

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Імітаційна модель промислового маніпулятора на базі Simulink і X3D
Назва теми

КвРАКІТ. 20062.01.14 ПЗ

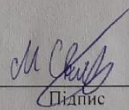
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Назва

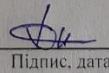
Виконав:

студент IV курсу, група АКІТ-19-1


Підпис

Максим ЧУБАТИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник


Підпис, дата

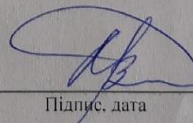
Микола ФЕДУЛА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки


Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« » червня 2023 р.

Хмельницький 2023

Хмельницький національний університет

Факультет *інформаційних технологій*

Кафедра *автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки*

Освітній рівень *перший (бакалаврський)*

Галузь знань *15 – Автоматизація та приладобудування*

Спеціальність *151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*

Освітня-професійна програма *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

М. В. Маргошич

«01» 02 2023р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Чубатий Максим Андрійович

1 Тема роботи: *Імітаційна модель промислового маніпулятора на базі засобів Simulink і X3D*

керівник роботи *Федула М.В., к.т.н, доцент*

Затверджено наказом по університету від «01» березня 2023р. №5.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 03.06.2023р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Завдання на дипломне проектування*

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ. Аналіз існуючих методів, способів та засобів для імітаційного моделювання промислового маніпулятора. Імітаційна модель промислового маніпулятора. Структура алгоритмічного забезпечення для імітаційної моделі промислового маніпулятора. Метод регулювання та керування для імітаційної моделі промислового маніпулятора. Висновки.*

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) *1. Структурна схема підключення контролера. 2. Принципова схема. 3. Блок-схема обчисленого контролера моменту.*

Завдання отримав

М. А. Чубатий





М.А. Чубатий

Керівник

М. В. Федула

М.В. Федула

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

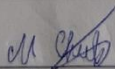
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР		

7. Дата видачі завдання « 01 » 02 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	15.02.2023р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел, аналіз актуальних викликів	15.03.2023р.	Виконано
3	Основна частина	10.04.2023р.	Виконано
4	Проектування, алгоритмічне та програмне забезпечення системи промислового маніпулятора	10.05.2023р.	Виконано
5	Висновки	15.05.2023р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи	25.05.2023р.	Виконано
7	Оформлення креслень, презентаційних матеріалів	1.06.2023р.	Виконано

Студент


Підпис

Максим ЧУБАТИЙ
Ім'я, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Микола ФЕДУЛА
Ім'я, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Імітаційна модель промислового маніпулятора на базі засобів Simulink і X3D».

Автор роботи: Чубатий Максим Андрійович.

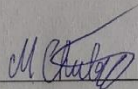
Керівник роботи: Федула Микола Васильович

Пояснювальна записка: 74 с., 47 рис., 6 табл., 40 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯТОРА НА БАЗІ SIMULINK І X3D.

Мета кваліфікаційної роботи – розробити імітаційну модель промислового маніпулятора на базі засобів Simulink і X3D. У роботі наведено основні технічні характеристики роботів маніпуляторів, проаналізовано існуючі типи маніпуляторів та встановлено їх основні переваги та недоліки. Спроектовано модель промислового маніпулятора. Розроблено алгоритм керування промисловим маніпулятором, та дві імітаційні моделі. Враховано наявність аварійної ситуації. Розроблено програмне забезпечення контролера для управління промисловим маніпулятором, проведено та представлено результати моделювання основних режимів роботи.



Підпис студента

24.06.23

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ, ДЛЯ ПОБУДОВИ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯТОРА	5
1.1 Засоби та технічне програмне забезпечення для побудови промислового маніпулятора.....	5
1.2 Методи та програмне забезпечення для імітаційного моделювання промислового маніпулятора.....	22
1.3 Висновки до першого розділу.....	24
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯТОРА.....	25
2.1 Кінематика маніпулятора	25
2.2 Моделі підключення компонентів промислового маніпулятора	44
2.3. Висновки до другого розділу	46
3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ МАНІПУЛЯТОРА.....	48
3.1 Експериментальне налагодження маніпулятора	48
3.2 Структура моделі промислового маніпулятора	62
3.3 Висновки до третього розділу.....	69
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	71
Додаток А Структурна схема підключення контролера	75
Додаток Б Принципова схема підключення контролера	76
Додаток В Блок-схема обчисленого контролера моменту.....	77

					КвРАКІТ.20062.01.14.ПЗ			
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Імітаційна модель промислового маніпулятора на базі засобів Simulink і ХЗД Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Чубатай М.А.	<i>М. Чубатай</i>	26.08.23			2	77
Перевірила		Федула М.В.	<i>М. Федула</i>	26.08.23				
Р. контр.		Корсцька Л.О.	<i>Л. Корсцька</i>	26.08.23				
Затв.		Мартинюк В.В.	<i>В. Мартинюк</i>	26.08.23				ХНУ, гр. АКІТ-19-1

ВСТУП

Актуальність теми. Сьогодні виробництва на високій швидкості з низькими витратами та низьким рівнем помилок на промислових виробничих лініях набуло великого значення з точки зору конкурентоспроможності. Всі великі гравці на якомусь конкретному ринку конкурують саме в цих сферах. З цієї причини компанії часто використовують різні типи роботів, такі як декартові, SCARA тощо, у промислових цілях. Декартові системи широко використовуються на складах з високою щільністю і, як правило, мають як човникових, так і прохідних роботів, які генерують декартову структуру [1,2]. Маніпулятори SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm – роботизований маніпулятор вибіркової відповідності збирання) займають менше місця, ніж декартові системи, легші в установці та можуть працювати без потреби у великих площах. З цієї причини такі процеси, як пакування, сортування, вирівнювання, планарне зварювання та складання на виробничих лініях зазвичай виконуються за допомогою маніпуляторів типу SCARA. Перший робот SCARA був розроблений у 1978 році професором Хіроші Макіно з університету Яманасі в Японії [3]. Згодом з'явилося багато типів роботів SCARA для використання в машинобудуванні, автомобільній промисловості та роботах.

Мета і задачі дослідження.

Метою дипломної роботи є розроблення імітаційної моделювання промислового маніпулятора на базі засобів Simlulink та X3D.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних задач:

- аналіз відомих методів та засобів моделювання промислового маніпулятор;
- розроблення нелінійної математичної моделі промислового маніпулятора;
- розробити імітацію на основі нелінійної математичної моделі.

Об'єкт дослідження – процес моделювання промислового маніпулятора на базі засобів Simlulink та X3D.

Предмет дослідження – методи та засоби моделювання промислового маніпулятора на базі засобів Simlulink та X3D.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених наукових завдань використовуються теоретичні та експериментальні методи, які базуються на теорії електричних кіл, теорії диференціального та інтегрального числення, методи аналізу та синтезу, числові методи розв'язання систем диференціальних рівнянь, методи теорії вимірювань, теорія похибок, комп'ютерне моделювання, теорії алгоритмів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні комплексної моделі промислового маніпулятора на базі засобів Simlulink та X3D.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота бакалавра складається із вступу, трьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та додатків. Дипломна робота бакалавра має загальний обсяг 74 сторінки, з яких основний зміст викладений на 70 сторінках друкованого тексту, містить 47 рисунків. Перелік джерел посилання складається з 40 джерел.

					КвРАКІТ.20062.01.14.ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		4

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ, ДЛЯ ПОБУДОВИ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

1.1 Засоби та програмне забезпечення для побудови промислового маніпулятора

У літературних дослідженнях кінематичне та динамічне моделювання, симуляційний аналіз, різні методи керування та планування траєкторії вивчалися як теоретично, так і експериментально. Різні децентралізовані та централізовані (на основі моделі) контролери були випробувані в експериментальних дослідженнях промислового робота SCARA.

У результаті виявилось, що продуктивність децентралізованих контролерів є достатньо точною для великої кількості промислових застосувань [4]. Точність результатів експериментальних досліджень залежить від якісно зробленого математичного моделювання. У роботах SCARA, які зазвичай використовуються в промислових цілях, дуже важливо виконувати точні динамічні та кінематичні розрахунки, щоб система працювала належним чином. Тоді як Das і Dulger [5] розробили повну математичну модель із динамікою приводу та рівняннями руху, отриманими за допомогою механіки Лагранжа, Alshamasin та ін. [6] досліджували кінематичне моделювання та симуляцію робота SCARA за допомогою динаміки твердого тіла за допомогою Matlab/Simulink. На відміну від інших досліджень, Urrea та Kern [7] реалізували моделювання маніпулятора SCARA з 5 ступенями свободи (DOF- Degree-Of-Freedom) за допомогою програмного забезпечення Matlab/Simulink. Їх дослідження не має фізичного застосування, хоча воно схоже з поточною роботою. Це дослідження має певні переваги перед цими видами робіт, які включають лише моделювання та імітацію. Калелі та ін. [8] і Korayem та інші [9] розробили програму для моделювання та анімації кінематики та динаміки робота в програмному забезпеченні LabView. Подібно до цих робіт, у літературі є різні дослідження програм управління роботами, моделювання та розрахунків

					КвРАКІТ.20062.01.14.ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		5

[10-20]. Хоча деякі з них базуються лише на аналізі та моделюванні роботи одного типу, деякі дають результати для роботів різних типів.

Роботи SCARA з конфігурацією з'єднань RRP (Revolute-Revolute Prismatic – Поворотний-Поворотний-Призматичний) або PRR (Prismatic-Revolute-Revolute - Призматичний-Поворотний-Поворотний) легко забезпечують лінійний рух у вертикальних напрямках. Типи RRP і PRR мають ряд переваг і недоліків. Маніпулятори SCARA типу RRP дуже поширені в невеликих навантаженнях, де потрібна точність і швидкість, чого важко досягти людям [21]. У той час як призматичний шарнірний двигун піднімає лише об'єкти типу RRP, він піднімає всю структуру робота з об'єктами типу PRR. Таким чином, призматичний шарнірний двигун типу PRR має більший крутний момент, ніж двигун типу RRP. Тому конфігурація робота SCARA типу PRR є кращою в додатках, де важко підняти важкі ваги. Оскільки основа закріплена в одній точці, можна легко використовувати потужні крутні двигуни для лінійного підйому важких вантажів.

У цій роботі буде розроблено робот-маніпулятор SCARA типу PRR (Prismatic-Revolute-Revolute - Призматичний-Поворотний-Поворотний).

Для побудови промислового маніпулятора було зроблено дослідження засобів і пристроїв. Кінцевий перелік засобів має наступний вигляд:

- 1) гвинтова лінійна вісь 4080U;
- 2) 2-фазний гібридний 1,8 градусний кроковий двигун розміром 57 мм;
- 3) драйвер крокового двигуна ТВ6600;
- 4) контролер МАСНЗ.

Саме такий список модулів дає можливість побудувати маніпулятор з характеристиками близькими до промислових. Для роботи було використано 3 крокових двигуна. Для забезпечення живлення було використано промисловий блок живлення ABL7RM2401, який вже знаходився в університеті. Який проходив плановий огляд в минулому році. Всі інші засоби пройшли мінімальні тести на пригідність і відповідність вказаним характеристикам. Для промислових засобів цей пункт дуже важливий, оскільки він може гарантувати справність на моменту запуску і подальшої експлуатації технічного комплексу. Разом з тим, цей пункт хоч

					КвРАКІТ.20062.01.14.ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		6

і не дає 100% гарантії, але дозволяє швидко знайти брак або при поломці мати розуміння який засіб міг вийти з ладу в першу чергу. Що в свою чергу дозволяє зменшити час на ремонті, що є критичним для промисловості. Звісно постає питання правильності вибору технічного забезпечення, саме тому далі буде надано вичерпну інформацію, яка пояснює здійснений вибір.

Гвинтова лінійна вісь 4080U зображено на рисунку 1.1.

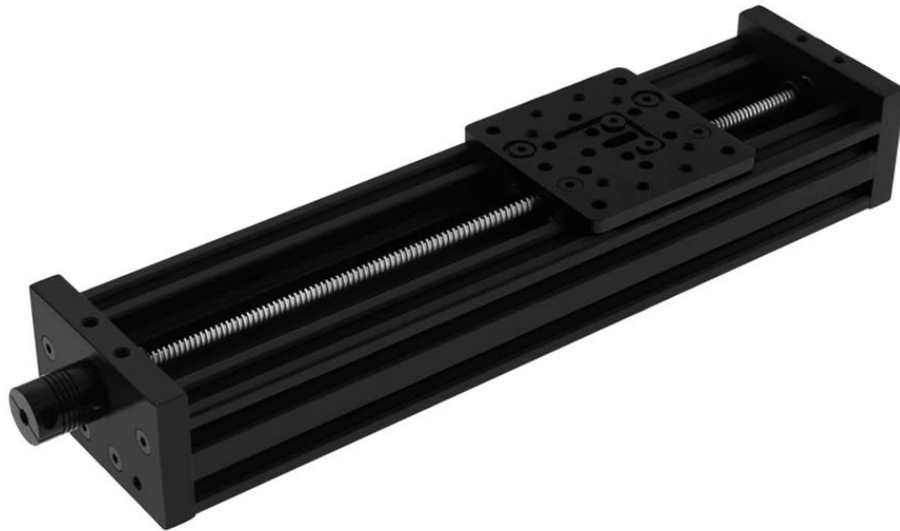


Рисунок 1.1 – Вигляд гвинтової лінійної осі 4080U

Гвинтова лінійна вісь 4080U є елементом, що використовується в промисловості для створення лінійних рухів. Вона входить до складу системи гвинтового переміщення і забезпечує точне і плавне переміщення об'єктів вздовж своєї осі.

Особливості вибраної гвинтової лінійної осі 4080U:

1) цей комплект настільного лінійного приводу поєднує в собі унікальну лінійну рейку з кінцевими кріпленнями та порталною пластиною, а також інші компоненти з v-подібним пазом, щоб створити простий лінійний привод.

2) Цей аксесуар для 3D-принтера ідеально підходить для точної роботи в промислових принтерів;

3) цей лінійний модуль виготовлено з міцного металу, лінійний гвинт приймає всі металеві вузли;

4) алюмінієвий гвинтовий гвинт 4080u має стабільну продуктивність і високу ефективність роботи. Що є невід'ємною частиною лінійного руху;

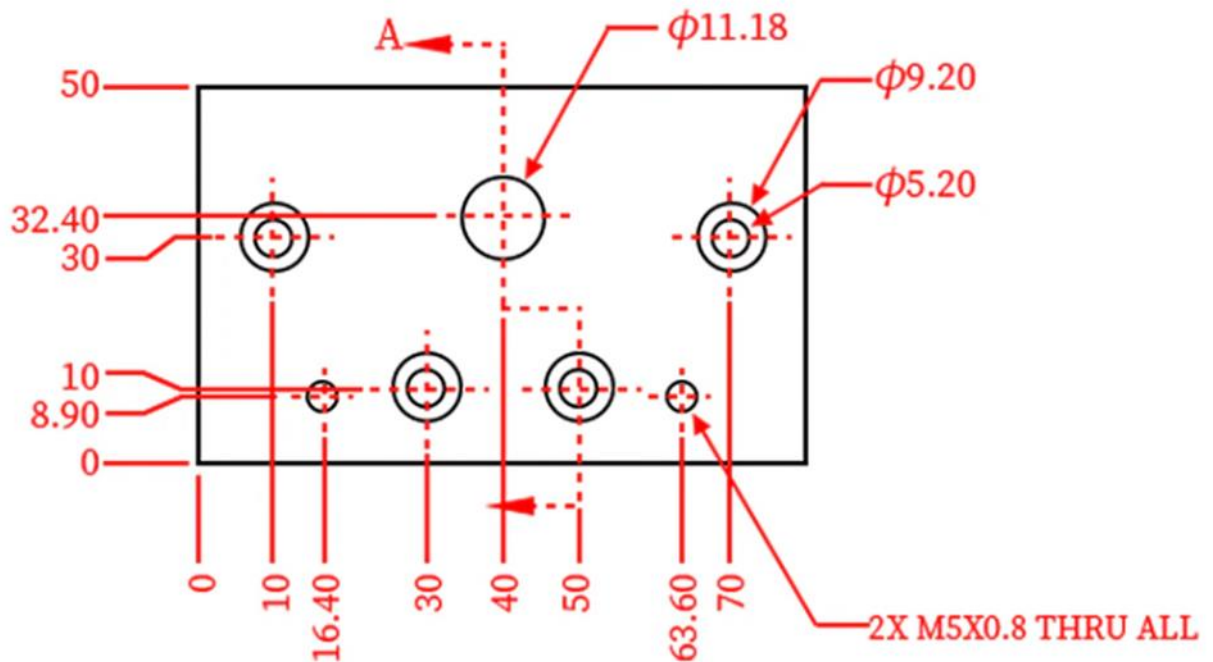


Рисунок 1.2 – Розміри (мм) бокових отворів лінійної осі 4080U

Муфта:

- 1) розмір: D20 L25-8 мм до 6,35 мм (0,315 дюйма-0,25 дюйма);
- 2) відсутність люфту, алюмінієвий сплав, легка вага, підходить для високошвидкісного використання;
- 3) надійне з'єднання, стійкість до корозії, стійкість до високих температур;
- 4) характеристики обертання за і проти годинникової стрілки ідентичні;
- 5) застосовується для систем, які вимагають високої точності та стабільності.

Кульовий гвинт Т-подібного типу

Відвід: 8 мм / 0,315 дюйма (Ходовий гвинт переміщується на 8 мм за один оберт.

Гвинт має високу точність і перетворює обертову операцію з лінійного руху під час руху, з низьким опором, високою точністю та сильною несучою здатністю.

Загальні розміри гвинтової лінійної осі:

- 1) загальна довжина 500мм;
- 2) максимальна довжина ходу 500мм;
- 3) максимально ефективне переміщення 422.85мм;
- 4) ширина 80мм (один оберт робить переміщення на 8мм) ;
- 5) розмір муфти D20 L25.

Каретка:

- 1) конструкція, що відкривається вгору, зручна для розбирання та складання, а отвори для кріплення гвинтів і з'єднувальних шпильок зарезервовані;
- 2) одноосьові модулі можна вільно вибирати та монтувати відповідно до технічних вимог;
- 3) 2-фазний гібридний 1,8 градусний кроковий двигун розміром 57 мм.



Рисунок 1.5 – Вигляд гібридного крокового двигуна

Кроковий двигун, довідкове фото наведено на рисунку 1.5, використовуються для конвертації електричної енергії в механічний рух, виконуючи обмежені кроки або кроки кутового переміщення. Даний двигун має безумовну перевагу, а саме легке підключення всього 4 проводи і доволі високу точність. Характеристики даного двигуна наведено у таблицях 1.1 і 1.2

Таблиця 1.1 – Характеристики вибраного гібридного крокового двигуна

Модель	Одиниці вимірювання	FL57ST51-0856
Номінальна напруга	В	6
Струм на фазу	А	0.85
Опір на фазу	Ом	7.1
Індуктивність на фазу	мГ	9
Утримуючий момент	Кг-см	4.97
Кількість проводів	кількість	6
Інерція ротора	Г-см	110
Вага	Кг	0.6
Кутовий момент	Кг-см	0.35
Довжина	мм	51

Таблиця 1.2 – Загальні специфікації гібридного крокового двигуна

Пункт	Специфікація
Кут кроку	1.8
Точність кута кроку	5% (повний крок без навантаження)
Точність опору	10%
Точність індуктивності	20%
Підвищення температури	80 С Макс.
Температура навколишнього середовища	-20 С~+50 С

Продовження таблиці 1.2 – Загальні специфікації гібридного крокового двигуна

Пункт	Специфікація
Опір ізоляції	100M Ом. ,500VDC
Діелектрична міцність	500VAC впродовж однієї хвилини
Радіальний люфт валу	0.02 Макс. (450 г навантаження)
Осьовий люфт валу	0.08 Макс. (450 г навантаження)
Макс. радіальна сила	75N (20mm від фланця)
Макс. осьова сила	15N
Обертання	CW

Розміри двигуна які в подальшому будуть використовуватися для побудови маніпулятора наведено на рисунках 1.6 і 1.7.

