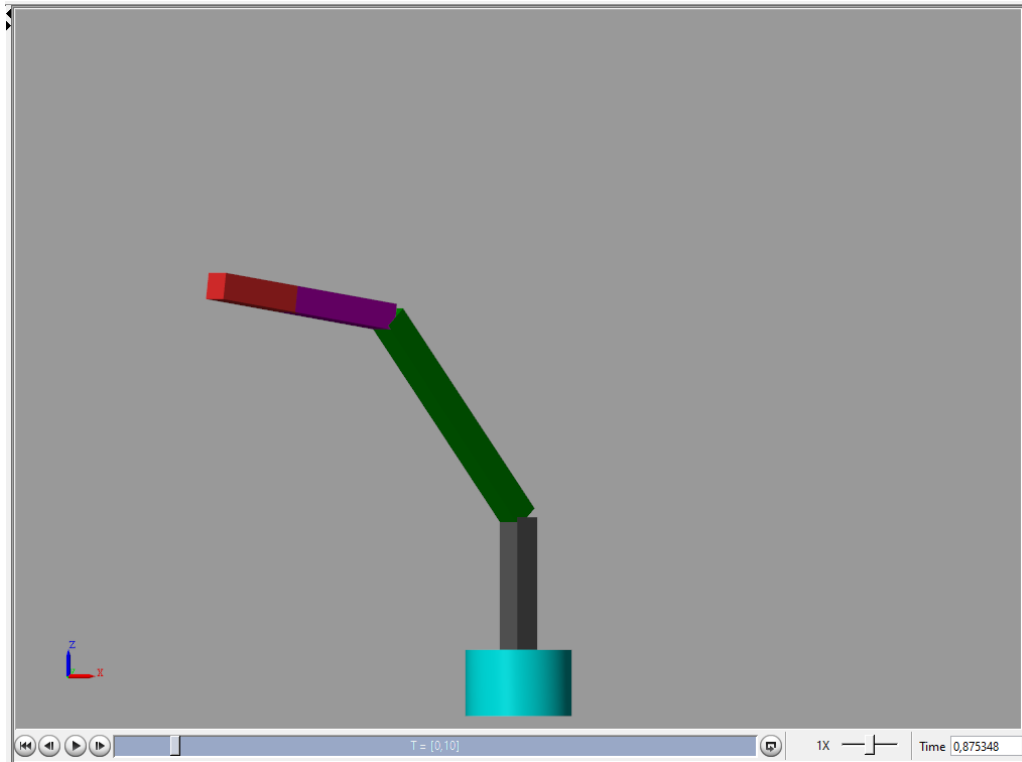


Рисунок 2.20 – Проміжне положення маніпулятора

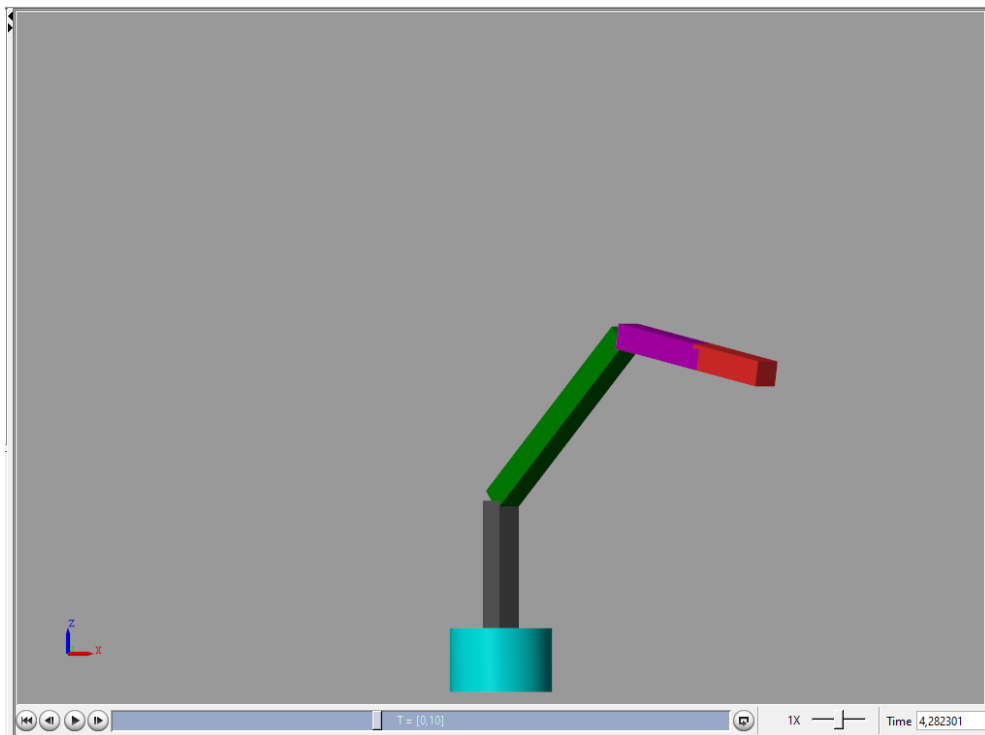


Рисунок 2.21 – Кінцеве положення маніпулятора

За допомогою блоку Score можна побачити сигнали, що подаються для керування маніпулятором з блоку Signal Editor (рис 2.22). Синя лінія – сигнал, що подається на базу маніпулятора. Жовта лінія – сигнал, що подається на перший суглоб та червона лінія – сигнал що подається на другий суглоб (рис.2.22).

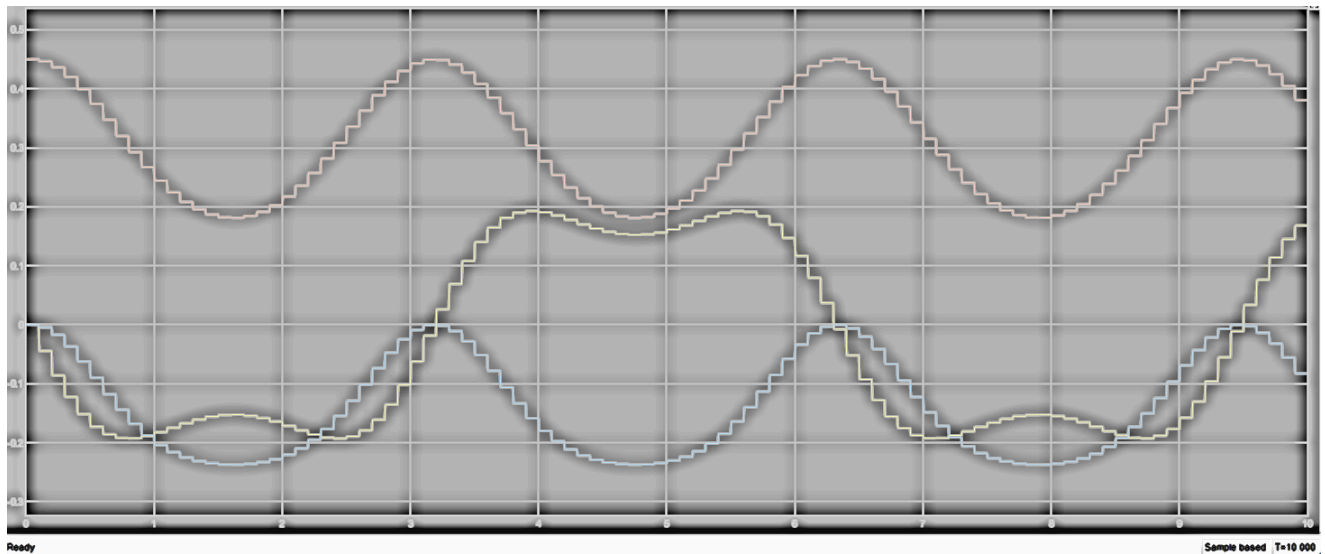


Рисунок 2.22 – Графік з блоку Score

#### 2.4 Висновки до другого розділу

В результаті виконання другого розділу магістерської кваліфікаційної роботи проведено розрахунок прямої та зворотної кінематики за рахунок створення геометричної та кінематичної схем маніпулятора. Створено CAD модель робота маніпулятора у середі розробки Simulink та додано кінетичну ланку для перевірки моделювання створеної схеми.

### 3. ПОЗИЦІОНУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРА ЗА РАХУНОК ДОДАВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ

#### 3.1 Удосконалення схеми маніпулятора

Перед тим як додавати до схеми ПД-регулятори слід відповідно змінити налаштування елементів САД моделі робота маніпулятора, що було побудовано до цього.

Почнемо з налаштування суглобів маніпулятора, за них у схемі відповідає блок Revolute Joint. Цей блок обмежує рух двох довільних фреймів, які з'єднуються з базовим і слідкуючим фреймами з'єднувача, чистим обертанням навколо спільної осі. Ось обертання вирівнюється зі z-осі базового фрейму з'єднувача. Базовий і слідкуючий фрейм мають спільну точку початку та z-осі, і слідкуючий фрейм обертається навколо z-осі.

Для вказівки початкового стану для примітиву з'єднувача використовуються параметри під "State Targets" (цілі стану). Ці цілі вказуються в базовому фреймі. Також ви можете встановлювати рівні пріоритету для цілей. Якщо з'єднувач не може задовольнити всі цілі стану, рівень пріоритету визначає, які цілі вирішувати першими і наскільки точно.

Для моделювання демпфування та пружинного поведінки для примітиву з'єднувача використовуються параметри під "Internal Mechanics" (внутрішня механіка). Вказуються параметри "Damping Coefficient" для моделювання втрат енергії та параметр "Spring Stiffness" для моделювання зберігання енергії. З'єднуючі пружини намагаються відхилити примітив з'єднувача від його рівноважного положення. Демпфери діють як елементи втрати енергії. Пружини та демпфери є строго лінійними.

Для вказівки обмежень примітиву з'єднувача використовуються параметри під "Limits" (обмеження). Нижні та верхні межі визначають ширину

вільної області. Блок застосовує силу для прискорення положення з'єднувача назад до вільної області, коли положення виходить за межі. Блок використовує згладжений метод пружини-демпфера для обчислення сили.

Параметри "Force", "Torque" та "Motion" в розділі "Actuation" (активація) визначають рух примітиву з'єднувача під час симуляції.

На рис. 3.1 подано налаштування для блоку Revolute Joint.

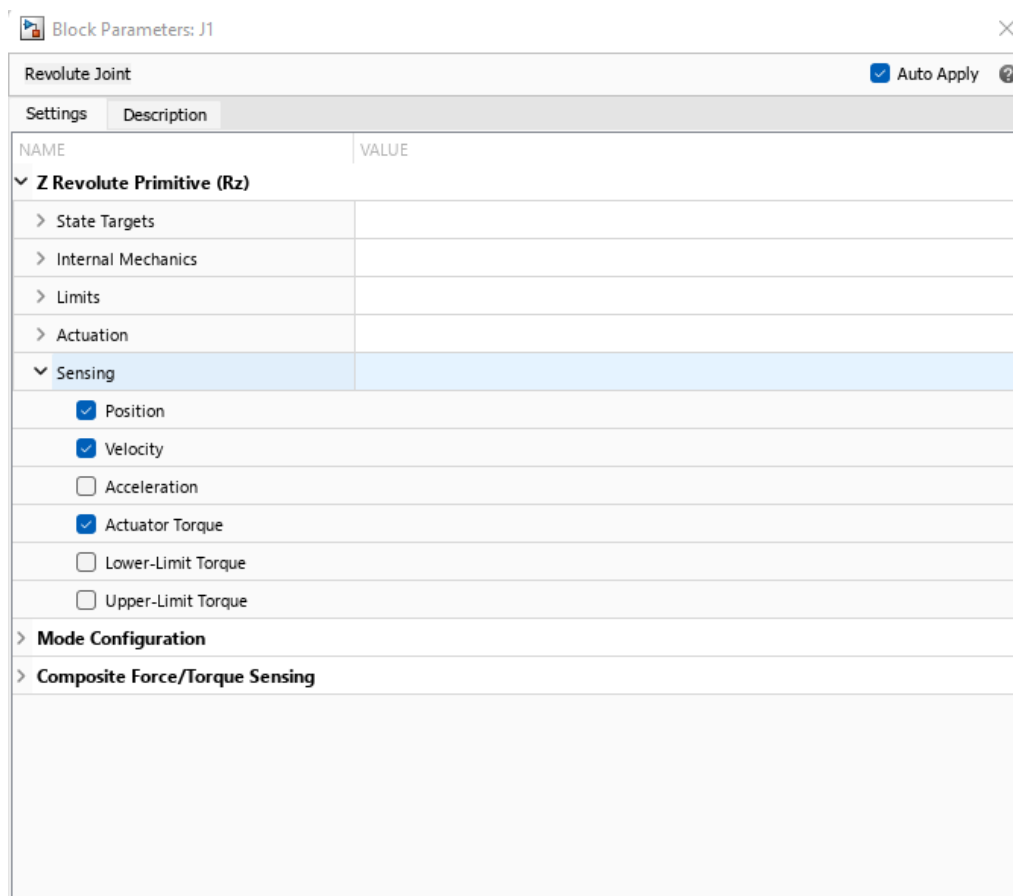


Рисунок 3.1 – Налаштування для блоку Revolute Joint

Для приладу на рис. 3.1 прийняті такі позначення:

Position – положення суглобу;

Velocity – швидкість суглобу;

Actuation – опція, що надає крутний момент активації.

Увімкнення цих параметрів додає відповідні порти до блоку Revolute Joint (рис.3.2).

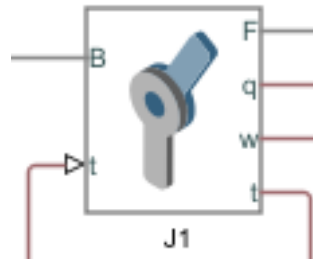


Рисунок 3.2 –Revolute Joint з налаштованим блоком Sensing

Відповідні налаштування слід застосувати для усіх трьох суглобів робота маніпулятора.