Даний двигун підтримує різні типи підключення, такі як одноосеве (single-axis) або багатоосеве (multi-axis) підключення. Все залежить від конкретної системи, в якій він використовується.

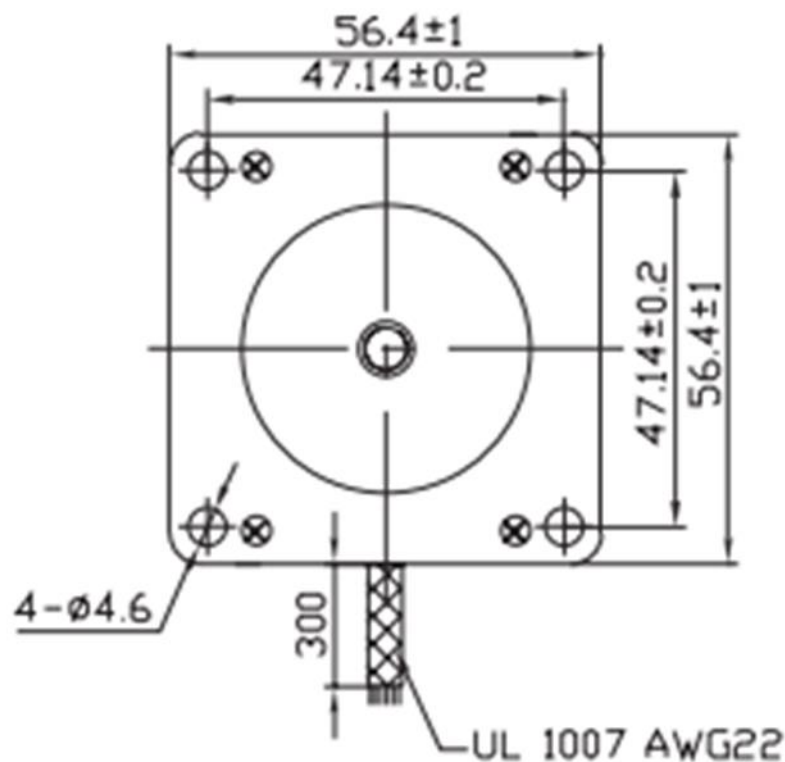


Рисунок 1.6 – Фактичні розміри сторони а гібридного крокового двигуна

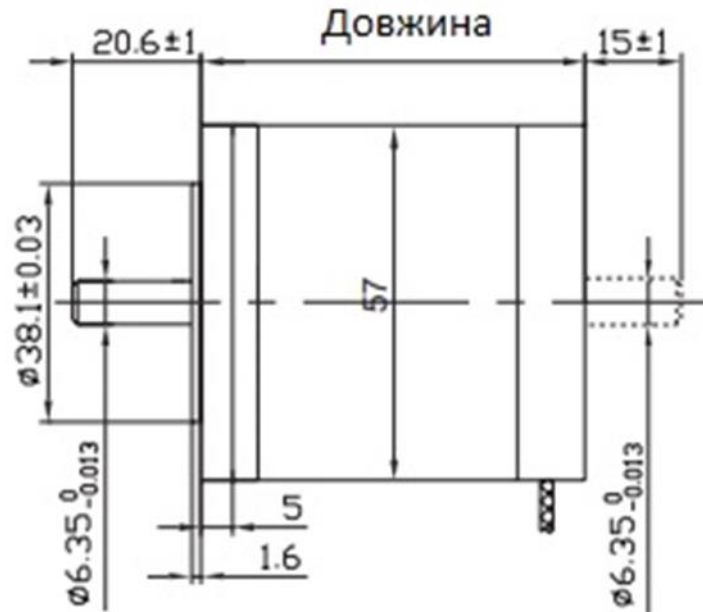


Рисунок 1.7 – Фактичні розміри сторони б гібридного крокового двигуна

Монтажна схема, показана на рисунку 1.8, вказує як слід підключати поточний двигун. Але це не остаточний варіант, дозволяється змінити порядок кольорів, але зберегти парність. В будь-якому варіанті краще перевірити проводи під час підключення до драйвера.

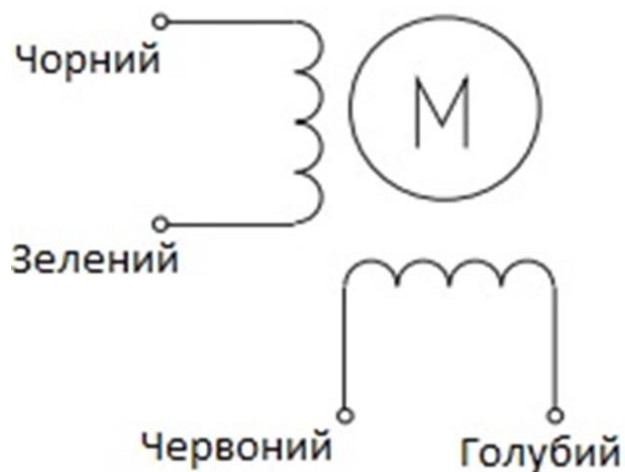


Рисунок 1.8 – Монтажна схема двигуна

Цей двигун має крок кута 1.8 градуса на крок. Це означає, що він рухається на 1.8 градуса за кожен крок. Точність руху залежить від кількості фаз (кроків) у повному оберті.

Інтерфейс керування: FL57ST51-0856 може бути інтегрований з контролерами або драйверами крокових двигунів, які забезпечують керування його рухом. Це може бути стандартний інтерфейс, такий як Pulse/Direction, або комунікаційний протокол, такий як Modbus чи Ethernet.

FL57ST51-0856A

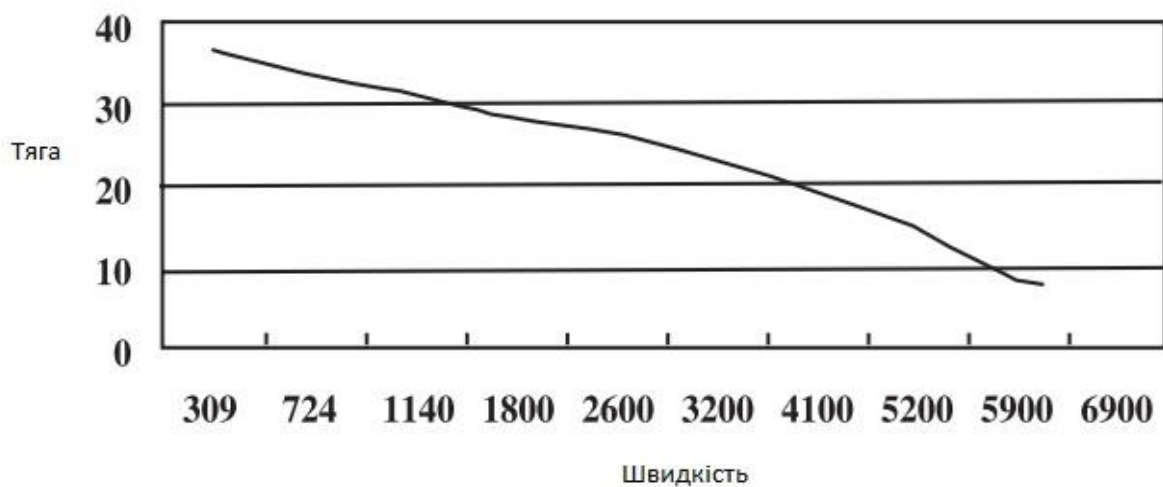


Рисунок 1.9 – Крива тягового вигину

Крива, зображена на рисунку 1.9, відображає максимальний крутний момент, який кроковий двигун може надати навантаженню при будь-якій заданій швидкості. Оскільки крива крутного моменту втягування для крокового двигуна змінюється залежно від інерційного навантаження, прикріпленого до двигуна, криві крутного моменту втягування не відображаються на швидкості. Щоб працювати вище кривої тягового моменту, двигун повинен бути прискорений або сповільнений за межами діапазону повороту. Будь-який необхідний крутний момент або швидкість, що перевищує (перевищує) цю криву, призведе до втрати синхронізації двигуном. Як видно з графіку двигун показує стабільну швидкість. Зрозуміло що графік має спадний тренд, але інакше і не могло бути. Проте,

очевидно що двигун працює стабільно без екстремумів на всьому проміжку швидкості. Можна зробити висновок що двигун працює еталонно.

Драйвер крокового двигуна ТВ6600

Довідкове фото драйвера зображено на рисунку 1.10

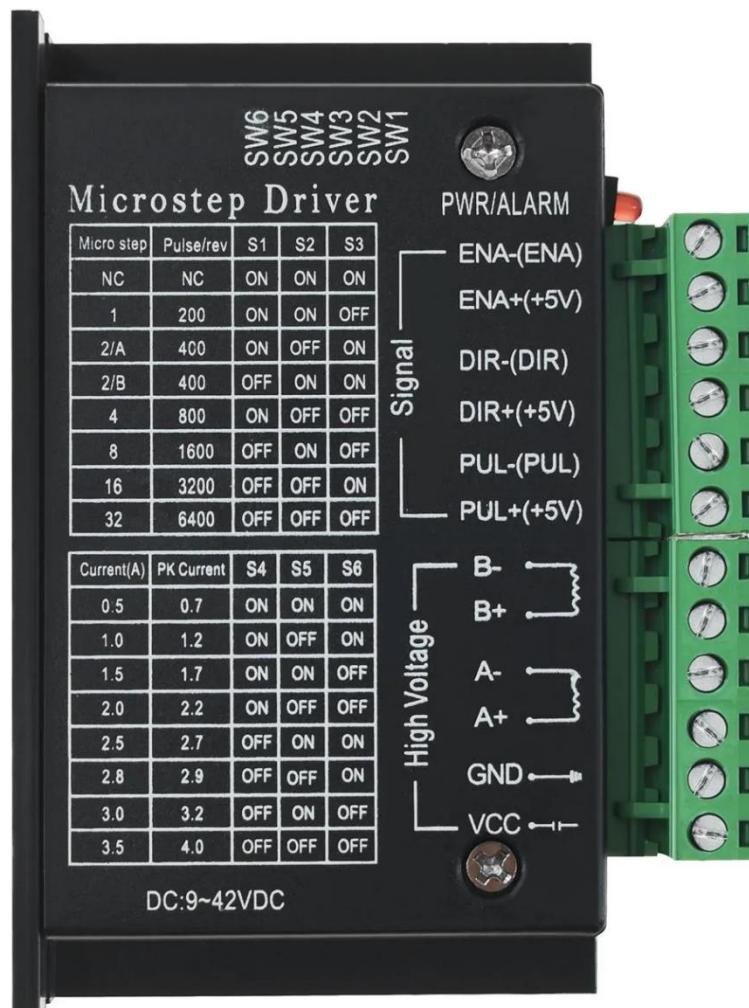


Рисунок 1.10 – Вигляд драйвер ТВ6600

Це професійний драйвер двофазного крокового двигуна. Він підтримує контроль швидкості та напрямку. Він дозволяє встановити мікрокрок і вихідний струм за допомогою 6 DIP-перемикачів. Існує 7 видів мікрокроків (1, 2 / А, 2 / В, 4, 8, 16, 32) і 8 видів контролю струму (0,5 А, 1 А, 1,5 А, 2 А, 2,5 А, 2,8 А, 3,0 А, 3,5 А). Всі сигнальні термінали використовують високошвидкісну оптичну ізоляцію, що покращує його здатність протидіяти високочастотним перешкодам.

Внутрішня схема драйвера зображено на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – Вигляд драйвера ТВ6600 без корпусу

Використання в якості драйвера модель ТВ6600 має наступні переваги:

- 1) ефективне використання енергії;
- 2) підходить для 2-фазних і 4-фазних двигунів;
- 3) вихідний струм вибирається у 8 ступенів за допомогою DIP-перемикача;
- 4) 6 мікрокроків на вибір, до 6400 кроків/об зі стандартними двигунами 1,8°;
- 5) інтерфейси використовують високошвидкісну ізоляцію оптронів;
- 6) автоматичний потік для зменшення тепла;
- 7) тепловідвід великої площі;
- 8) здатність протидіяти високочастотним перешкодам;
- 9) вхідний захист від реверсу;
- 10) захист від перегріву, перевантаження по струму та короткого замикання;
- 11) напруга живлення до +40 В постійного струму, вихідний струм до 4,0 А (піковий струм) ;

12) автоматичне зниження струму холостого ходу (у режимі очікування) для зменшення нагріву двигуна;

13) вхідна частота імпульсів до 20 кГц;

14) вхід підходить для сигналів 5 В;

15) входи оптично ізольовані;

16) підтримує режим PUL/DIR;

Характеристики драйвера наведено у таблиці 1.3

Таблиця 1.3 – Електричні характеристики драйвера ТВ6600

Параметри	Мін	Типове	Макс	Одиниці
Вихідний струм	0.7	-	4.0	А
Напруга живлення	+9	+36	+40	В
Струм логічного сигналу	8	10	15	мА
Вхідна частота імпульсів	0	-	20,13	кГц
Опір ізоляції	500			МОм

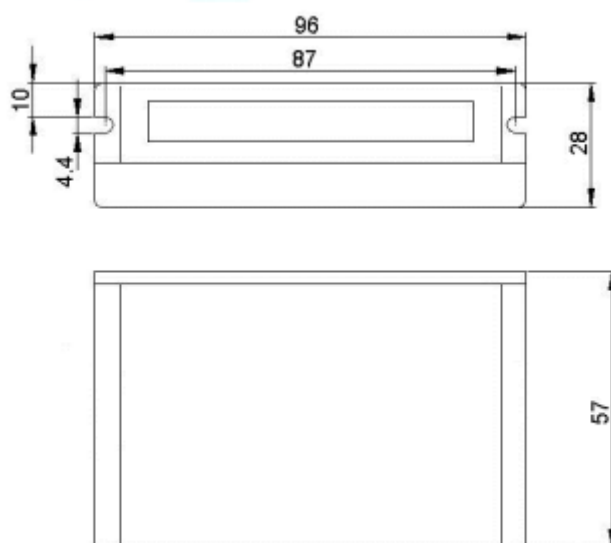


Рисунок 1.12 – Фізичні розміри драйвера ТВ6600

Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата
------	-------	----------	--------	------

КВРАКІТ.20062.01.14.ПЗ

Арк.

17

Фактичні розміри драйвера зображено на рисунку 1.12.

Драйвер підходить для широкого діапазону крокових двигунів NEMA розмірів 17, 23 і 24 (від 42x42 мм до 60x60 мм). Його можна використовувати в різних типах машин, таких як столи X-Y, гравірувальні машини, машини для наклеювання етикеток, лазерні різачки, пристрої для забору місця тощо.

Таблиця 1.4 – Налаштування кроку драйвера ТВ6600

Крок	Імпульс	S1	S2	S3
Немає	Немає	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ
1	200	ВКЛ	ВКЛ	ВИКЛ
2/А	400	ВКЛ	ВИКЛ	ВИКЛ
2/Б	400	ВИКЛ	ВКЛ	ВКЛ
4	800	ВКЛ	ВИКЛ	ВИКЛ
8	1600	ВИКЛ	ВКЛ	ВИКЛ
16	3200	ВИКЛ	ВИКЛ	ВКЛ
32	6400	ВИКЛ	ВИКЛ	ВИКЛ

Таблиця 1.5 – Налаштування струму драйвера ТВ6600

Струм	S1	S2	S3
0.5	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ
1.0	ВКЛ	ВИКЛ	ВКЛ
1.5	ВКЛ	ВКЛ	ВИКЛ
2.0	ВКЛ	ВИКЛ	ВИКЛ
2.5	ВИКЛ	ВКЛ	ВКЛ
2.8	ВИКЛ	ВИКЛ	ВКЛ
3.0	ВИКЛ	ВКЛ	ВИКЛ
3.5	ВИКЛ	ВИКЛ	ВИКЛ

Особливо добре підходить для застосувань, де потрібні низький рівень шуму, менше виділення тепла, висока швидкість і висока точність

У наступних таблицях 1.4, 1.5 показано налаштування кроку драйвер. Дозволяється встановити крок двигуна за допомогою перших трьох DIP-перемикачів

Драйвер двигуна, має дві зони; висока напруга і сигнальна лінія. Частина високої напруги складається з проводки крокового двигуна та джерела живлення, тоді як сигнальна частина складається з підключення модуля до MCU/MPU. Контакти PUL(+5V), DIR(+5V), (ENA+5V) замкнуті на коротко та підключені до джерела живлення 5V MCU/MPU. DIR- і PUL- підключаються до цифрових контактів MCU/MPU, а контакт ENA- потрібно залишити плаваючим. Після того, як з'ясовано парні дроти котушки крокового кроку, можливо під'єднати його до порту А та порту В. Вкінці дозволяється підключити драйвер двигуна до блоку живлення до контактів GND та VCC.

Контролер MACH3

Довідкове фото зображено на рисунку 1.13.

Переваги контролера MACH3:

- 1) підтримка 4-осьового керування з ЧПК, можливість підключити п'ять драйверів крокових двигунів або сервоприводів;
- 2) вихідний імпульс становить 100кГц. Мінімальна помилка алгоритму інтерполяції, яка забезпечує високу точність обробки;
- 3) USB-інтерфейс, підходить для будь-якого нетбука, ноутбука, настільного комп'ютера та пристроїв сумісного з ПК;
- 4) підтримка доступу до кінцевого вимикача;
- 5) підтримка керування шпинделем (режим ШІМ та режим реле) ;
- 6) підтримує введення аварійної зупинки;
- 7) забезпечує до 12 входів цифрового сигналу;
- 8) забезпечує 4 канали з оптронним ізольованим релейним виходом;
- 9) підтримка інтерфейсу маховичка;

- 10) автоматичне вирівнювання веденої осі при наведенні;
- 11) підтримує автоматичне наведення (повернення до нуля) ;
- 12) підтримка операційної системи Windows XP, Windows 7 (32 / 64bit), Windows 8, Windows 10;
- 13) застосовується до всіх версій програмного забезпечення DrufelCNC;

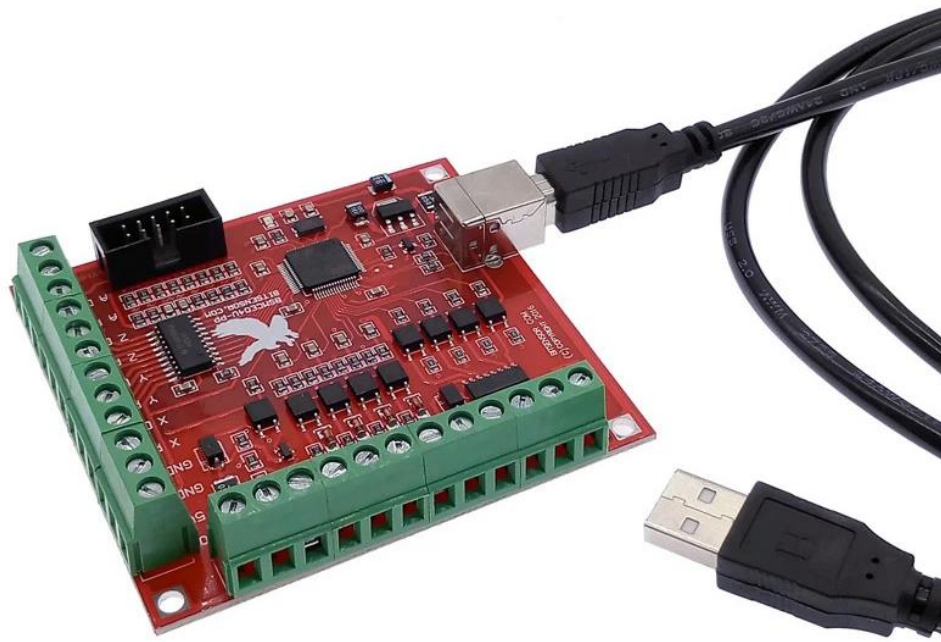


Рисунок 1.13 – Вигляд контролера MACH3

Контролер MACH3 використовує мікроконтролер STM32F103 для генерації крокових імпульсів до 100 кГц. Використання мікроконтролера для генерації крокових імпульсів зазвичай більш надійне, ніж паралельний порт ПК. Однак на більш високих частотах кроку виникають паузи в послідовності крокових імпульсів. Ці паузи можуть викликати різкий рух двигуна. Крок частоти нижче 50 кГц є кращим, а рух двигуна більш плавним. Конфігурацію підлеглої осі було перевірено, однаковий кроковий імпульс генерувався на виходах обох осей X і A одночасно.

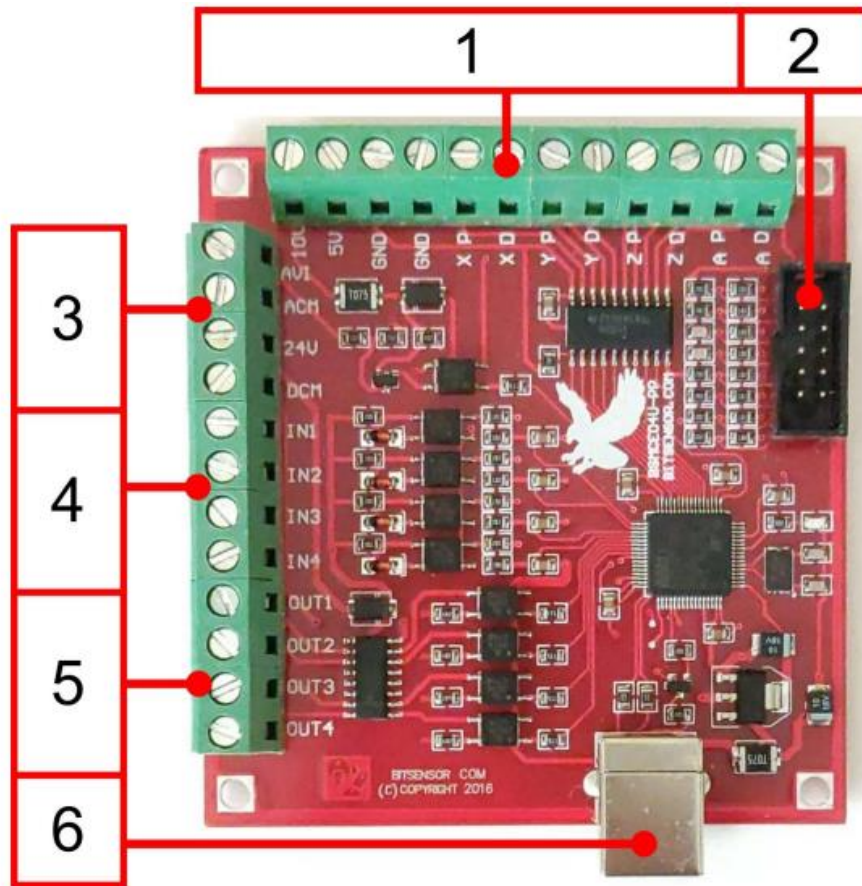


Рисунок 1.14 – Групи підключень контролера MACH3

Розшифрування груп контролера з рисунка 1.14 наведено нижче

- 1 - Інтерфейс керування кроковим двигуном.
- 2 – Інтерфейс MPG.
- 3 - Вихідний порт керування шпинделем.
- 4 - Вхідні порти (датчики перемикачі).
- 5 - Загальний вихідний інтерфейс введення-виведення.
- 6 - Порт USB.

Оскільки плата використовує лінійний драйвер для крокових і напрямних виходів, підключення до крокових драйверів просте.

XP >> драйвер STEP

XD >> водій вводить DIRECTION

GND >> драйвер GROUND або COMMON вхід

На цій платі контролера немає виходу ENABLE

Також є чотири вхідних і чотири вихідних порти. Ці вхідні та вихідні порти можна налаштувати за потреби для різних функцій, які підтримує MACH3. Це можуть бути кінцеві вимикачі, ESTOP, ШІМ, сенсорний щуп тощо. Порти вводу/виводу мають оптрони EL357N для безпеки. Для цього потрібне окреме джерело живлення, підключене до гвинтових клем, позначених як 24 В і заземлення DCM. Оптрони перевірені та добре працюють із напругою живлення до 24 вольт і мінімум 5,5 вольт. Входи мають активний низький рівень, для активації потрібно заземлити вхідні контакти на DCM.

1.2 Методи та програмне забезпечення для імітаційного моделювання промислового маніпулятора

Проектування віртуальних моделей та їх зв'язування з імітаційними моделями є привабливим способом їх моделювання. Пакети інструментів Matlab/Simulink надають багато інструментів і функцій для ефективного створення імітаційних і віртуальних моделей систем мехатроніки, рисунок 1.15. Ці інструменти дозволяють створювати моделі систем мехатроніки. Інструменти Matlab/Simulink також дозволяють створювати додатки для моделювання з моделями мехатронних систем. Стаття містить створений додаток VirtModelsKKUI, який включає моделі кулі та балки (B&B) та моделі кулі та пластини (B&P). Додаток VirtModelsKKUI використовується для моделювання віртуальних моделей B&B та B&P для відповіді замкнутого циклу з використанням різних типів алгоритмів керування

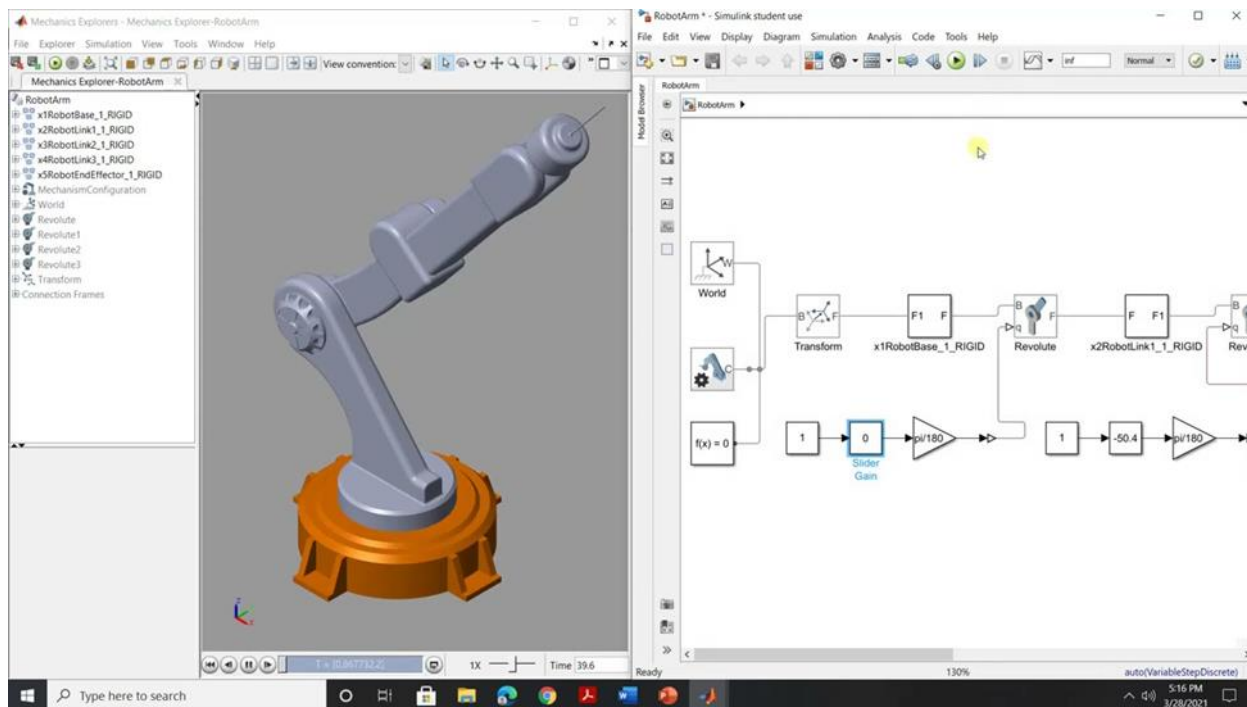


Рисунок 1.15 – Віртуальна модель маніпулятора з структурою

Віртуальні моделі мехатронних систем

Віртуальні моделі мехатронних систем копіюють форму та конструкцію реальних моделей. Створення віртуальних моделей можливе за допомогою різних додатків тривимірної графіки на ПК. До групи 3D-графічних програм входять такі програми, як Blender, Google SketchUp тощо. Одним із 3D-додатків є інструменти V-Realm Builder, які є частиною набору інструментів Simulink 3D Animation.[22-24] Набір інструментів Simulink 3D Animation підтримує лише формат .vrmf віртуальних моделей, і цей формат є стандартним форматом для віртуальних моделей, створених інструментом V-Realm Builder [25]. В інструменті V-Realm Builder є віртуальні моделі, побудовані з основних 3D-об'єктів, таких як куб, сфера, циліндр, конус, блок і поверхня. Інструмент V-Realm Builder дозволяє створити новий об'єкт для віртуальної моделі певної форми або використовувати 3D текст у віртуальній моделі [26].

1.3 Висновки до першого розділу

Основа будь-якої системи, її модель. Саме з моделі має починатися правильна реалізація системи. У даному розділі було зроблено огляд різних моделей для побудови промислового маніпулятора а також засобів для їх побудови. Було проведено порівняльний аналіз базових елементів. Для реалізації системи було обрано технічне забезпечення, і наведено його характеристики, яке дозволить доволі швидко і легко реалізувати промисловий маніпулятор для подальшої імітаційної моделі.

					КвРАКІТ.20062.01.14.ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		24

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

2.1 Кінематика маніпулятора

Передня кінематика маніпулятора керує зв'язком між положеннями, швидкостями та прискореннями суглобів робота [27-30]. Робот складається з ланок, які з'єднані між собою призматичними або поворотними шарнірами.

Системи координат розміщуються в кожному суглобі, щоб знайти матриці перетворення, які встановлюють відношення між двома сусідніми суглобами. Матриця перетворення між двома з'єднаннями показана як ${}^{i-1}_i T$.

Зв'язок між базовою рамою та рамою інструменту визначається матрицями послідовних спільних перетворень. Це відношення називається прямою кінематикою і показано в рівнянні. (2.1):

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T \dots {}^{N-1}_N T \quad (2.1)$$

Спроекований робот SCARA та осі на з'єднаннях показані на рисунку 2.1. На рисунку позначено d_3 – довжина вертикального з'єднання, l_1 і l_2 – горизонтальні довжини двох інших з'єднань.

Для кожного кута θ буде використовуватися своє позначення

Для кожного крокового двигуна використовується своє позначення, а саме 0, 1, 2.

Довжина d_3 розраховується з урахуванням висоти захвату. Матриці перетворення отримують із виразів (2.2) методом Д-Н.

Далі буде розглянуто метод Денавіт-Гартенберг більш детально.

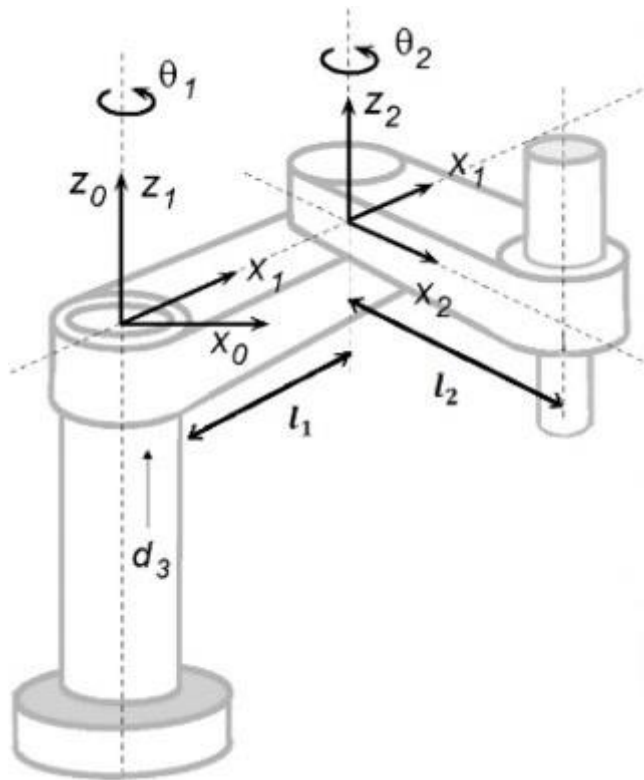


Рисунок 2.1 – З'єднані осі SCARA робота

Метод Денавіт-Гартенберг (D-H)

Кінематична схема маніпулятора PRRR SCARA наведена на рисунку 2.2:

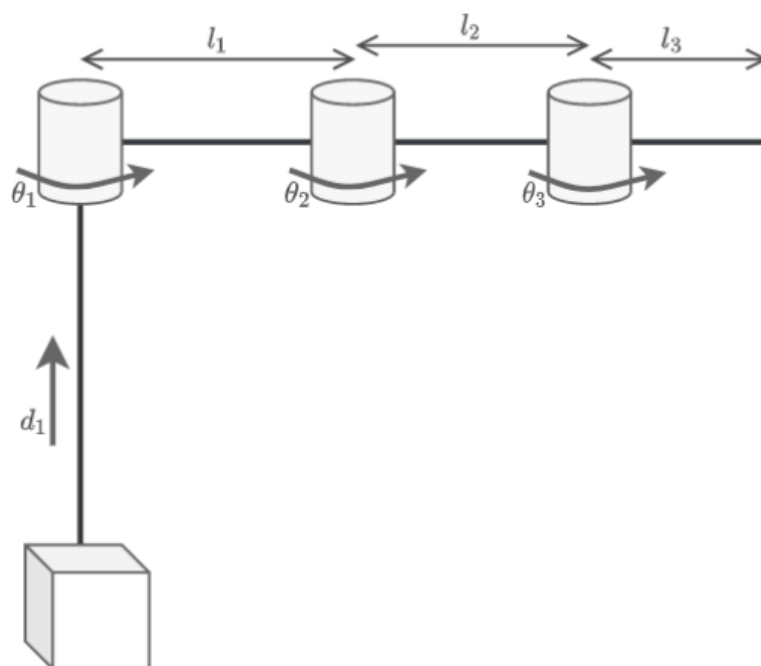


Рисунок 2.2 – Кінематична діаграма PRRR SCARA

Спочатку було призначено кадри відповідно до правил Денавіта-Хартенберга:

Правило 1: вісь z_n є віссю обертання для шарнірного шарніра та осями трансляції для призматичного шарніра.

Правило 2: вісь x_n має бути перпендикулярною як до z_n , так і до z_{n-1} .

Правило 3: вісь y_n визначається з осі x_n і осі z_n за допомогою правила правої руки.

Правило 4: x_n має перетинатися з віссю z_{n-1} .

Одне з можливих рішень цієї проблеми показано на рисунку 2.3

Після призначення кадрів було отримано отримати параметри Денавіта-Хартенберга, а саме:

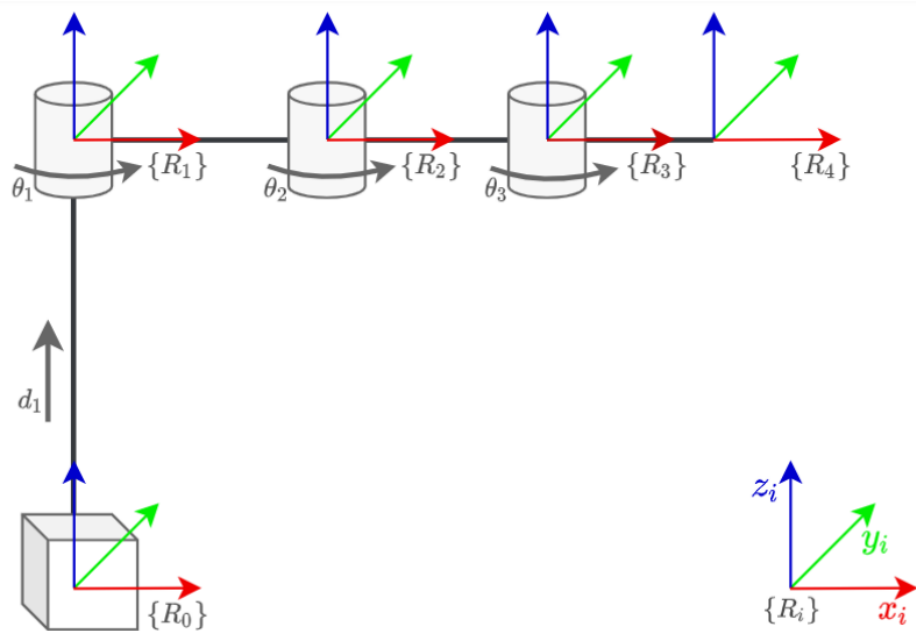


Рисунок 2.3 – Кінематична діаграма PRRR SCARA

- θ — обертання навколо z_{n-1} , необхідне, щоб x_{n-1} відповідало x_n .
- α — обертання навколо x_n , необхідне, щоб z_{n-1} відповідало z_n .
- r – відстань між рамками $n - 1$ і n уздовж x_n .
- d – відстань між рамками $n - 1$ і n уздовж z_n .

Далі показано схематичне з'єднання елементів маніпулятора. Усі елементи мають схожі величини і відрізняються лише номером. d_3 представляє гвинтову лінійну вісь. θ відображає кут на який може переміщатися маніпулятор і виконується за допомогою крокового мотора. Все вище описане зображено на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри D-H

i	a_{i-1}^a	a_{i-1}^b	θ_i^c	d_i^d
1	0	0	0	d_3
2	0	0	θ_1	0
3	0	l_1	θ_2	0
4	0	l_2	0	0

Параметри таблиці 2.1 наведенні нижче

- a) a_{i-1} - кут між Z_{i-1} та Z_i навколо x_{i-1} ;
- b) a_{i-1} - відстань між осями Z_{i-1} та Z_i вздовж x_{i-1} ;
- c) θ_i - кут між x_{i-1} та x_i навколо Z_{i-1} ;
- d) d_i - відстань між осями x_{i-1} та x_i вздовж Z_i .

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Абревіатури c і s представляють терміни косинус і синус. Параметри D-H наведені в таблиці 2.1.

Пряма кінематична матриця отримана з рівняння (2.3) добутком матриць перетворення.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & c_1 l_1 + c_{12} l_2 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & s_1 l_1 + s_{12} l_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Наступна функція MATLAB обчислює однорідну матрицю перетворення на основі параметрів DH:

```
function H = DH ( c1, c12, d3, l1, l2, s1, s12 )
    % матриця передньої кінематики
    c1 = c1* l1 + c12 * l2 ;
    s1 = s1* l1 + s12 * l2;
    H = [c12 -s12 0 c1; s12 c12 0 s1; 0 0 1 d3; 0 0 0 1];
end
```

Зворотна кінематика

Зворотна кінематика — це процес знаходження значень змінних суглобів відповідно до даних положення та орієнтації кінцевого ефектора. Іншими словами, для переміщення кінцевого ефектора в потрібне положення потрібно знайти значення обертання та лінійного руху суглобів за допомогою зворотної кінематики. Будь-який знайдений математичний вираз може не бути фізичним рішенням задачі. Також може бути більше ніж один розв'язок задачі для переходу кінцевого ефектора в потрібне положення.

Іншими словами, робот-маніпулятор може досягати бажаних позицій за допомогою різних рішень.

Немає систематичного способу отримати рішення цієї проблеми, для простих конфігурацій робота зворотну кінематику можна визначити, досліджуючи геометрію робота та використовуючи тригонометричні тотожності.

Однак для складних роботів існують чисельні алгоритми, які дозволяють отримати зворотну кінематику, наприклад, алгоритм Ньютона-Рафсона.