На рис. 3.3 подано схему підключення портів до CAD-моделі маніпулятора

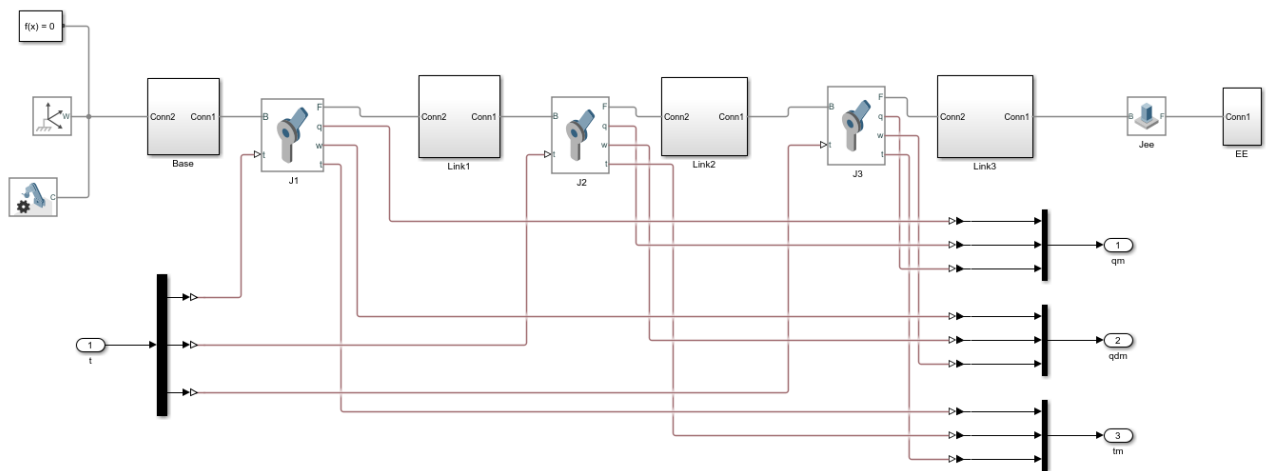


Рисунок 3.3 – CAD-модель маніпулятора за налаштованими портами

### 3.2 Додавання ПІД-регуляторів

За симуляцію ПІД регулятора у середовищі Simulink відповідає блок PID controller (рис.3.4).

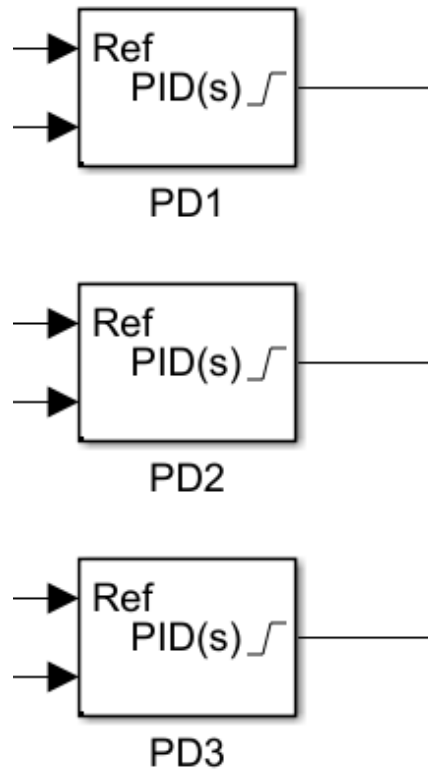


Рисунок 3.4 – Блок PID controller

Блок PID Controller в Simulink використовується для реалізації PID-регулятора (пропорційно-інтегрально-диференційного) для автоматичного керування системами в реальному часі. ПІД регулятор є популярним методом керування і використовується для забезпечення стабільного та точного керування різними процесами. Основні компоненти ПІД регулятора включають пропорційну, інтегральну та диференційну частини.

На рис. 3.5 подано базові налаштування блоку PID Controller

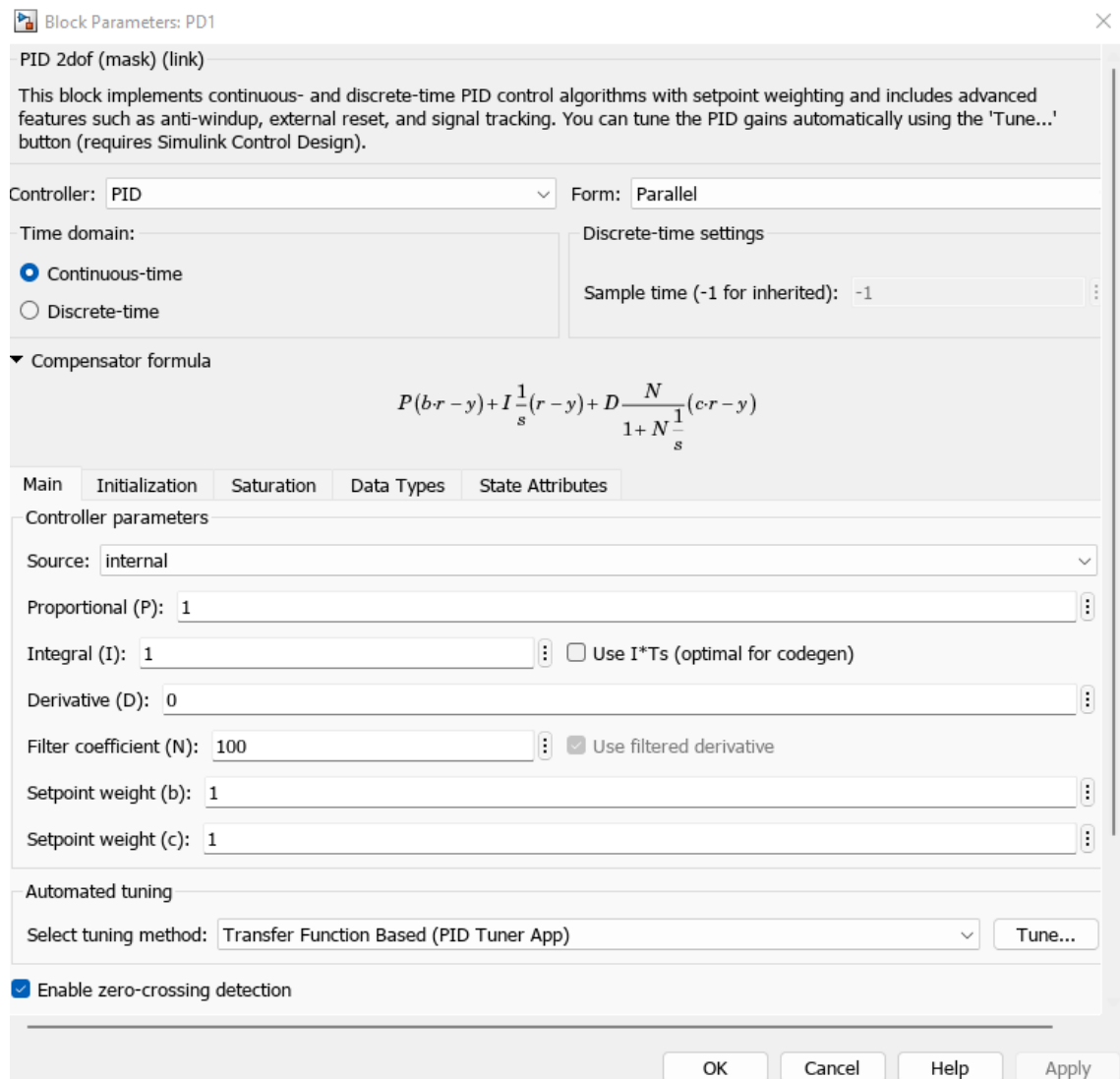


Рисунок 3.5 – Базові налаштування блоку PID Controller

Основні налаштування блоку PID Controller включають такі параметри:

– P (Пропорційна) Компонента: визначає частку відповіді на поточну помилку. Занадто велике значення може призвести до перерегулювання або нестійкості, тоді як занадто мале значення може призвести до довгої реакції на помилку;

– I (Інтегральна) Компонента: визначає частку відповіді на накопичену суму помилок в часі. Це дозволяє коригувати системні відхилення від референсного сигналу. Велике значення може призвести до реакції на дрібні помилки, але може також призвести до збільшення перерегулювання;

– D (Диференціальна) Компонента: визначає частку відповіді на швидкі зміни помилок. Це дозволяє уникати перерегулювання, зменшуючи реакцію на стрибкоподібні зміни;

– N (Filter Coefficient): визначає коефіцієнт фільтрації для інтегральної та диференціальної частин. Застосування фільтра може допомогти зменшити шуми та покращити стабільність регулятора;

– Anti-Windup: включає або виключає захист від перевищення для інтегральної частини;

– Initial Condition: визначає початкові умови для інтегральної частини.

До схеми слід додати три блоки PID controller відповідно до кожного рухомого суглобу робота маніпулятора.

На рис. 3.6 подано CAD-модель з доданими ПІД регуляторами.

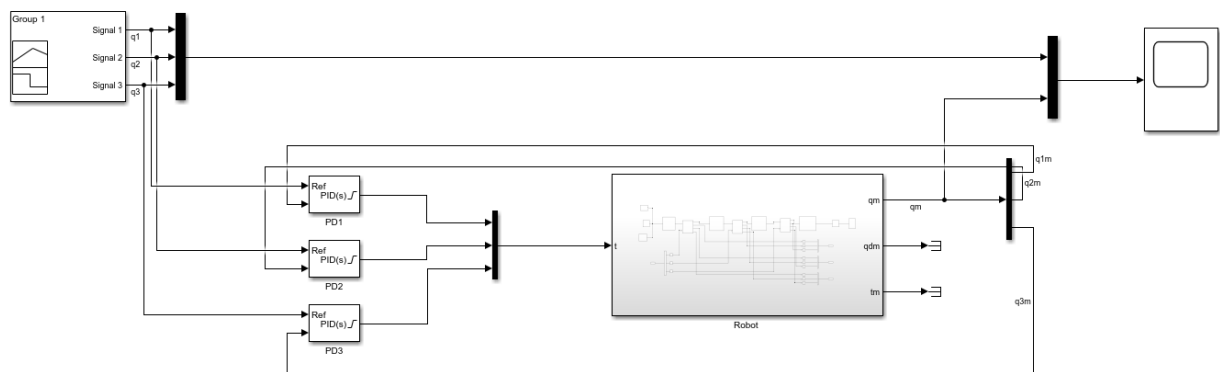


Рисунок 3.6 – CAD-модель робота маніпулятора

За допомогою блоку Signal Builder подається три крокуючих сигнали що проходячи через ПІД регулятор, попадають до суглобу робота маніпулятора (рис.3.7).

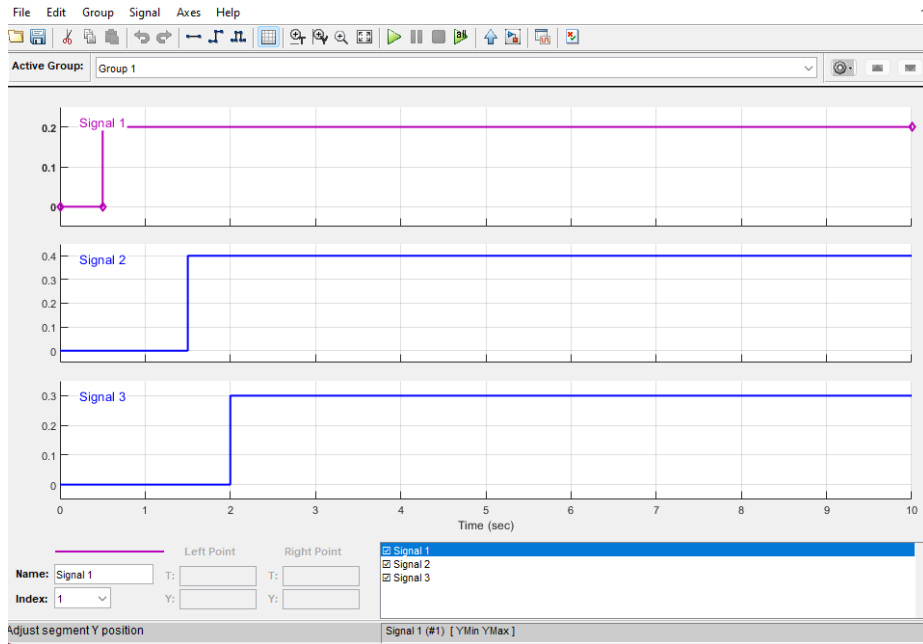


Рисунок 3.7 – Блок Signal Builder

За допомогою блоку Scope можна побачити результати компіляції CAD-моделі при стандартних налаштуваннях блоків PID Controller (рис.3.8).

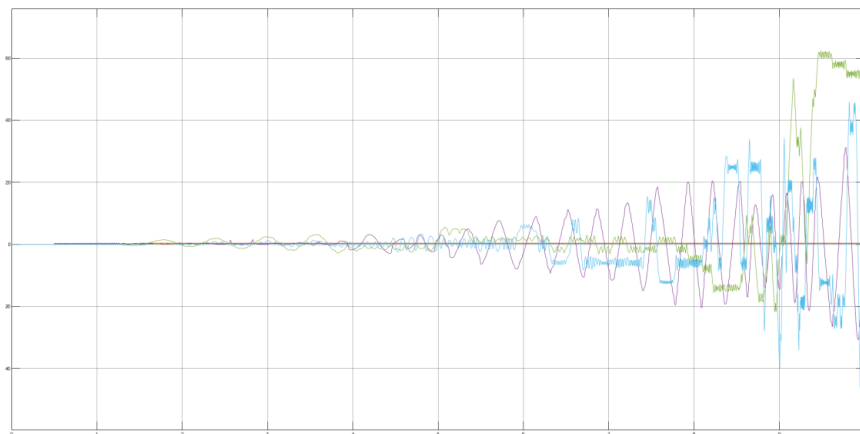


Рисунок 3.8– Блок Scope

Як можна побачити на графіку з блоку Score з поточними налаштуваннями ПД-регуляторів, система є не стійкою та не вирішується проблема точності позиціонування маніпулятора, тому слід розробити лістинг коду Matlab, що дасть змогу належним чином налаштувати коефіцієнти ПД регуляторів.

### 3.3 Налаштування ПД регуляторів

Для початку слід розробити лістинг коду, що дасть змогу імпортувати данні робота з файлу Simulink до середовища Matlab, це дасть змогу звертатися до блоків Simulink через Matlab.

#### Лістинг 3.1 Імпорт дерева робота маніпулятора

```
[FinalPID,ArmInfo] = importrobot('FinalPID');
```

`importrobot` - це функція в MATLAB, призначена для імпорту даних робота з файлу. У даному випадку вона використовується для імпорту робота з файлу з назвою 'FinalPID'.

'FinalPID' - це рядок, який представляє ім'я файлу, з якого виконується імпорт. Файл із назвою 'FinalPID', який містить інформацію про робота.

FinalPID - змінна, в яку буде збережений імпортований робот. Після виконання коду в цій змінній буде міститися інформація про робота, представлена в MATLAB.

ArmInfo - у файлі 'FinalPID' також міститься додаткова інформація про робота, і ця інформація буде збережена в змінній ArmInfo.

Розглянемо лістинг коду для налаштування ПД-регуляторів (лістинг 3.2).