На відміну від прямої кінематики, обчислення зворотної кінематики є досить складним для серійних маніпуляторів з наступних причин:

- зворотні кінематичні рівняння, як правило, дуже нелінійні, і тому не завжди можливо знайти аналітичне рішення;
- може бути декілька рішень (буде наведено приклад у наступному розділі);
- можуть існувати нескінченні рішення, що справедливо для кінематично надлишкових маніпуляторів;
- отримані рішення є неприпустимими через структуру маніпулятора.

Рішення цієї проблеми є вирішальним. Оскільки для того, щоб запрограмувати робота для виконання завдання в оперативному просторі, буде використовуватися лише координати в декартовому просторі, однак рука розуміє лише спільні змінні. Отже, контролер плеча повинен містити вбудований розв'язувач зворотної кінематики. У даному дослідженні інверсний кінематичний розв'язок отримано аналітичним методом. Третій стовпець прямої кінематичної матриці, показаний у рівнянні (2.4), дає координати положення робота x , y та z .

Планарний робот із двома ланками

Почати потрібно з відносно простої конструкції робота, розв'язання якої стане зручним і корисним для отримання зворотної кінематики структур інших роботів-маніпуляторів.

Структура дволанкового плоского робота показана на рисунку 2.4.

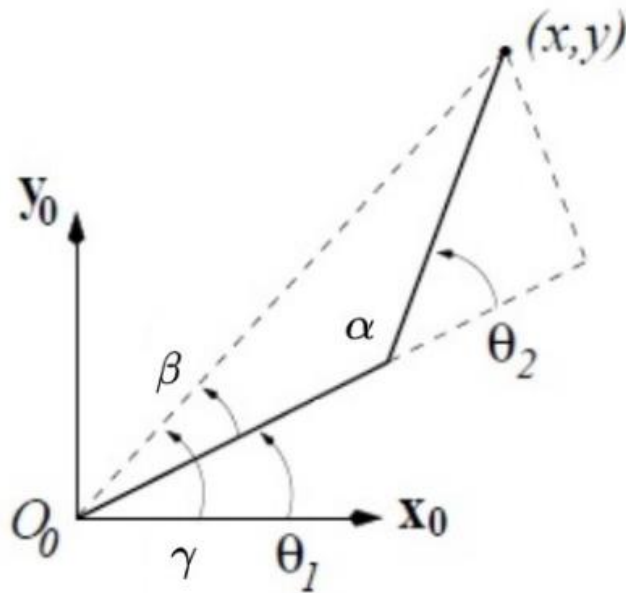


Рисунок 2.4 – Планарний робот із двома ланками

$$O = P = \begin{bmatrix} c_1 l_1 + c_{12} l_2 \\ s_1 l_1 + s_{12} l_2 \\ d_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Рівняння (2.5) та (2.7) можна легко зрозуміти з рівняння (2.4):

$$P_1 = c_1 l_1 + c_{12} l_2 \quad (2.5)$$

$$P_2 = s_1 l_1 + s_{12} l_2 \quad (2.6)$$

$$P_3 = d_3 \quad (2.7)$$

Розрахунок кута θ_1

Рівняння (2.5) і (2.6) можна виразити таким чином:

$$(c_{12} l_2)^2 = (P_1 - c_1 l_1)^2 \quad (2.8)$$

$$(s_{12} l_2)^2 = (P_2 - s_1 l_1)^2 \quad (2.9)$$

Рівняння (2.8) і (2.9) підсумовуються таким чином:

$$l_2^2 = P_1^2 - P_2^2 + l_1^2 - 2l_1(P_1 c_1 + P_2 s_1) \quad (2.10)$$

Рівняння (2.11) виходить, коли b_1 використовується замість $(P_1c_1 + P_2s_1)$:

$$l_2^2 = P_1^2 - P_2^2 + l_1^2 - 2l_1b_1 \quad (2.11)$$

На рисунку 2.5 показана ілюстрація виведення θ_1 . Через існування b_1, v_1 також можна отримати аналітичними методами, як у рівнянні (2.13). Змінні на рисунку 2.5 обчислюються таким чином:

$$b_1 = (P_1c_1 + P_2s_1) \quad (2.12)$$

$$v_1 = (-P_1s_1 + P_2c_1). \quad (2.13)$$

$$r^2 = v_1^2 + b_1^2. \quad (2.14)$$

$$r^2 = P_1^2 + P_2^2 \quad (2.15)$$

$$v_1 = \pm\sqrt{P_1^2 + P_2^2 - b_1^2}. \quad (2.16)$$

Далі наведено графічне представлення θ_1

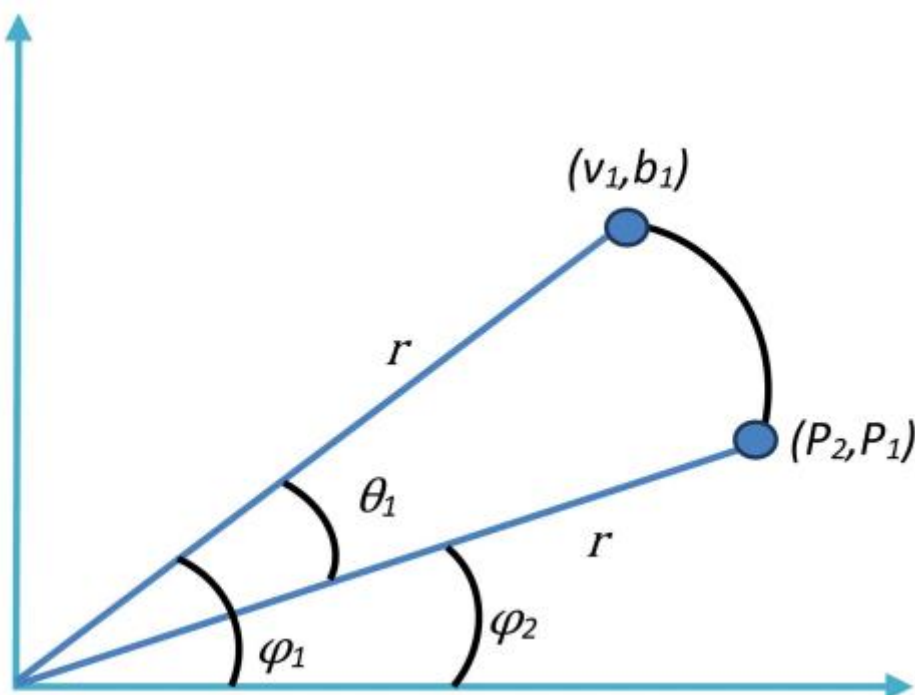


Рисунок 2.5 – Ілюстрація виведення θ_1

$$\theta_1 = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (2.17)$$

$$\varphi_1 = A \tan 2(v_1, b_1) \quad (2.18)$$

$$\varphi_2 = A \tan 2(P_2, P_1) \quad (2.19)$$

Зворотна кінематика першого обертового шарніра отримується через рівняння (2.20), коли рівняння (2.18) і (2.19) підставляються в рівняння (2.17).

Через два різних значення v_1 з рівняння (2.16) також є два різних значення θ_1 . Це показує, що є два рішення.

$$\theta_1 = A \tan 2(\pm v_1, b_1) - A \tan 2(P_2, P_1). \quad (2.20)$$

Розрахунок θ_2 кута

Перший спосіб:

Коли рівняння (2.5) і (2.6) множимо на P_2 і P_1 , відповідно, рівняння (2.21) і (2.22) одержуємо таким чином:

$$P_1 [c_{12} l_2 = P_1 - c_1 l_1] \quad (2.21)$$

$$P_2 [s_{12} l_2 = P_2 - s_1 l_1] \quad (2.22)$$

Рівняння (2.23) отримуємо після віднімання рівняння (2.22) від рівняння (2.21) і, відповідно, деякі зміни зроблені.

$$l_2 [c_{12} P_2 - s_{12} P_1] = -l_1 [P_2 c_1 - P_1 s_1] \quad (2.23)$$

Коли замість $P_2 c_1 - P_1 s_1$ пишеться v_1 , отримуємо:

$$c_{12} P_2 - s_{12} P_1 = \frac{-l_1 v_1}{l_2}. \quad (2.24)$$

Рівняння (2.24) є остаточним рішенням першого способу.

Другий спосіб:

Рівняння (2.21) і (2.22) підсумовуються таким чином:

$$l_2 [c_{12} P_2 + s_{12} P_1] = P_1 P_2 - l_1 [P_2 c_1 + P_1 s_1]. \quad (2.25)$$

Рівняння (2.26) виходить, коли b_2 використовується замість $c_{12} P_2 + s_{12} P_1$

$$b_2 = c_{12}P_2 + s_{12}P_1 \quad (2.26)$$

b_1 переставляється наступним чином:

$$b_1 = (P_1c_1 + P_2s_1) = \frac{P_1^2 + P_2^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1} \quad (2.27)$$

Після розміщення значення b_1 у рівнянні (2.25) отримуємо:

$$c_{12}P_1 + s_{12}P_2 = \frac{P_1^2 + P_2^2 - l_1^2 + l_2^2}{2} \quad (2.28)$$

Рівняння (2.29) отримано з деякими змінами в рівняння (2.28).

$$b_2 = \frac{P_1^2 + P_2^2 - l_1^2 + l_2^2}{2l_1} \quad (2.29)$$

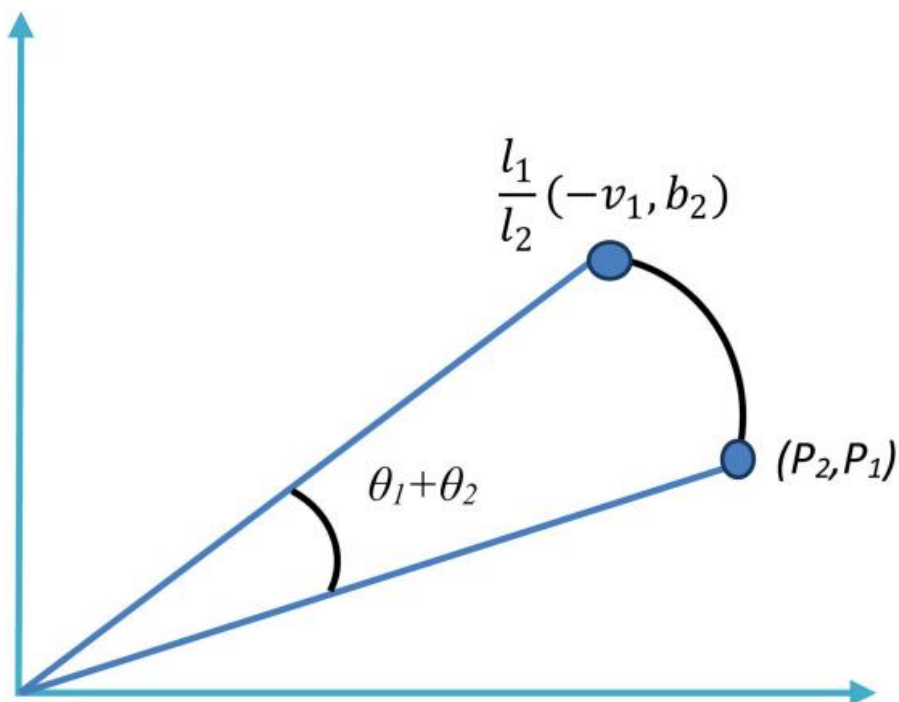


Рисунок 2.6 – Ілюстрація виведення $\theta_1 + \theta_2$.

Кінцева форма рівняння (2.28) має такий вигляд:

$$c_{12}P_1 + s_{12}P_2 = \frac{l_1b_2}{l_2} \quad (2.30)$$

Коли рівняння (2.24) і (2.30) розв'язуються математично разом на одному графіку виходить рисунок 2.6.

Рисунок 2.6 можна розв'язати наступним чином:

$$\theta_1 + \theta_2 = A \tan 2(-v_1, b_2) - A \tan 2(P_2, P_1) \quad (2.31)$$

Коли θ_1 значення з рівняння. (2.20) розміщено в рівнянні (2.31), отримуємо рівняння (2.32).

$$\theta_2 = A \tan 2(-v_1, b_2) - A \tan 2(v_1, b_1) \quad (2.32)$$

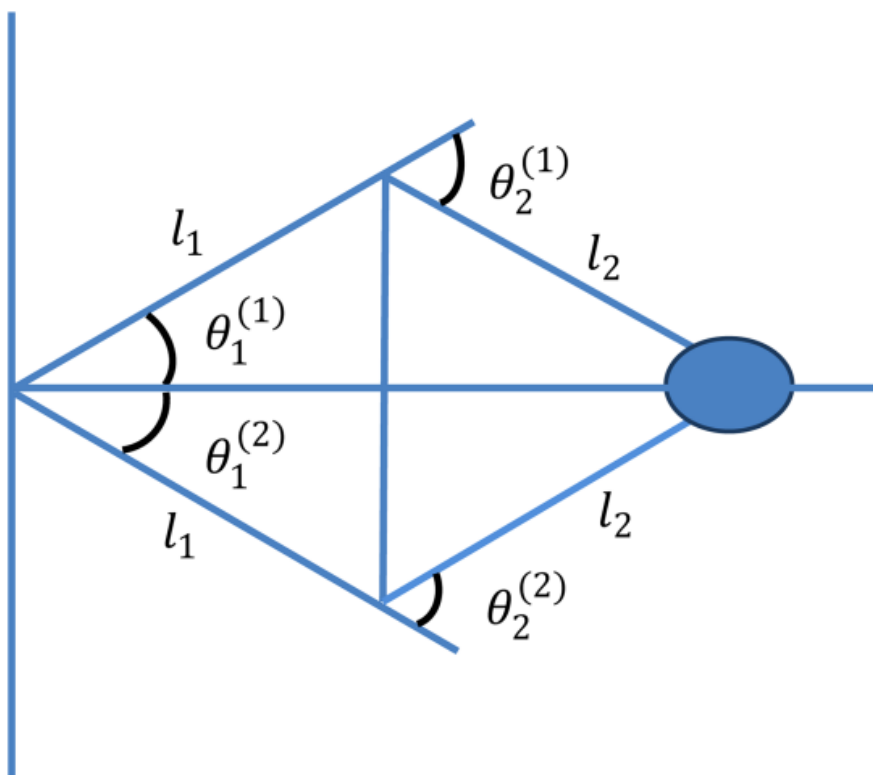


Рисунок 2.7 – Два рішення об'єктної орієнтації

Багаторазове рішення

Два різних значення v_1 , які спостерігаються в рівнянні. (2.16) показують шляхи двох розв'язків. Ці шляхи вирішення обговорюються в цьому розділі. На рисунку 2.7 показано два рішення об'єктної орієнтації.

Рішення лівої сторони:

$$\theta_2^{(1)} = 2A \tan 2(-v_1, b_1) \quad (2.33)$$

$$\theta_1^{(1)} = A \tan 2(P_2, P_1) - \frac{1}{2}\theta_2^{(1)} \quad (2.34)$$

Рішення правої сторони:

$$\theta_2^{(2)} = 2A \tan 2(v_1, b_1). \quad (2.35)$$

$$\theta_1^{(2)} = -A \tan 2(P_2, P_1) - \frac{1}{2}\theta_2^{(2)} \quad (2.36)$$

Перевірка наявності існування.

Значення m_1 з рівняння (2.16) можна записати так:

$$v_1 = \pm \sqrt{r^2 - b_1^2} \quad (2.37)$$

$$v_1 = \pm \sqrt{(r - b_1)(r + b_1)}. \quad (2.38)$$

Щоб забезпечити існування рішення, умова $(r - b_1 \geq 0)$ повинна бути забезпечена, як у рівнянні. (2.38). Досяжні максимальна та мінімальна довжини плечей показані на рисунку 2.8. Якщо аналіз виконується згідно з рисунком 2.8, тоді

$$r_{\max} = l_1 + l_2 \quad (2.39)$$

$$r_{\min} = l_1 - l_2 \quad (2.40)$$

Наявність рішень доступна за вищезазначеним умови.

Кінематика швидкості

Тепер, коли було отримано положення та орієнтацію кінцевого ефектора, потрібно знайти спосіб отримати робочі швидкості на основі швидкостей суглобів. А для цього потрібно використати матрицю Якобі.

Матриця Якобі в робототехніці використовується для багатьох методів обчислення, таких як плавне траєкторія планування та виконання, визначення сингулярності, виведення динамічних рівнянь руху та обчислення крутного моменту. Лінійні та кутові швидкості у робота SCARA можна знайти через спільні швидкості. Лінійну швидкість можна визначити в термінах положення кінцевого ефектора.

Геометричні матриці

Мета диференціальної кінематики полягає в тому, щоб знайти зв'язок між швидкостями суглоба та лінійною та кутовою швидкостями кінцевого ефектора. Іншими словами, бажано виразити лінійну швидкість кінцевого ефектора \dot{p} і кутову швидкість ω як функцію спільних швидкостей \dot{q} за допомогою таких співвідношень:

$$\dot{p} = J_p(q) \dot{q} \quad (2.41)$$

$$\omega = J_o(q) \dot{q} \quad (2.42)$$

У компактному вигляді 2.41 і 2.42 можна записати так:

$$\xi = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q) \dot{q} \quad (2.43)$$

Матриця J називається геометричним якобіаном, це матриця розміром b на n , де b — кількість можливих швидкостей $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, w_x, w_y, w_z)^T$, а n — кількість суглобів у роботі.

Геометричне обчислення Якобі залежить від типу з'єднання.

Якщо з'єднання призматичне, маємо:

$$J_i = \begin{bmatrix} R_{i-1}^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Для поворотного шарніра яacobіан обчислюється як:

$$J_i = \begin{bmatrix} R_{i-1}^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times (d_n^0 - d_{i-1}^0) \\ R_{i-1}^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Де d_i^0 є трансляційною частиною однорідної матриці H_i^0

Щоб отримати геометричний яacobіан для робота SCARA, потрібно обчислити однорідні матриці від кадру 0 до кадру i , $i = \overline{1,4}$

$$H_0^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$H_2^0 = H_1^0 H_2^1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & l_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & l_1 s\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$H_3^0 = H_2^0 H_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_{12} & -s\theta_{12} & 0 & l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_{12} \\ s\theta_{12} & c\theta_{12} & 0 & l_1 s\theta_1 + l_2 s\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Заміна кожного стовпця якобіана його компонентом призведе до:

$$\xi = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} R_0^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & R_1^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times (d_4^0 - d_1^0) & R_2^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times (d_4^0 - d_2^0) & R_3^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times (d_4^0 - d_3^0) \\ \hline 0 & R_1^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & R_2^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & R_3^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{array} \right] \begin{pmatrix} \dot{d}_4 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

Обчислення цієї матриці дає остаточний вираз геометричного якобіана:

$$J = \left[\begin{array}{c|c|c|c} 0 & -l_1 s\theta_1 - l_2 s\theta_{12} - l_3 s\theta_{123} & l_2 s\theta_{12} - l_3 s\theta_{123} & -l_3 s\theta_{123} \\ 0 & l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_{12} + l_3 c\theta_{123} & l_2 c\theta_{12} + l_3 c\theta_{123} & l_3 c\theta_{123} \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right] \quad (2.51)$$

Як бачимо, розмір цієї матриці Якобіана становить 4×6 , тому що у нас лише 4 суглоби. Було помічено, що 4-й і 5-й рядки нульові, і це очевидно, оскільки не можливо контролювати обертання навколо осей x і y . Оскільки матриця Якобі не є квадратною, вона не допускає обернення. Для цього потрібно видалити 4-й і 5-й ряди, оскільки вони все одно не потрібні. Далі отримуємо квадратну матрицю Якобі.

$$J_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & -l_1 s\theta_1 - l_2 s\theta_{12} - l_3 s\theta_{123} & l_2 s\theta_{12} - l_3 s\theta_{123} & -l_3 s\theta_{123} \\ 0 & l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_{12} + l_3 c\theta_{123} & l_2 c\theta_{12} + l_3 c\theta_{123} & l_3 c\theta_{123} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Відтепер для подальшого скорочення в цьому розділі, буде використано J як посилання на $J_{4 \times 4}$.