## Лістинг 3.2 Налаштування ПІД регуляторів

```

TunedBlocks = {'PD1', 'PD2', 'PD3'};
ST0 = slTuner('FinalPID',TunedBlocks);
addPoint(ST0,TunedBlocks)
addPoint(ST0,'Robot/qm');
RefSignals = {...
'FinalPID/Signal Builder/q1', 'FinalPID/Signal Builder/q2', 'FinalPID/Signal
Builder/q3'};
addPoint(ST0,RefSignals)
Controls = TunedBlocks;
Measurements = 'FinalPID/Robot /qm';
options = looptuneOptions('RandomStart',80,'UseParallel',false);
TR = TuningGoal.StepTracking(RefSignals,Measurements,0.05,0);
ST1 = looptune(ST0,Controls,Measurements,TR,options);
writeBlockValue(ST1)
sim('FinalPID.slx',3)

```

Кожен рядок коду виконує певну функцію в процесі налаштування системи управління:

Створення інтерфейсу slTuner: ST0 = slTuner('FinalPID', TunedBlocks); - ініціалізація інтерфейсу slTuner для моделі 'FinalPID', що включає блоки PID (PD1, PD2, PD3).

Маркування виходів блоків PID: addPoint(ST0, TunedBlocks); - виходи блоків PID позначаються як входи системи.

Маркування кутів з'єднань робота: addPoint(ST0, 'Robot/qm'); - кути з'єднань робота позначаються як виходи системи.

Визначення сигналів посилення: addPoint(ST0, RefSignals); - додає сигнали, які будуть використовуватися як еталони для системи.

Налаштування системи: `ST1 = looptune(ST0, Controls, Measurements, TR, options)`; - налаштування системи управління з використанням заданих параметрів, включаючи визначення контрольних точок і вимірювань.

Оновлення блоків PID: `writeBlockValue(ST1)`; - оновлення параметрів блоків PID відповідно до результатів налаштування.

Симуляція моделі: `sim('FinalPID.slx', 3)` - запуск симуляції моделі 'FinalPID' протягом трьох секунд.

Цей код представляє собою комплексний підхід до налаштування та тестування системи управління, використовуючи інструменти MATLAB і Simulink, дозволяє створити ціль налаштування для стеження за кроком із вказаною допустимою похибкою (0.05) та часом встановлення (0).

Процес налаштування включає в себе ініціалізацію інтерфейсу `slTuner`, позначення важливих виходів та сигналів посилян, а також визначення цілей налаштування. Найцікавішим є використання цілей, таких як `TuningGoal.StepTracking`, яка дозволяє визначити очікувану динаміку системи у відповідь на кроковий вхід.

Додатково, використання параметрів `looptuneOptions` дозволяє здійснювати налаштування з використанням випадкових початкових значень параметрів, що сприяє більш широкому пошуку оптимальних налаштувань. Опція `UseParallel` контролює використання паралельних обчислень для прискорення процесу налаштування.

Після компіляції можна побачити результати роботи розробленого скетчу коду де видно як було підібрано оптимальні коефіцієнти для інтегральної, диференційної та пропорційної частини ПІД регуляторів (PD1, PD2, PD3), що задовільняють вказаним вимогам допустимої помилки та часу встановлення (рис.3.9 - 3.11).

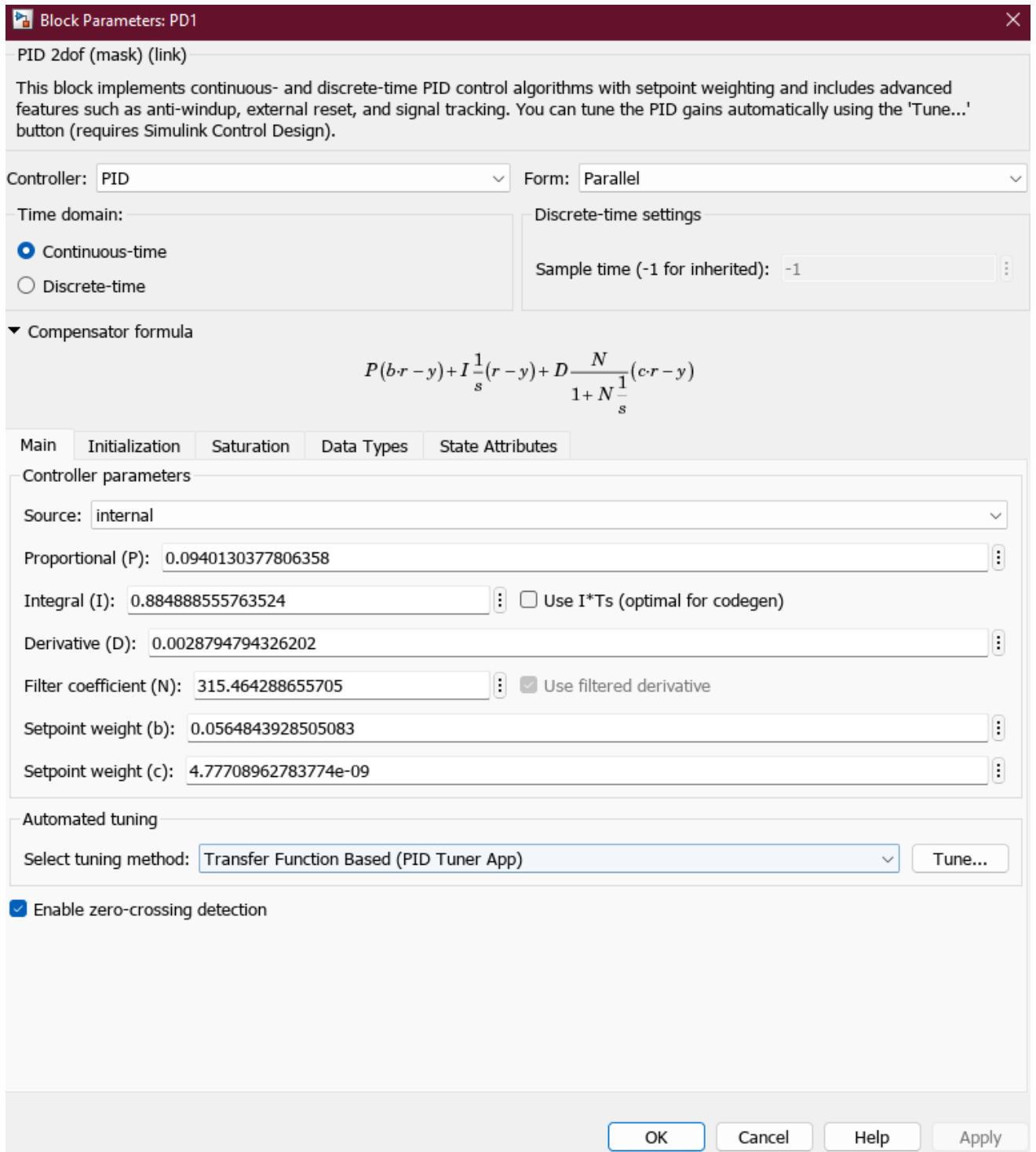


Рисунок 3.9 – Блок PD1

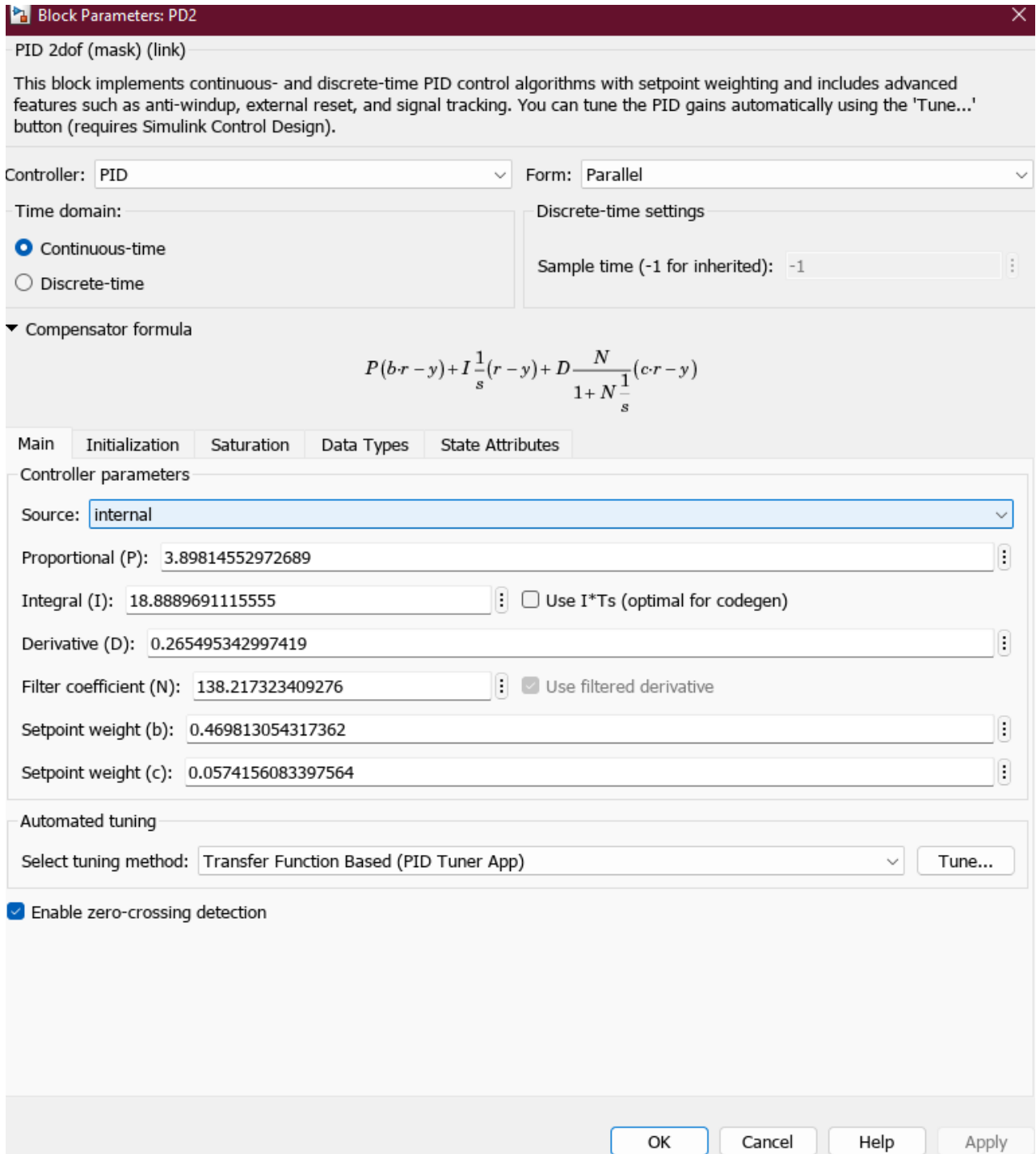


Рисунок 3.10 – Блок PD2

Block Parameters: PD3

PID 2dof (mask) (link)

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms with setpoint weighting and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller:  Form:

Time domain:

Continuous-time  
 Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited):

Compensator formula

$$P(b \cdot r - y) + I \frac{1}{s}(r - y) + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}(c \cdot r - y)$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source:

Proportional (P):

Integral (I):   Use I\*Ts (optimal for codegen)

Derivative (D):

Filter coefficient (N):   Use filtered derivative

Setpoint weight (b):

Setpoint weight (c):

Automated tuning

Select tuning method:

Enable zero-crossing detection

Рисунок 3.11– Блок PD3

За допомогою блоку Score можна побачити результати компіляції CAD-моделі при налаштованих блоках PID Controller (рис.3.12).

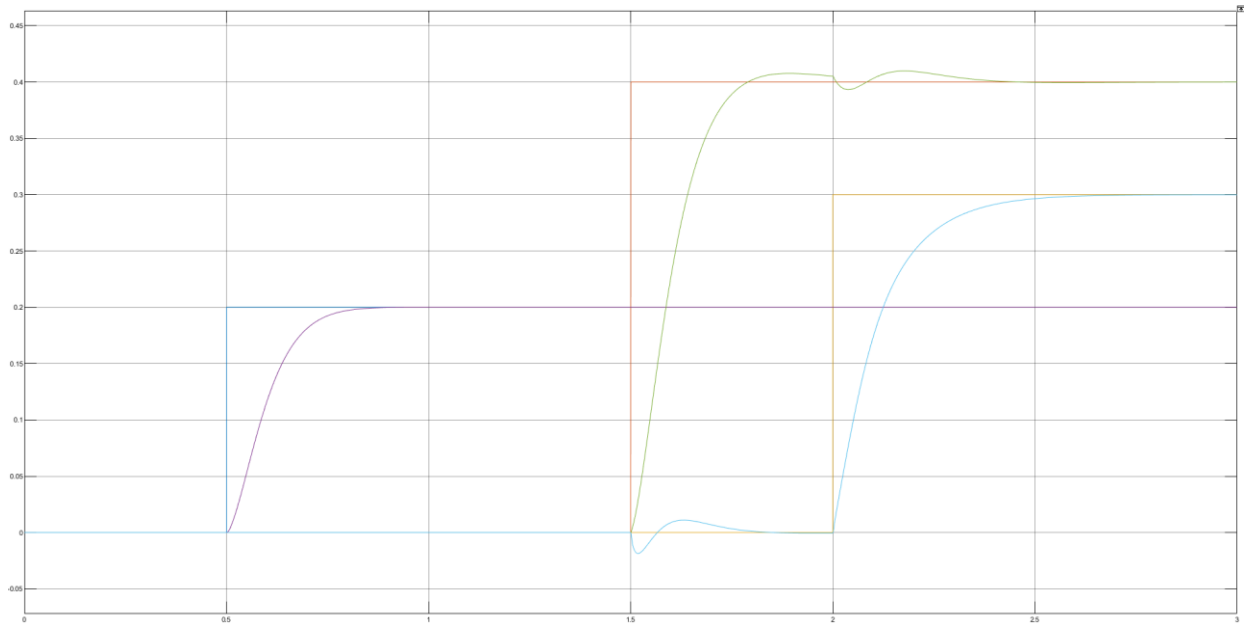


Рисунок 3.12 – Блок Score

На графіку зображено реакцію системи з ПД регулятором на кроковий сигнал. У системах управління кроковий сигнал (або сигнал ступеня) використовується для тестування відгуку системи; це сигнал, який різко змінює своє значення з нуля до певного фіксованого рівня і залишається на цьому рівні.

На графіку видно, що кожна крива реагує на зміну вхідного сигналу різним чином:

Жовта крива різко піднімається, досягає піку, потім трошки спадає і стабілізується. Це поведінка вказує на перерегулювання, коли система реагує занадто сильно на вхідний вплив, перш ніж стабілізується.

Фіолетова і синя криві також реагують на кроковий сигнал, але з меншим перерегулюванням порівняно з жовтою кривою. Вони досягають піку більш плавно, після чого слідує невеликий спад і стабілізація на певному рівні.

Оранжева крива виглядає як сигнал з найменшим перерегулюванням і швидкою стабілізацією, що вказує на більш оптимально налаштований ПД регулятор порівняно з іншими кривими.