Функція MATLAB зі створення стовбця Якобіан:

```
function J = Ji ( H0_i , H0_n , jointType )
    % Обчислення стовбця i
    d = H0_n (1:3 , 4) - H0_i (1:3 , 4) ; d_n ^0 - d_i -1^0
    Ri = H0_i (1:3 , 1:3) ; R_i -1^0
    R = Ri (: , 3) ;
    if jointType == 'P' || jointType == 'p'
        J = [ R ; [0; 0; 0] ] ;
    elseif jointType == 'R' || jointType == 'r'
        J = [ cross (R , d ) ; R ] ;
    end
end
```

Щоб полегшити майбутні обчислення, було створено сценарій MATLAB, який може обчислити геометричний якобіан будь-якої конфігурації робота-маніпулятора. Також основа цього сценарію буде додана в кінцевий код моделі MATLAB для промислового маніпулятора. А саме скрипт MATLAB для отримання SCARA.[30-32]

Скрипт MATLAB для отримання SCARA Якобіан наведено нижче

```
%% Обчислення однорідних перетворень
HomogeneousTransformations
```

```

%% Стовбці Якобіана
J1 = Ji ( H0_0 , H0_4 , 'P' ) ;
J2 = Ji ( H0_1 , H0_4 , 'R' ) ;
J3 = Ji ( H0_2 , H0_4 , 'R' ) ;
J4 = Ji ( H0_3 , H0_4 , 'R' ) ;
J_full = [ J1 J2 J3 J4 ]; 6 x4 Jacobian
J = [ J_full (1:3 , :) ; J_full (6 , :) ]; 4 x4 Jacobian
invJ = simplify ( inv ( J ) ) ; J ^ -1

%% Обчислення символів
syms dx dy dz wx wy wz real
syms dq1 dq2 dq3 dq4 real

xi_full = [ dx ; dy ; dz ; wx ; wy ; wz ];
xi = [ dx ; dy ; dz ; wz ];
dq = [ dq4 ; dq1 ; dq2 ; dq3 ];

%% Якобіан
xi_full = J_full * dq ;
xi = J* dq

%% Інверсний Якобіан
dq = invJ * xiend

```

Аналітичне обчислення Якобіана

Існує ще один тип якобіана, який є аналітичним якобіаном, який обчислюється шляхом диференціювання прямої кінематичної функції відносно спільних змінних.

Поступальна швидкість кінцевого ефектора є похідною за часом вектора \dot{p} , тобто:

$$\dot{p} = \frac{\partial p}{\partial q} \dot{q} = J_p(q) \dot{q} \quad (2.53)$$

Наведені вище розділи показали спосіб обчислення швидкості кінцевого ефектора в термінах швидкості кадру кінцевого ефектора. Якобіан обчислюється за допомогою геометричної методики, у якій визначається внесок кожної спільної швидкості в компоненти кінцевої лінійної та кутової швидкості.

Якщо положення та орієнтація кінцевого ефектора задані в термінах мінімальної кількості параметрів у робочому просторі, природно запитати, чи можливо обчислити якобіан через диференціювання прямої кінематичної функції щодо спільних змінних. З цією метою нижче представлено аналітичну техніку для обчислення якобіана та знайдено існуючий зв'язок між двома якобіанами.

Поступальну швидкість кадру кінцевого ефектора можна виразити як похідну за часом від вектора \dot{p} , що представляє початок кадру кінцевого ефектора відносно базового кадру, тобто

$$\dot{p} = \frac{\partial p}{\partial q} \dot{q} = J_p(q) \dot{q} \quad (2.54)$$

Що стосується швидкості обертання рами кінцевого ефектора, можна розглянути мінімальне представлення орієнтації в термінах трьох змінних ϕ . Його похідна за часом $\dot{\phi}$ загалом відрізняється від вищезгаданого вектора кутової швидкості. У будь-якому випадку, як тільки функція $\phi(q)$ відома, формально правильно вважати отриманий якобіан як:

$$\dot{\phi} = \frac{\partial \phi}{\partial q} \dot{q} = J_\phi(q) \dot{q} \quad (2.55)$$

Застосування цього до робота PRRR SCARA дасть результат

$$\begin{cases} \dot{x} = -\dot{\theta}_1 (l_1 s\theta_1 + l_2 s\theta_{12} + l_3 s\theta_{123}) - \dot{\theta}_2 (l_2 s\theta_{12} + l_3 s\theta_{123}) - \dot{\theta}_3 (l_3 s\theta_{123}) \\ \dot{y} = \dot{\theta}_1 (l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_{12} + l_3 c\theta_{123}) + \dot{\theta}_2 (l_2 c\theta_{12} + l_3 c\theta_{123}) + \dot{\theta}_3 (l_3 c\theta_{123}) \\ \dot{z} = \dot{d}_4 \\ \dot{\phi} = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{cases} \quad (2.56)$$

Зворотний якобіан

У попередніх розділах було отримати швидкості кінцевого ефектора як функцію швидкостей суглобів, у цьому розділі буде цікаво отримати швидкості суглобів, які відповідають робочим швидкостям. Це можна зробити, попередньо помноживши рівняння (2.43) на обернену матрицю Якобі

$$J^{-1}\xi = J^{-1}J\dot{q} \quad (2.57)$$

Тоді отримаємо

$$\dot{q} = J^{-1}\xi \quad (2.58)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{d}_4 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

Обчислення оберненої матриці Якобі виконано в MATLAB, використовуючи попередній сценарій. Вираз оберненої матриці Якобі визначається як:

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{c\theta_{12}}{l_1 s\theta_2} & \frac{s\theta_{12}}{l_1 s\theta_2} & 0 & \frac{l_3 s\theta_3}{l_1 s\theta_2} \\ -\frac{l_2 c\theta_{12} - l_1 c\theta_1}{l_1 l_2 s\theta_2} & -\frac{l_2 s\theta_{12} - l_1 s\theta_1}{l_1 l_2 s\theta_2} & 0 & -l_3 \frac{l_1 s\theta_{23} + l_2 s\theta_3}{l_1 l_2 s\theta_2} \\ \frac{c\theta_1}{l_2 s\theta_2} & \frac{s\theta_1}{l_2 s\theta_2} & 0 & \frac{l_3 s\theta_{23} + l_2 s\theta_2}{l_2 s\theta_2} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Таким чином,

$$\begin{pmatrix} \dot{d}_4 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{c\theta_{12}}{l_1 s\theta_2} & \frac{s\theta_{12}}{l_1 s\theta_2} & 0 & \frac{l_3 s\theta_3}{l_1 s\theta_2} \\ -\frac{l_2 c\theta_{12} - l_1 c\theta_1}{l_1 l_2 s\theta_2} & -\frac{l_2 s\theta_{12} - l_1 s\theta_1}{l_1 l_2 s\theta_2} & 0 & -l_3 \frac{l_1 s\theta_{23} + l_2 s\theta_3}{l_1 l_2 s\theta_2} \\ \frac{c\theta_1}{l_2 s\theta_2} & \frac{s\theta_1}{l_2 s\theta_2} & 0 & \frac{l_3 s\theta_{23} + l_2 s\theta_2}{l_2 s\theta_2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

Останній вираз є виведеним рівнянням для обчислення матриці Якоба для універсального робота. Але в нашому випадку рівняння бути мати інший вигляд. Тобто більш спеціалізований для обраного промислового маніпулятора.

Після проведення проміжних операцій матриці Якобі отримаємо за допомогою рівнянь. (2.62) і (2.63):

$$J_v(\theta) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$J_w(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

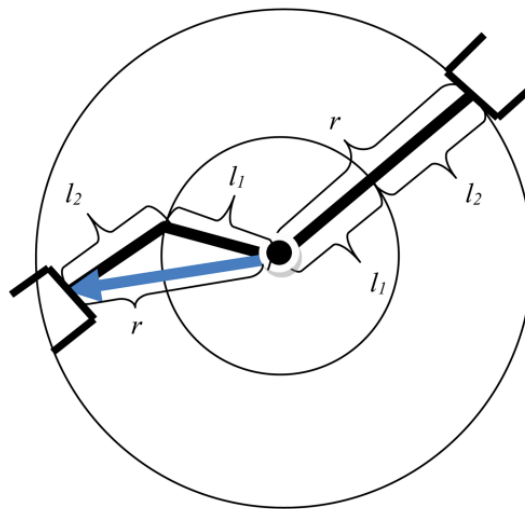


Рисунок 2.8 – Максимальні та мінімальні доступні для маніпулятора точки.

2.2 Моделі підключення компонентів промислового маніпулятора

Базова модель підключення драйвера зображено на рисунку 2.9

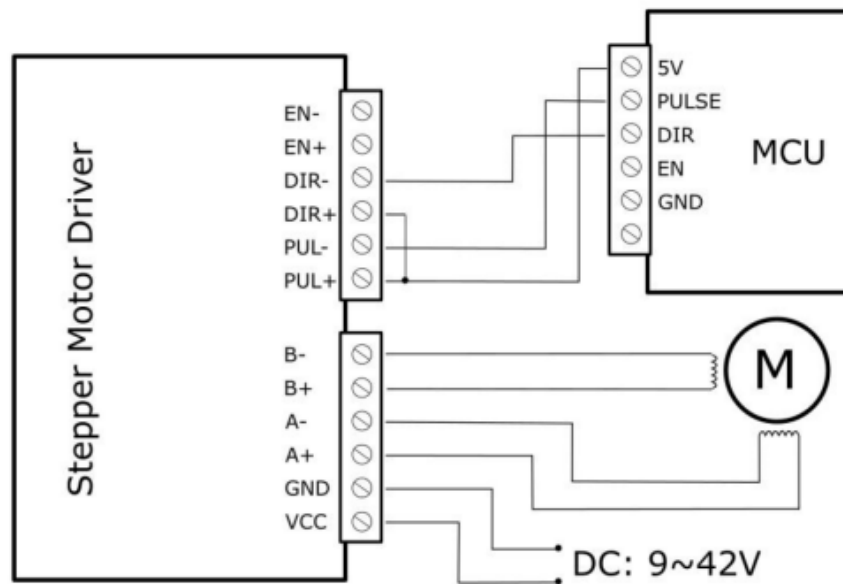


Рисунок 2.9 – Модель підключення драйвера TB6600, варіант а).

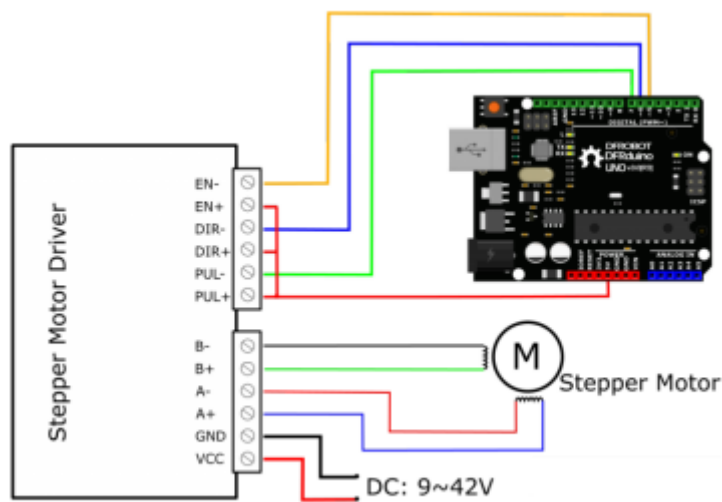


Рисунок 2.10 – Модель підключення драйвера TB6600, варіант б).

Драйвер TB6600 дозволяє змінювати підключення. А саме вибрати схему підключення з загальним катодом чи анодом. Інший варіант підключення зображено на рисунку 2.10.

Це розширює можливості по підключенню драйвера до крокового мотору. Звісно потрібно не плутати з'єднанні клеми. Фактично обидва варіанти дозволяють користуватися драйвером повною мірою, лише збільшуючи пластичність

підключень. В даній роботі було обрано підключення загальним мінусом. Це дозволяє ефективно використовувати провідники.

Базова модель підключення контролера МАСНЗ зображено на рисунку 2.11

У даній роботі буде використано схожу схему. Різниця лиш в тому, представлена на рисунку модель призначена для роботи в 3-d принтерах. І має відповідні підключення Іп каналів. А для роботи в режимі маніпулятора ці вхідні клеми не будуть застосовуватися.

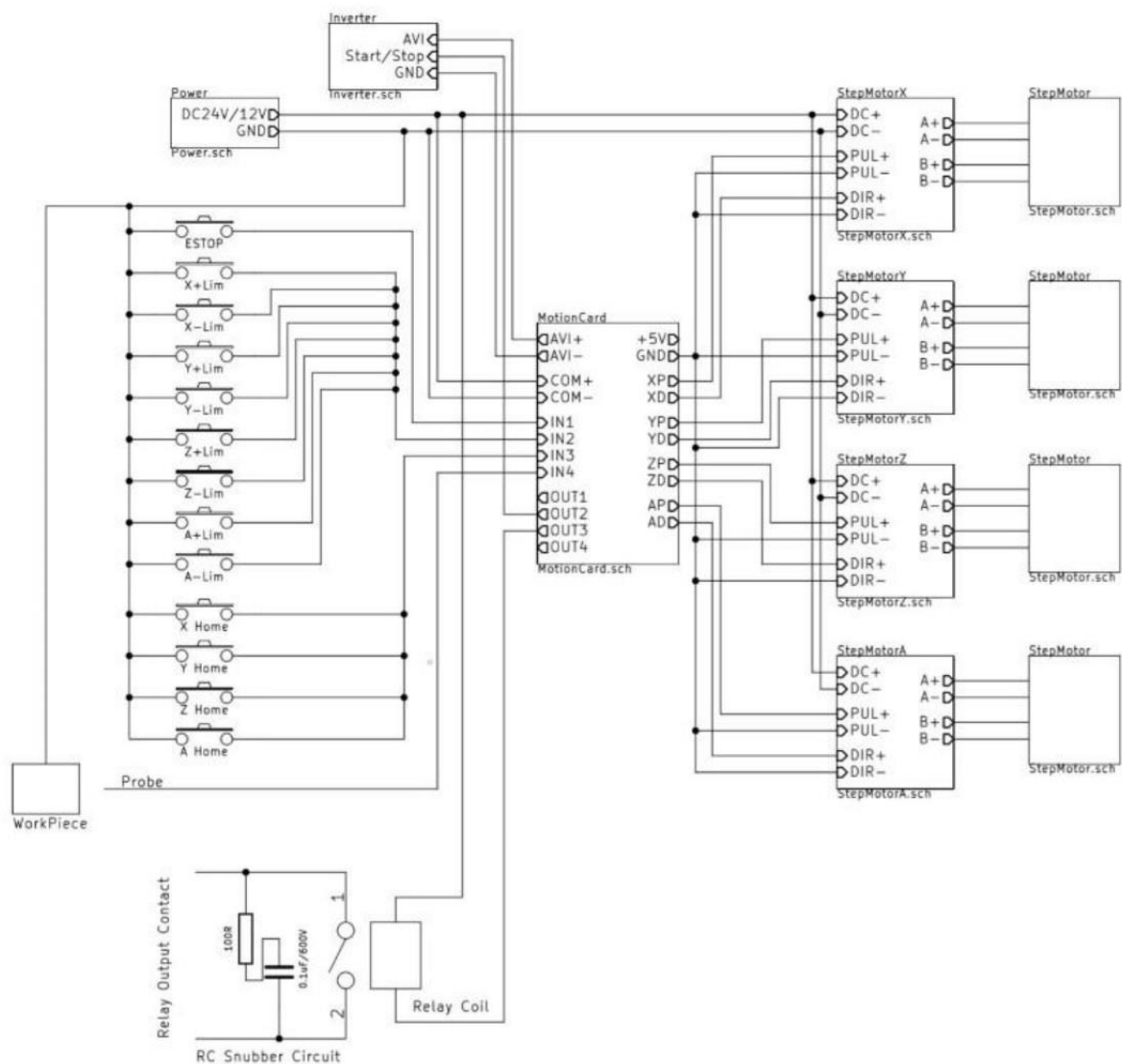


Рисунок 2.11 – Модель підключення контролера МАСНЗ.

2.3. Висновки до другого розділу

Проведено огляд методів моделювання переміщення маніпулятора, а саме геометричний і аналітичний. Для даної роботи обрано аналітичний. Після обрання методу було проведено обчислення для передньої і зворотної кінематики. На основі аналітичного методу було запропоновано матрицю Якобі для обчислення переміщень маніпулятора рівняння (2.62). Також було представлено частину обчислень у середовищі MATLAB.

На основі аналізу засобів із першого розділу було побудовано схему підключення. Далі було побудовано принципову схему промислового маніпулятора.

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ МАНІПУЛЯТОРА

3.1 Експериментальне налагодження маніпулятора

Управління роботом

Більшість роботів приводяться в рух приводами, які прикладають силу або крутний момент до кожного з'єднання. Отже, точне керування роботом вимагає розуміння взаємозв'язку між з'єднаними силами та крутними моментами та рухом робота; це область динаміки. Однак навіть для простих роботів динамічні рівняння складні й залежать від точного знання маси та інерції кожної ланки, яке може бути недоступним. Навіть якби це було так, динамічні рівняння все одно не відображали б такі фізичні явища, як тертя, пружність, люфт і гістерезис. Більшість практичних схем керування компенсують ці невизначеності за допомогою керування зі зворотним зв'язком. Після вивчення обмежень продуктивності керування зі зворотним зв'язком без динамічної моделі робота було обрано алгоритми керування рухом, які обчислюють керування крутним моментом.

Цілі контролю:

1. Motion Control, робот повинен рухатися по певній траєкторії. прикладами цього є: фарбування, точкове зварювання, лазерне різання, 3D-друк тощо. У цих завданнях траєкторія дуже важлива.

2. Force Control, робот має застосувати бажану силу до об'єкта чи середовища. Як і при піднятті яйця, якщо сила захоплення занадто сильна, це може розбити яйце, з іншого боку, якщо сила захоплення занадто слабка, воно може впасти.

3. Hybrid Motion-Force Control, оскільки проводиться написання на дошці, потрібно контролювати траєкторію кінцевого ефектора в плані дошки, і сила, що притискається до дошки, вона не повинна бути ні надто потужною, щоб не зламати дошку, ні занадто слабкий, що він втрачає контакт із дошкою, і тоді не буде присутній слід ручки.

4. Контроль імпедансу: коли робот використовується для візуалізації віртуального середовища, користувач бере кінцевий ефектор і переміщує його, щоб досліджувати об'єкти у віртуальному світі. Цю мету керування можна використовувати для розробки ігор віртуальної реальності, фільмів або використовувати для імітації апаратного забезпечення, яке недоступне або дороге та потребує особливого догляду.