Перехідні процеси, видимі на цих кривих, є характерними для систем з ПД регулюванням і включають в себе:

Час підйому - час, необхідний сигналу для досягнення певного відсотка його кінцевого значення після зміни вхідного сигналу.

Перерегулювання - величина, на яку вихідний сигнал перевищує його кінцеве стійке значення.

Час встановлення - час, за який вихідний сигнал приходить у стан, близький до стійкого і залишається в межах визначеного діапазону навколо цього значення.

### 3.4 Висновки до третього розділу

В результаті виконання третього розділу магістерської кваліфікаційної роботи проведено удосконалення та моделювання системи з використанням ПД регуляторів у зворотному зв'язку. У результаті дослідження було виявлено, що ПД регулятори потребують додаткових налаштувань для отримання відповідних показників якості перехідного процесу. Для того щоб налаштувати ПД регулятори було розроблено код у середі розробки Matlab.

## 4 ЕКСПЕРМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Аналіз отриманих результатів

Порівнюючи два графіки (рис.4.1, 4.2), можна відзначити наступні різниці, виходячи з попереднього опису критеріїв відгуку системи на кроковий сигнал:

На першому графіку відгук системи на кроковий сигнал не так очевидний, оскільки графік містить значну кількість шуму та небажаних коливань. Лінії на графіку здаються більш хаотичними та менш передбачуваними. Немає чіткого показника стійкого стану, лінії продовжують коливатися в усьому діапазоні графіка. Важко визначити параметри системи, такі як час підйому, перерегулювання і час встановлення, через нерегулярність і змінливість відгуків.

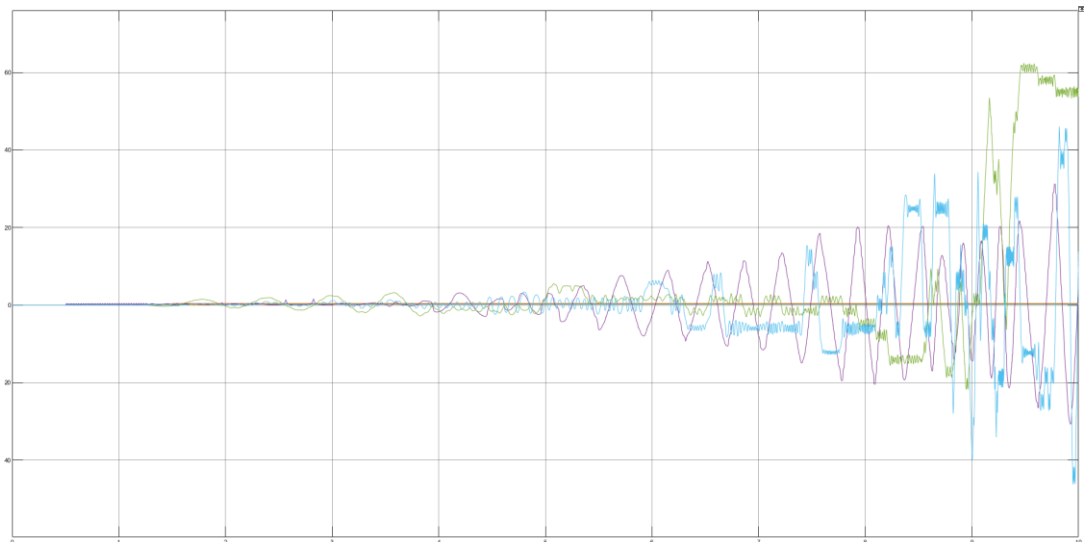


Рисунок 4.1 – Результат роботи системи без налаштування ПІД регуляторів

На другому графіку відгук системи на кроковий сигнал чітко видно, і графік показує конкретні перехідні процеси. Лінії на графіку відображають різні типи відгуку системи з ПІД регулятором, відображаючи різні налаштування регулятора. Можна спостерігати періоди, коли лінії досягають піка, а потім стабілізуються, що вказує на перерегулювання та устанавлення.

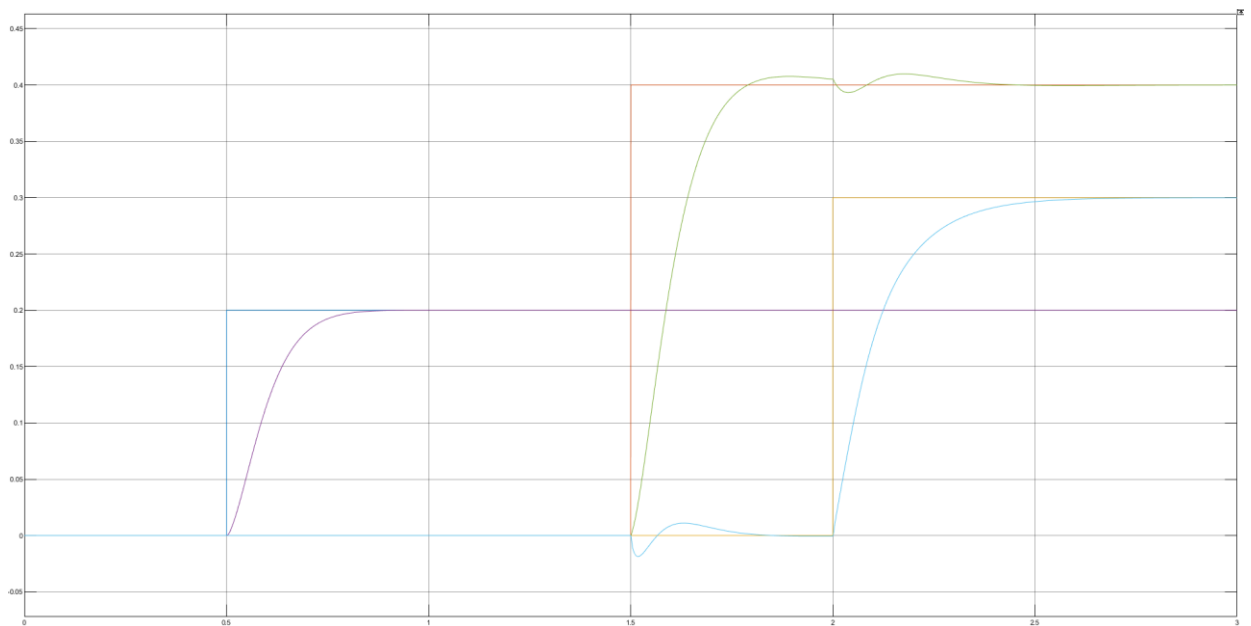


Рисунок 4.2 – Результат роботи системи з налаштованими ПІД регуляторами

Таблиця 4.1 – Якість перехідного процесу системи

Перший графік (Жовта та зелена лінії)	
Час підйому	1.10 с
Час регулювання $t_p$	1.96 с
Перерегулювання $\sigma$	0 %
Другий графік (Синя та фіолетова лінії)	
Час підйому	3.30 с
Час регулювання $t_p$	5.88 с
Перерегулювання $\sigma$	0 %

## Продовження таблиці 4.1

Третій графік (Помаранчева та бірюзова лінії)	
Час підйому	6.60 с
Час регулювання $t_p$	2 с
Перерегулювання $\sigma$	0 %

Основна різниця між графіками полягає в тому, що другий графік показує більш чіткий та аналізований відгук системи на кроковий сигнал, тоді як перший графік демонструє відгук, який важко інтерпретувати через високий рівень шуму або небажаних коливань. Це пов'язано з різними умовами моделювання, налаштуваннями ПД регулятора та різницею в самій симульованій системі.

## 4.2 Висновки до четвертого розділу

В результаті виконання четвертого розділу магістерської кваліфікаційної роботи було проведено порівняльний аналіз між результатами дослідження з налаштованими та неналаштованими ПД регуляторами, також було проведено оцінку якості перехідного процесу за умови добре підібраних коефіцієнтів ПД регулятора.

## ВИСНОВКИ

У даній роботі було розроблено кінематичну та геометричні схеми робота маніпулятора, на основі отриманих схем було розраховано пряму та обкатну кінематики руху маніпулятора.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз існуючих методів позиціонування та вибір найбільш ефективних з них для дослідження. Результати досліджень використовуються для покращення точності та надійності позиціонування маніпулятора в певних умовах роботи.

Розроблено ескіз робота маніпулятора, на основі якого було створено CAD-модель за допомогою додатку для Matlab Simulink. Змодельовано рух маніпулятора за допомогою динамічної ланки з прямою та зворотною кінематикою. За допомогою блоку Signal Editor було створено три сигнали, що подаються окремого на кожний рухомий елемент маніпулятора.

На основі розробленої моделі робота після її модифікації було додано три ПД регулятори для кожного рухомого суглобу відповідно. Було проведено аналіз результатів дослідженні при умові стандартних налаштувань ПД регулятора та підібраних за допомогою розробленого у Matlab лістингу коду налаштувань. На основі отриманих графіків перехідної характеристики було проведено порівняння результатів дослідження.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи магістра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. 55 с.

2. CUSTOMIZE YOUR UR ROBOT WITH CUTTING-EDGE PRODUCTS[Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу:<https://www.universal-robots.com/plus/>.

3. Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator / C. Freschi et al. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2012. Vol. 9, no. 4. P. 396–406. URL: <https://doi.org/10.1002/rcs.1468>.

4. Optimization of Energy Consumption in KUKA KR 16 Articulated Robot Manipulator. International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. Vol. 8, no. 3. P. 6470–6476. URL: <https://doi.org/10.35940/ijrte.c3982.098319>.

5. Fatorachian H., Smith C. Impact of CPS on Enhancing Supply Chain Resilience, with a Focus on Solutions to Pandemic Challenges. Cyber-Physical Systems. Boca Raton, 2021. P. 109–125. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003186380-9>.

6. Харківський національний університет радіоелектроніки [Електронний ресурс] / <https://nure.ua/department/kafedra-kompyuternointegrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>

7. Hand Gesture Recognition and Tracking Control for a Virtual UR5 Robot Manipulator / A. Chico et al. 2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), Cuenca, Ecuador, 12–15 October 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/etcm53643.2021.9590677>.

8. Zhu Liangliang. Analysis of error causes and methods to improve robot positioning accuracy. *Politechnical student journal*. 2022. No. 70. URL: <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2022-5-797>.

9. Accuracy Analysis in Sensor Networks for Asynchronous Positioning Methods / Álvarez et al. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 13. P. 3024. URL: <https://doi.org/10.3390/s19133024>.

10. Jamodkar M. G., Patil D. P. An Overview: Automation & Robotics Used In a Construction Industry. *Journal of Advances and Scholarly Researches in Allied Education*. 2018. Vol. 15, no. 2. P. 495–498. URL: <https://doi.org/10.29070/15/56876>.

11. Maintenance Automation: Methods for Robotics Manipulation Planning and Execution / C. Friedrich et al. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2022. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1109/tase.2022.3175631>.

12. Billingsley J. Global positioning systems (GPS) for agriculture: an overview. *Robotics and automation for improving agriculture*. 2019. P. 101–106. URL: <https://doi.org/10.19103/as.2019.0056.02>.

13. Billingsley J. An overview of machine vision technologies for agricultural robots and automation. *Robotics and automation for improving agriculture*. 2019. P. 3–26. URL: <https://doi.org/10.19103/as.2019.0056.03>.

14. APPLICATION OF GRADIENT METHOD TO DETERMINE THE PID REGULATOR PARAMETERS / Y. I. Kudinov et al. *Vestnik LSTU*. 2021. No. 1. P. 5–12. URL: [https://doi.org/10.53015/23049235\\_2021\\_1\\_5](https://doi.org/10.53015/23049235_2021_1_5).

15. Singularity Analysis of Serial Chains. *Screw Theory and Its Application to Spatial Robot Manipulators*. 2022. P. 168–180. URL: <https://doi.org/10.1017/9781139019217.007>.
16. Velocity Analysis. *Screw Theory and Its Application to Spatial Robot Manipulators*. 2022. P. 108–141. URL: <https://doi.org/10.1017/9781139019217.005>.
17. Wang X. Research and Application of Self-tuning PID Regulator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 358. P. 042026. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/358/4/042026>.
18. Patwardhan A., Prakash A., Chittawadigi R. G. Kinematic Analysis and Development of Simulation Software for Nex Dexter Robotic Manipulator. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 133. P. 660–667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.101>.
19. Zhang D., Han X. Kinematic Reliability Analysis of Robotic Manipulator. *Journal of Mechanical Design*. 2019. Vol. 142, no. 4. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4044436>.
20. Jadhav M. P. M., Bhopale M. P. B. Intelligent Line Map Robot Using Matlab. *IJIREEICE*. 2020. Vol. 8, no. 8. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.17148/ijireeice.2020.8801>.
21. Krisbudiman A., Hendro Nugroho T., Musthofa A. Analysis Industrial Robot Arm with Matlab and RoboAnalyzer. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*. 2021. Vol. 7, no. 3. P. 75–80. URL: <https://doi.org/10.22161/ijaems.73.10>.
22. Purwoto B. H. Pemodelan Robot Kinematik Manipulator menggunakan MATLAB. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*. 2020. Vol. 20, no. 02. P. 156–161. URL: <https://doi.org/10.23917/emitor.v20i02.11345>.
23. Robot physical modeling based on matlab/simulink / Z. Wu et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2113, no. 1. P. 012076. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2113/1/012076>.

24. Novoselov S., Sychova O., Tesliuk S. Technology of multi-thread software motion control of a two-link manipulator with four freedom degree. Innovative integrated computer systems in strategic project management : Collective monograph edited by I. Linde, I. Chumachenko. Riga : ISMA. pp.151-163, 2022. DOI: <https://doi.org/10.30837/MMP.2022.151>. ISBN -13 (24)978-9984-891-24-8

25. Невлюдов, І.Ш. Розробка і дослідження роботи модуля визначення орієнтації суглоба маніпулятора [Текст] / І.Ш. Невлюдов, С.П. Новоселов, О.В. Сичова // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. - Харків. - 2022. - вип. 2 (20). - С. 86-96. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.20.086>

26. Електропневмоавтоматичні приводи в автоматизованих системах керування : навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, Л. О. Кривопляс-Володіна, С. П. Новоселов, О. В. Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 292 с. – ISBN 978-966-659-332-3 ; DOI: 10.30837/978-966-659-332-3

27. Невлюдов І. Ш. Технологія програмування промислових контролерів в інтегрованому середовищі CODESYS : навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, О. В. Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – 264 с. : іл. – DOI: 10.30837/978-966-659-265-4. ISBN 978-966-659-265-4

28. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Sychova and D. Mospan, "Multithreaded Software Control of Industrial Manipulator Movement," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6, doi: 0.1109/MEES58014.2022.10005675

29. Сичова О.В., Лещенко Д.Д. Моделювання руху маніпулятора робота з використанням динамічної ланки з прямою та зворотною кінематикою // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських

наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ;  
[редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – 408с.