Незалежний спільний контроль

Незалежний спільний контроль є найпростішим контролером, оскільки він припускає відсутність зв'язку між ланками, ніби вони повністю незалежні, а потім він використовує деякі звичайні контролери зі зворотним зв'язком (наприклад, PID) у кожній ланці для управління позиціями об'єднань. Блок-схема ПІД-регулятора показана на рисунку 3.1:

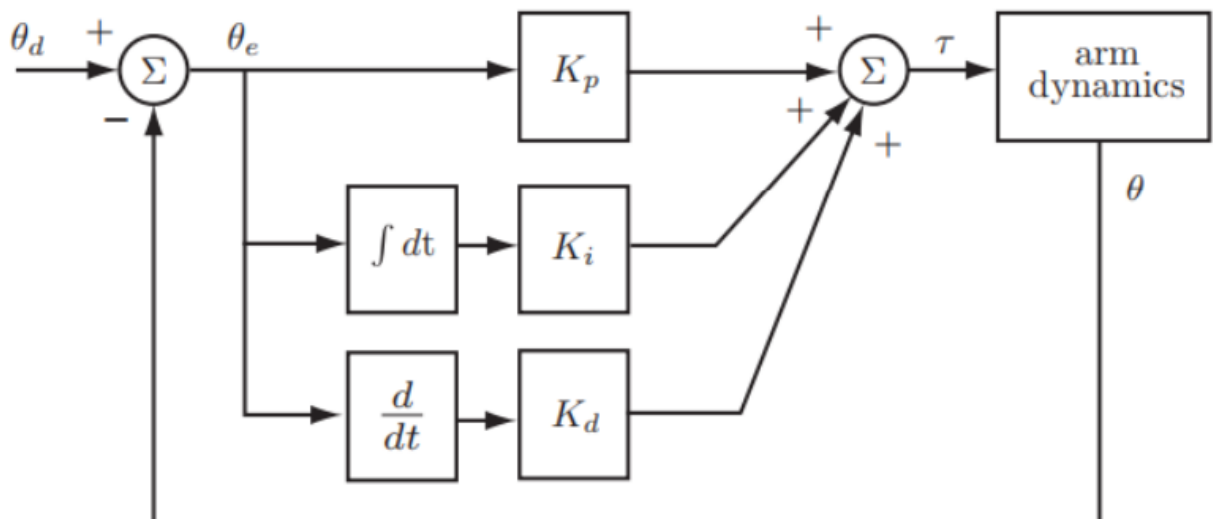


Рисунок 3.1 – Структурна схема ПІД-регулятора

Далі буде розглянуто найпростіший робот з одним суглобом.

ПІД контролер

Щоб компенсувати помилку сталого стану, було розглянуто можливість додавання інтегральної дії до нашого контролера. Таким чином отримано ПІД-регулятор:

$$\mathcal{T} = K_p \theta_e + K_i \int \theta_e dt + K_d \dot{\theta}_e \quad (3.1)$$

Прирівнювання динаміки з'єднання та керуючого крутного моменту дає:

$$K_p \theta_e + K_i \int \theta_e dt + K_d \dot{\theta}_e = M \ddot{\theta} + \beta \dot{\theta} - mg l_g \cos(\theta + \phi) \quad (3.2)$$

Оскільки $\cos(\theta + \phi)$ є константою в стаціонарному стані, отримано можливість безпечно замінити його константою, отже:

$$\mathcal{T}_{dist} = mg l_g \cos(\theta + \phi) \quad (3.3)$$

Тоді отримуємо:

$$M \ddot{\theta}_e + (\beta + K_d) \dot{\theta}_e + K_p \theta_e + K_i \int \theta_e dt = \mathcal{T}_{dist} \quad (3.4)$$

Диференціація двох сторін призведе до диференціального рівняння третього порядку:

$$M \theta_e^{(3)} + (\beta + K_d) \theta_e^{(2)} + K_p \theta_e^{(1)} + K_i \theta_e = 0 \quad (3.5)$$

Характеристичне рівняння цього диференціального рівняння задається формулою:

$$\Delta(s) = s^3 + \frac{\beta + K_d}{M} s^2 + \frac{K_p}{M} s + \frac{K_i}{M} = 0 \quad (3.6)$$

Використання критерію стійкості Рауса-Гурвіца для отримання обмежень на K_p , K_d і K_i , які забезпечують (принаймні) стабільність системи:

$$\begin{array}{c|cc}
 s^3 & 1 & \frac{K_p}{M} \\
 s^2 & \frac{\beta + K_d}{M} & \frac{K_i}{M} \\
 s^1 & \frac{K_p\beta + K_dK_p - MK_i}{M(\beta + K_d)} & 0 \\
 s^0 & \frac{K_i}{M} & 0
 \end{array} \quad (3.7)$$

Щоб це рівняння було стабільним, тобто мало всі корені в правій половині плану, усі елементи першого стовпця в таблиці повинні мати однаковий знак (у цьому випадку додатний), і жоден з них не повинен бути нульовим, було отримано наступні обмеження:

$$0 < K_p \quad -\beta < K_d \quad 0 < K_i < \frac{K_p(\beta + K_d)}{M} \quad (3.8)$$

На відміну від K_p і K_d , інтегральний коефіцієнт підсилення K_i має як верхню, так і нижню смуги. і записується як функція K_p і K_d . Налаштовуючи підсилення ПД, потрібно спочатку встановити K_p і K_d , а потім обчислити K_i , що забезпечує стабільність. Тепер, коли було отримано характеристичне рівняння системи, є можливість використовувати розташування полюсів, щоб отримати відповідні підсилення ПД.

$$\begin{aligned}
 \Delta(s) &= (s - s_1)(s - s_2)(s - s_3) \\
 \Delta(s) &= s^3 - (s_1 + s_2 + s_3)s^2 + (s_1s_2 + s_2s_3 + s_3s_1)s - s_1s_2s_3 \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

Визначення 3.6 і 3.9 дасть нам такі рівності:

$$\begin{cases}
 K_p = M(s_1s_2 + s_2s_3 + s_3s_1) \\
 K_i = -Ms_1s_2s_3 \\
 K_d = -M(s_1 + s_2 + s_3) - \beta
 \end{cases} \quad (3.10)$$

- Було встановлено $K_i = 0$ і вибрано K_p і K_d , щоб дати відповідь на критичний демпінг.
- Встановивши $K_i = \varepsilon$, отримано невелике позитивне підсилення, яке створює 3-й полюс s_3 , близький до початку координат.
- Коли було збільшено посилення K_i , перші два полюси віддаляються один від одного, а третій полюс наближається до першого.
- При достатньому збільшенні K_i перший і третій полюси будуть розташовані поряд.
- При збільшенні K_i уявні частини першого та третього полюсів рухаються один до одного $s_1 = \bar{s}_3$, що призводить до коливального відгука.
- При $\frac{K_p(\beta + K_d)}{M} < K_i$ перший і третій полюси будуть розташовані в правій половині плану, що робить систему нестійкою.

Цей аналіз показує, що K_i покращує похибку стійких станів, але погіршує перехідний відгук і може навіть викликати нестабільність. Ось чому потрібно вибрати якомога менший K_i . інакше використовувати іншу схему керування, тобто обчислений крутний момент, який представлено далі.

Обчислене керування крутним моментом - СТС

З 2 розділу зрозуміло, що рівняння динаміки робота є пов'язаними, змінними в часі та сильно нелінійними системами. У попередньому розділі було застосовано лінійні контролери. Вони дали хороші результати для вирішення проблеми керування заданим значенням. Цього разу буде цікаво вивчити нелінійний контролер, який є обчисленим керуванням крутним моментом.

Обчислений крутний момент — це добре відома схема керування, яка використовує модель динаміки робота для керування роботом. Цей регулятор задано рівнянням:

$$\tau = \tilde{M}(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_v\dot{\theta}_e + K_p\theta_e) + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta}) + \tilde{G}(\theta) \quad (3.11)$$

Де K_v і K_p — симетричні позитивно визначені матриці планування. $\tilde{M}, \tilde{C}, \tilde{G}$ є розрахунковою матрицею мас, членом добутку швидкості та членом сили тяжіння відповідно. якщо модель ідеальна, то $\tilde{M} = M, \tilde{C} = C, \tilde{G} = G$

Незважаючи на те, що рівняння (3.11) дуже схоже на контролер PD, СТС є нелінійним контролером, оскільки посилення позиції та швидкості не є постійними (тобто змінюються в часі) і вони явно залежать від похибки θ_e , переписуючи рівняння (3.11), використовуючи той факт, що $\theta = \theta_d - \theta_e$ полегшить це спостереження.

$$\tau = \tilde{M}(\theta_d - \theta_e)K_v\dot{\theta}_e + \tilde{M}(\theta_d - \theta_e)K_p\theta_e + \tilde{M}(\theta_d - \theta_e)\ddot{\theta}_d + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta}) + \tilde{G}(\theta) \quad (3.12)$$

Блок-схема типового обчисленого контролера крутного моменту наведена на рисунку 3.12

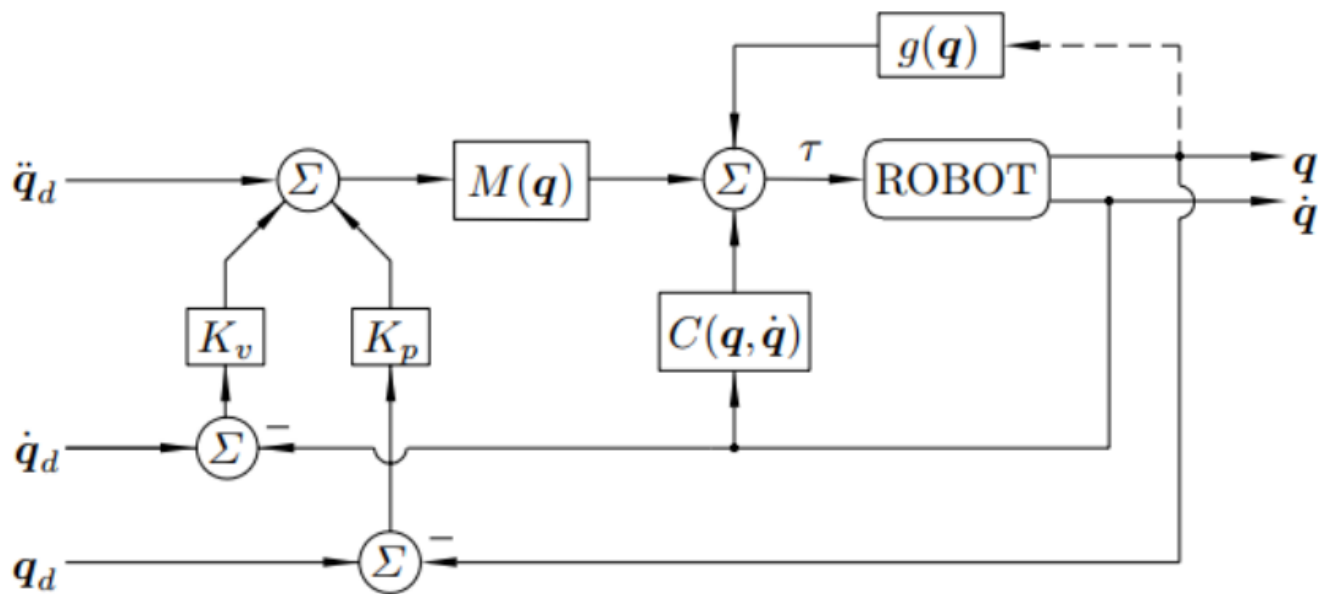


Рисунок 3.2 – Блок-схема обчисленого контролера моменту

Якщо спробувати прирівняти крутний момент регулятора та крутний момент динамічної моделі припускаючи, що $\tilde{M} = M, \tilde{C} = C, \tilde{G} = G$

$$M(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_v\dot{\theta}_e + K_p\theta_e) = M(\theta)\ddot{\theta} \quad (3.13)$$

Відомо, що матриця мас позитивно визначена, тому можливо обчислити її обернену функцію.

Попередньо помноживши дві сторони рівняння (3.13), отримаємо

$$\ddot{\theta}_e + K_v \dot{\theta}_e + K_p \theta_e = 0 \quad (3.14)$$

Рівняння (3.15) — це N лінійних звичайних диференціальних рівнянь другого порядку. Було обрано елементи K_v і K_p для надання критичних відповідей, тобто $\xi = 1$.

$$K_v = 2\sqrt{K_p} \quad (3.15)$$

Симуляція

Було розроблено комп'ютерний регулятор крутного моменту для робота з одним шарніром, це показано на рисунку 3.3. Встановили підсилення $K_p = 10$, а $K_v = 2\sqrt{10}$

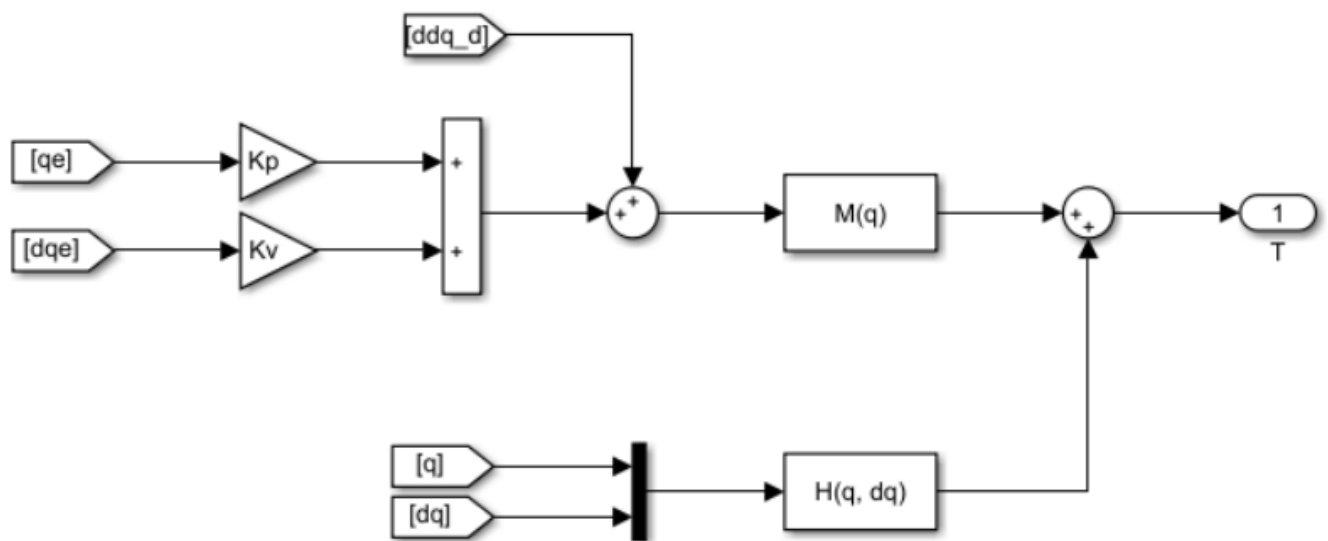


Рисунок 3.3 – Реалізація обчисленого контролера крутного моменту в SIMULINK

Сигнали, які подає блок генератора траєкторії, показані на рисунку 3.5

З рисунку 3.6 очевидно, що цей контролер має хороші можливості відстеження.

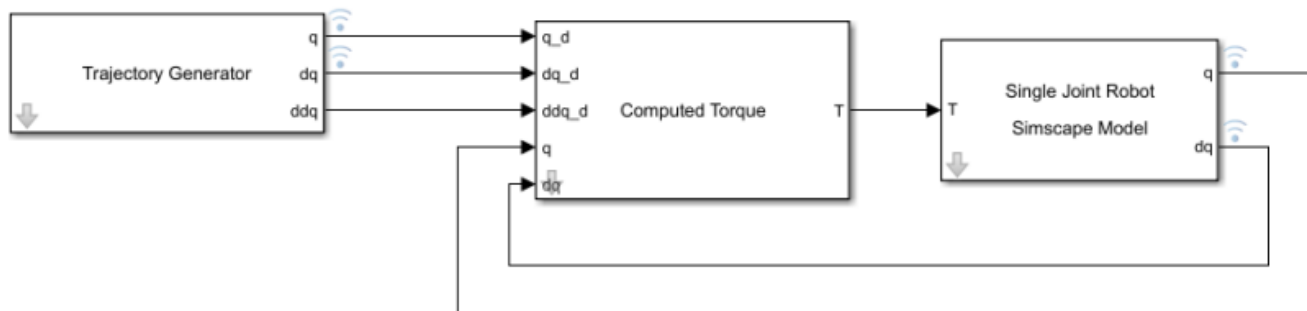


Рисунок 3.4 - Управління роботом з одним з'єднанням за допомогою CTC у SIMULINK

Загальна модель SIMULINK зображена на рисунку 3.4

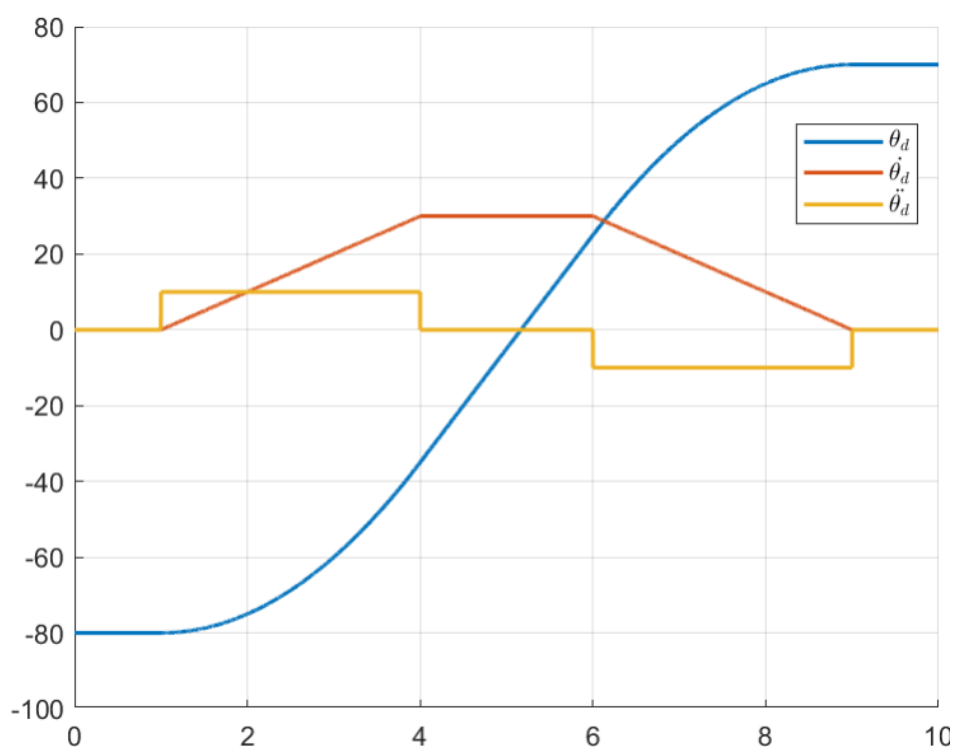


Рисунок 3.5 – Вихідні сигнали генератора траєкторії

Нижче наведено дослідження впливу приблизних оцінок динамічної моделі на відстеження траєкторії. Параметри контролерів було встановлено наступними:

$$m = 1 \text{ kg} \quad l_g = 0.1 \text{ m} \quad I = 0.009 \text{ kg.m}^2 \quad \beta = 0.1 \text{ N.m/s} \quad (3.16)$$

Після моделювання зображеного на рисунку 3.7 очевидно, що контрольне відстеження більше не є хорошим, це показує, наскільки важливо мати хороші оцінки робота. Коротше кажучи, обчислене керування крутним моментом є

потужним контролером, хоча краще його використовувати лише в тому випадку, якщо маємо гарну динамічну модель. Якщо ні, інші набагато простіші контролери можуть мати вищу продуктивність, ніж СТС.

Для установки маніпулятора SCARA бажано використовувати жорсткий лінійний механізм. Цей лінійний механізм дозволяє руці робота рухатися вгору та вниз. Причина, чому цей механізм є кращим, полягає в простоті керування, що забезпечується кроковим двигуном, точними кроками подачі та вантажопідйомністю.

Ефективний діапазон руху механізму по горизонтальній осі становить 275 мм. Точність 0,05 мм за застосованою якісною кульковою гвинтовою головкою. Швидкість горизонтального переміщення в навантаженому стані становить 100 мм/с, а максимальне горизонтальне підйомне навантаження становить 10 кг. Драйвер двигуна ТВ 6600 і контролер МАСНЗ використовуються для керування кроковим двигуном, який забезпечує лінійний рух. Крім того, серводвигун, який використовується в захваті, також керується контролером МАСНЗ. На рисунку 3.8 зображено лінійний механізм, що використовується в системі, і схему підключення керування кроковим двигуном [32-34], що використовується при русі по горизонтальній осі.

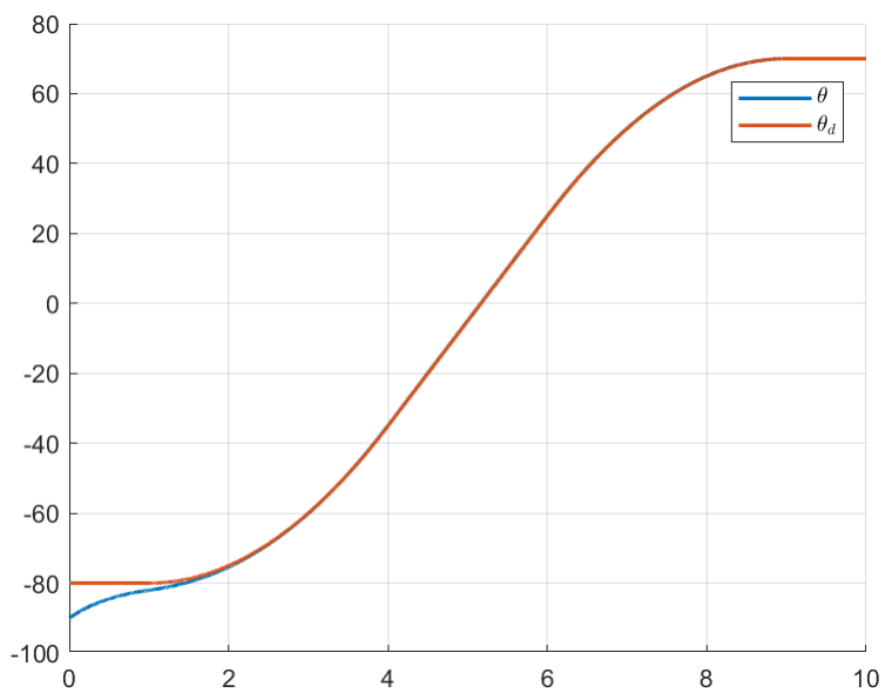


Рисунок 3.6 – Реакція СТС на змінну траєкторію

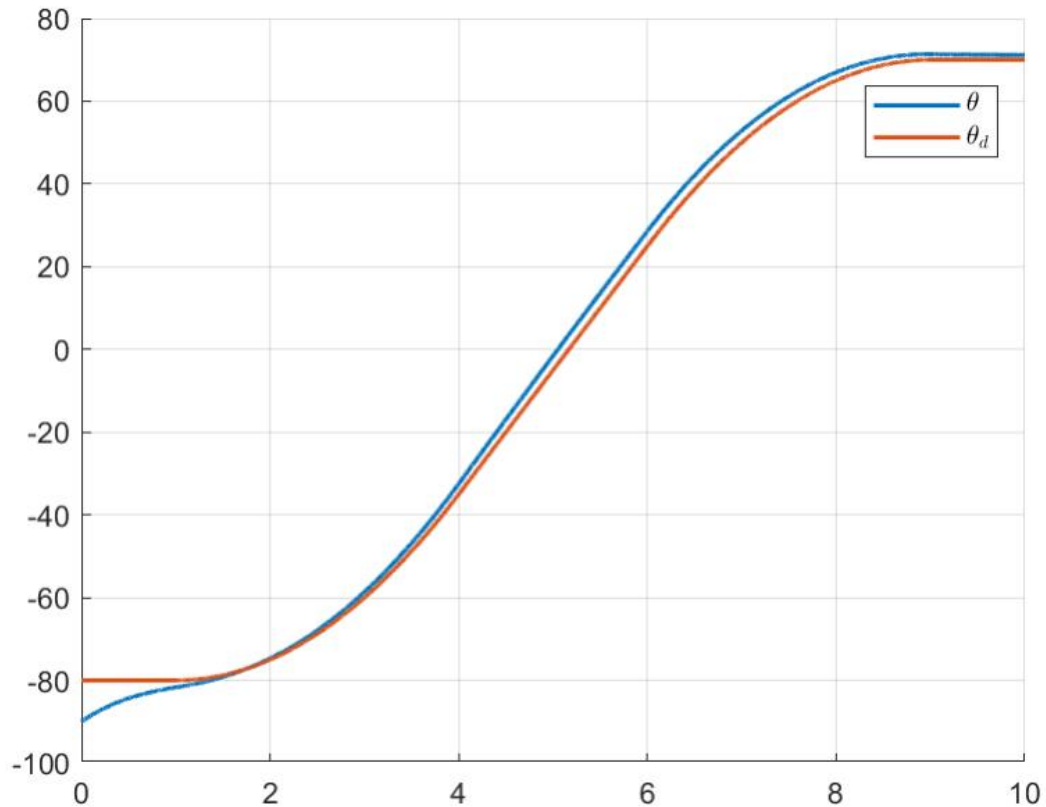


Рисунок 3.7 – Реакція СТС на змінну траєкторію

4-осьовий контролер BSMCE04U-PP задовільно працює, але через різкий рух двигуна на вищих частотах кроків, це не дуже хороший контролер для високих частот кроків. Він добре працює для крокових двигунів з частотою нижче 50 кГц. Це хороша заміна паралельного порту з налаштуванням швидкості ядра MACH3 45 кГц. Швидкість кроку 50 кГц становить 1875 обертів за хвилину з кроковим драйвером, встановленим на 8 мікрокроків. Висока швидкість двигуна для більшості програм із ЧПК.[35] Тестування виконано за допомогою крокового драйвера GeckoDrive GM215 і двигуна nema17.

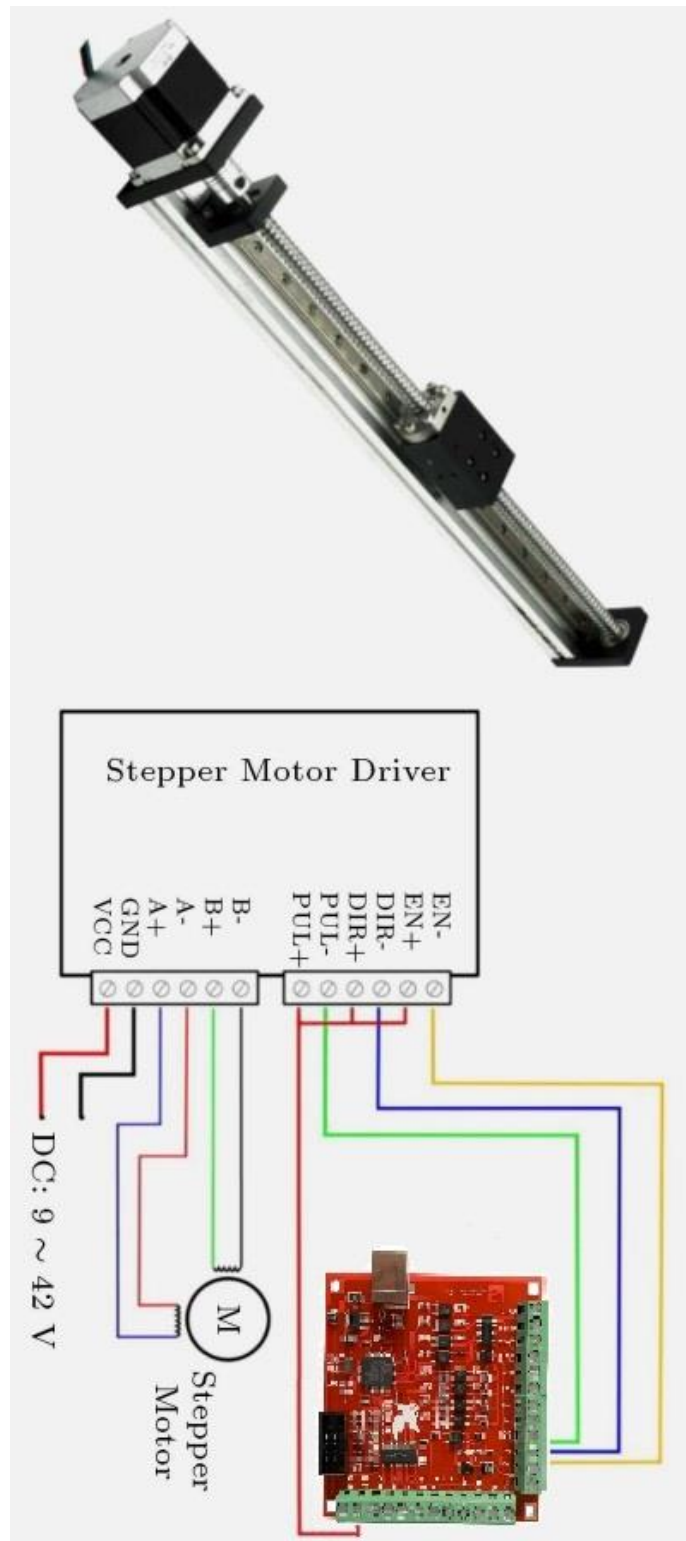


Рисунок 3.8 – Схема підключення лінійного механізму та крокового двигуна

Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата



Рисунок 3.9 – Перше підключення компонентів маніпулятора

Для поворотних з'єднань системи використано два серводвигуни Dynamixel AX12A [36]. З багатьма функціями зворотного зв'язку ці серводвигуни мають програмовану інтегровану інфраструктуру, готову систему підключення до мережі, редуктори, готові з'єднання та прості монтажні вставки. Двигуни мають постійний крутний момент 1,5 Нм і частоту обертання 59 об/хв. Захоплення двигуна здійснюється за допомогою невеликого сервомотора та механізму захоплення. Управління серводвигунами Dynamixel у поворотних шарнірах здійснюється за допомогою карти керування MACH4 з 32-розрядним процесором ARM Cortex-M3 і модулем розширення OpenCM485 EXP.[37] На рисунку 3.10 показано плату

керування, серводвигун і контактні з'єднання, а на рисунку 3.9 показано перше підключення.

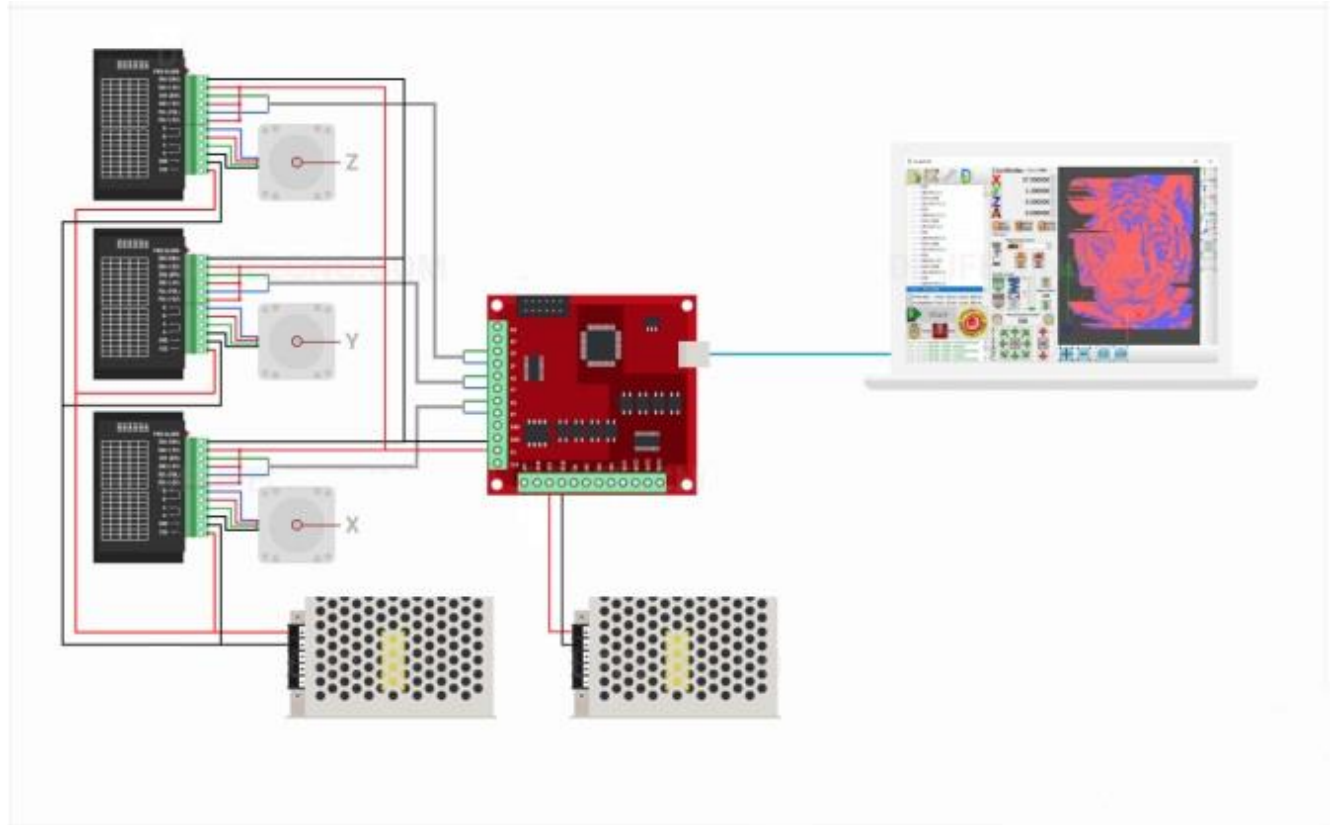


Рисунок 3.10 – Діаграма підключення компонентів

На рисунку 3.11 зображено інтерфейс панелі мануального керування із екраном 3-D візуалізації.

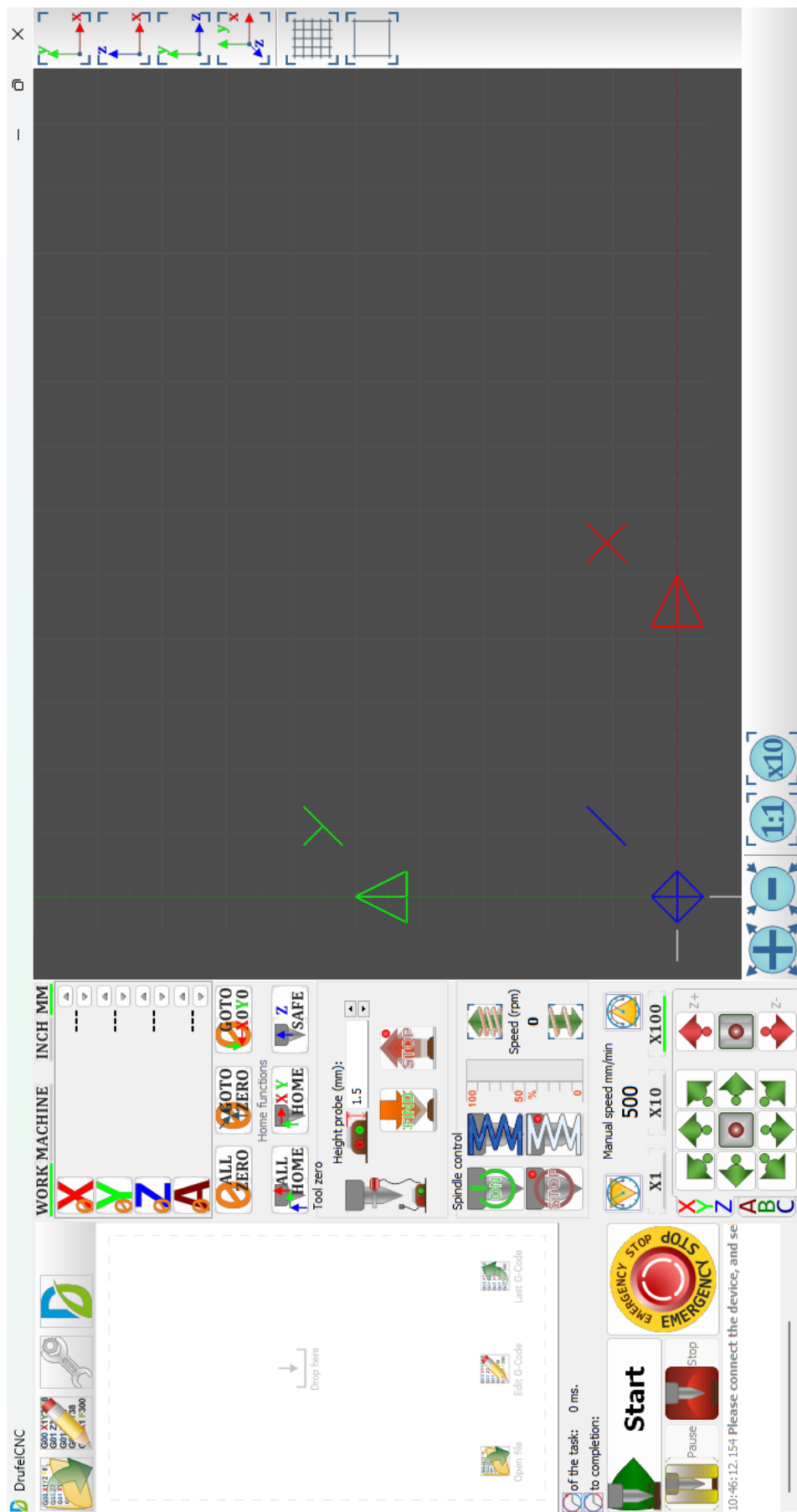


Рисунок 3.11 – Інтерфейс панелі контролю

Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата

КВРАКІТ.20062.01.14.ПЗ

Арк.

61

3.2 Структура моделі промислового маніпулятора

Через однакові типи двигунів, що використовуються в системі SCARA, керування здійснювалося за допомогою плат керування MACH3 та TB6600. Усі кінематичні та інші розрахунки, що використовуються при русі маніпулятора, виконувалися за допомогою програми MATLAB. Команди керування передаються через програмне забезпечення MATLAB, і відповідно до значень, введених на екран моделювання, робот рухається з бажаною швидкістю. Об'єкти в робочому просторі були зняті зі своїх місць і переміщені в потрібні координати. Доки маніпулятор SCARA у вихідному положенні не вибере об'єкт із певної координати та розмістить його в потрібному координатному положенні.

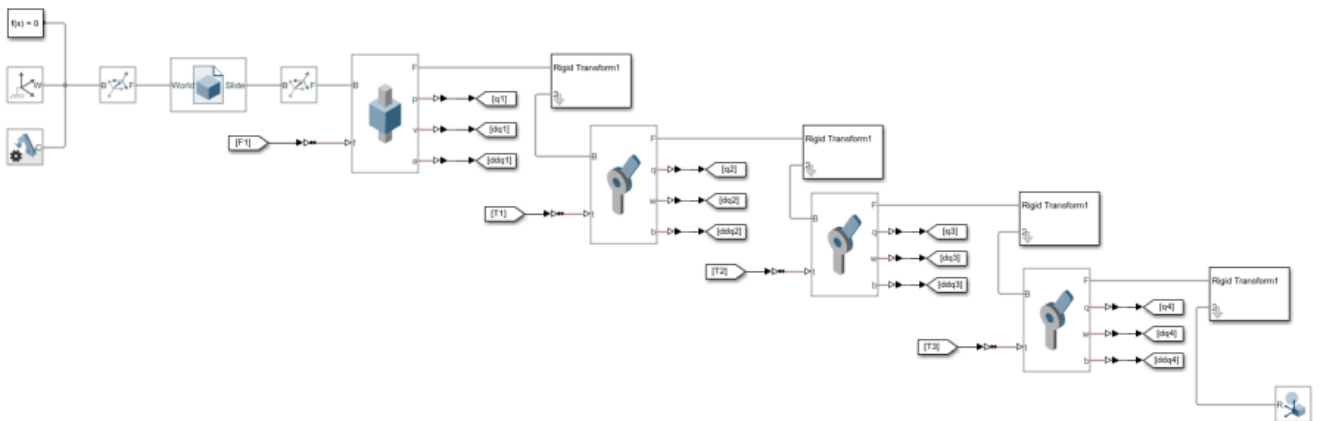


Рисунок 3.12 – Модель Simscape робота PRRR SCARA

Щоб змодельовати динаміку робота PRRR SCARA, було створено модель SIMULINK, показану на рисунку 3.12. Це було зроблено за допомогою Simscape Multibody toolbox. Модель містить одне призматичне з'єднання та 3 поворотних з'єднання, зв'язки були змодельовані за допомогою програмного забезпечення САПР під назвою Autodesk Fusion 360, файли САПР зображені на рисунку 3.15. Також показано компоненти моделі.

Повна модель Simulink показана на рисунку 3.13

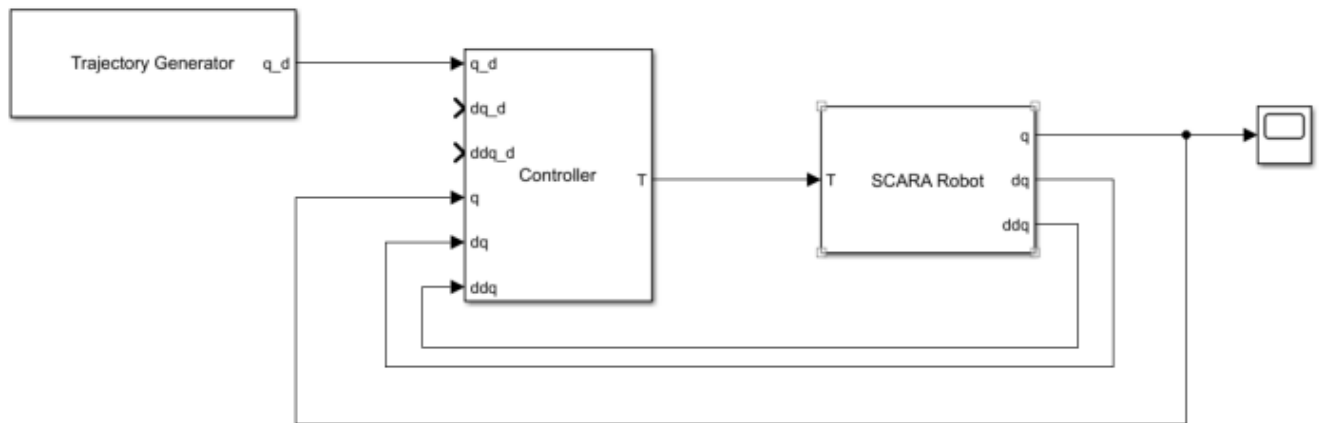


Рисунок 3.13 – Модель SIMULINK

Генератор траєкторій, показаний на рисунку 3.14, є блоком, який генерує траєкторії з'єднань із декартових траєкторій, він робить це за допомогою блоку зворотної кінематики.

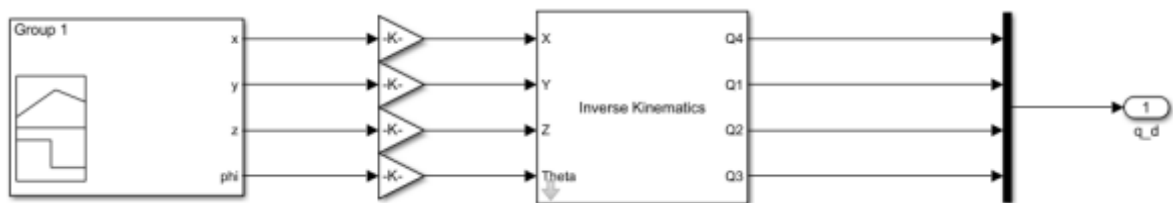


Рисунок 3.14 – Блок генератора траєкторії

Після моделювання відкривається провідник механіки, що дозволяє візуалізувати рух у 3D-просторі. На рисунку 3.16 показано кінцеву модель промислового маніпулятора. Autodesk Fusion дозволяє доволі легко створювати складні 3-D моделі різних об'єктів і дає змогу здійснювати зміну положення рухомих частин.

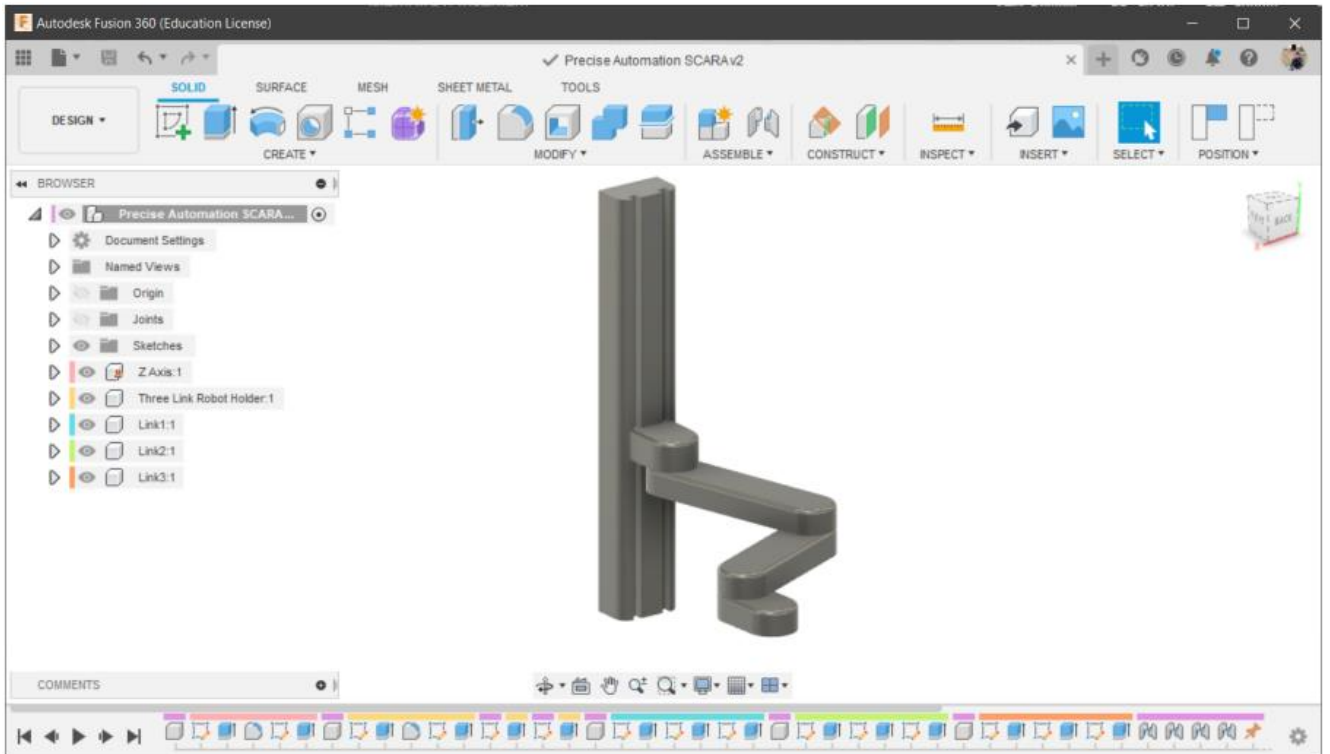


Рисунок 3.15 – CAD-файл робота SCARA

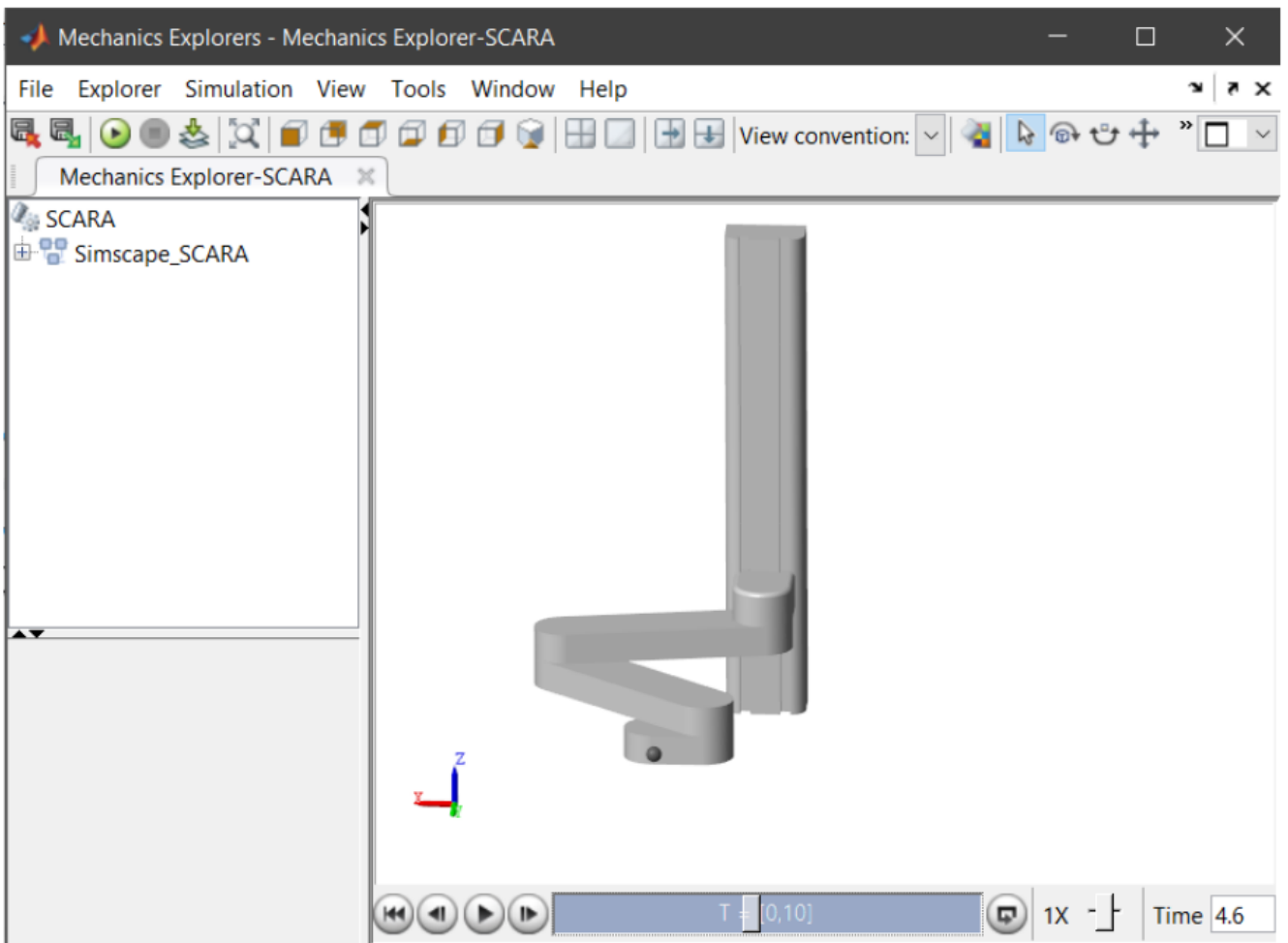


Рисунок 3.16 – Модель робота SCARA

Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата

Результати роботи показані на рисунках 3.17 і 3.18

Потрібно зауважити, що контролер PD підходить для керування роботом SCARA, оскільки він складається з набору ланок у горизонтальному плані. Хоча рух досить зривистий.

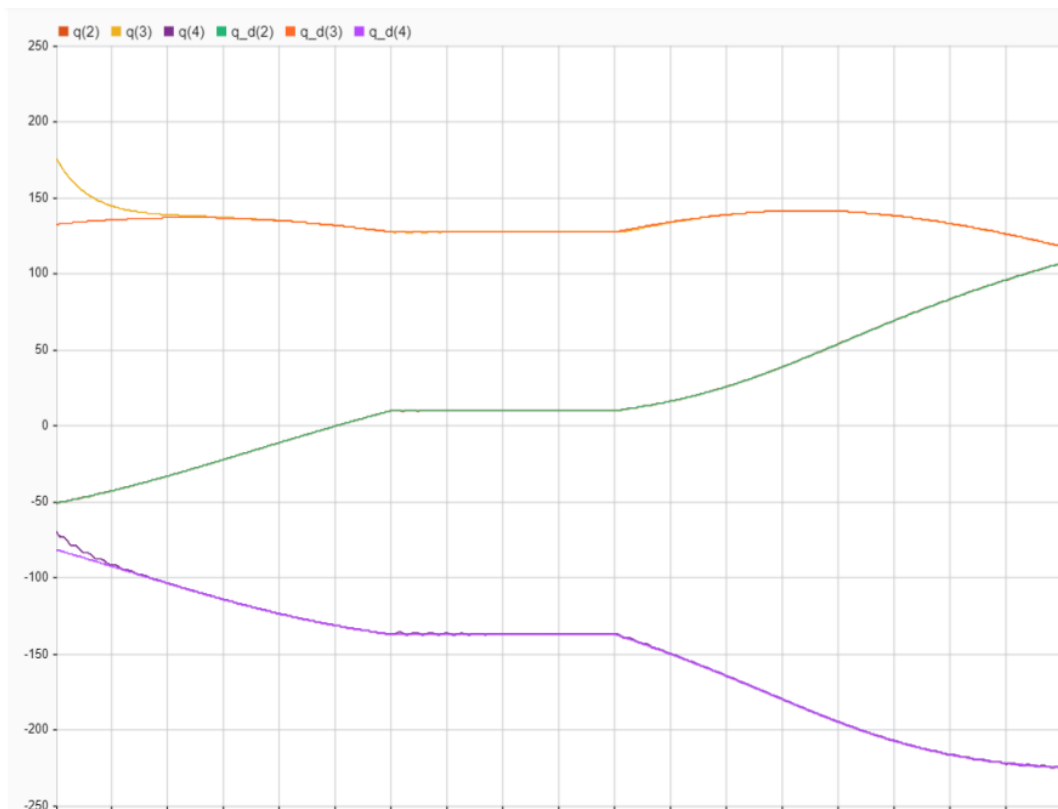


Рисунок 3.17 – Відстеження положення поворотних шарнірів

На рисунку 3.19 показано головну панель керування роботом та інтерфейс кінематичних розрахунків. За допомогою цього інтерфейсу виконуються кінематичні розрахунки та операції автоматичного та ручного керування.

Планування траєкторії - це планування руху робота відповідно до бажаної траєкторії, швидкості, прискорення та часу від поточного положення до бажаного положення кінцевого ефектора. Бажано, щоб робот міг рухатися плавно та без вібрацій, не перевищуючи межі приводу та не розбиваючи жодного об'єкта в робочому просторі.

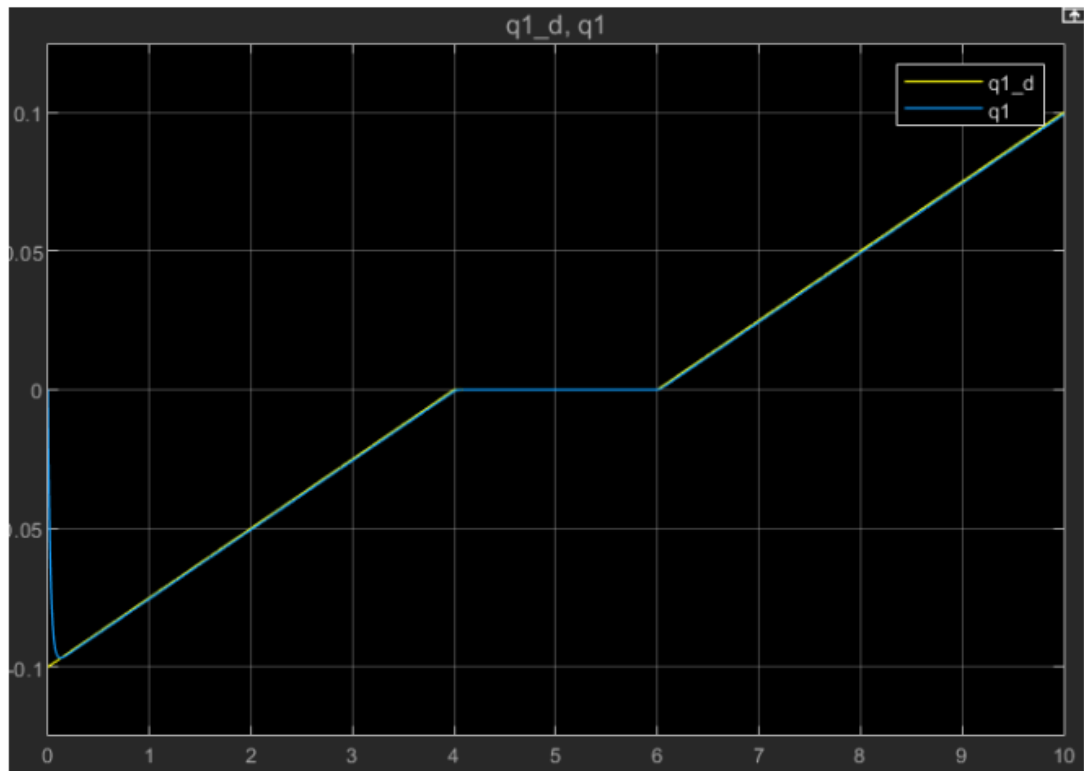


Рисунок 3.18 – Відстеження положення призматичних з'єднань

У методі лінійної траєкторії, навіть якщо всі суглоби робота з n ступенями свободи слідує лінійній траєкторії, кінцевий ефектор не проходить лінійно між двома точками. Додаванням параболічних частин до початку та кінця траєкторії забезпечується безперервність положення та швидкості. Крім того, також забезпечується плавна швидкість за допомогою постійного прискореного руху на параболічній траєкторії. Плани лінійної траєкторії, додані параболічними частинами для поворотного та лінійного шарнірів робота, показані на рисунку 3.21. На графіках показано значення переміщення, швидкості та прискорення кожного шарніра залежно від часу.

Робот автоматично моделюється в середовищі MATLAB VRML [38-40] з одночасним досягненням потрібної точки через автоматичну панель керування. Таким чином, експериментальні дослідження можна контролювати через програмний інтерфейс комп'ютера.

На рисунку 3.20 показана панель автоматичного керування та екран тривимірного моделювання.

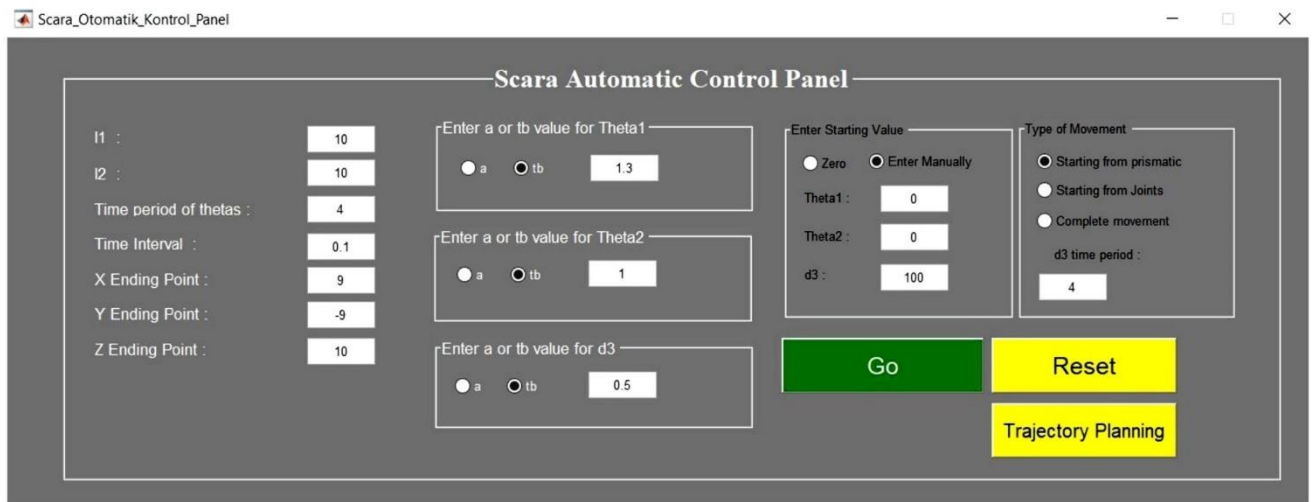


Рисунок 3.19 – Панель автоматичного контролю



Рисунок 3.20 – Головна панель

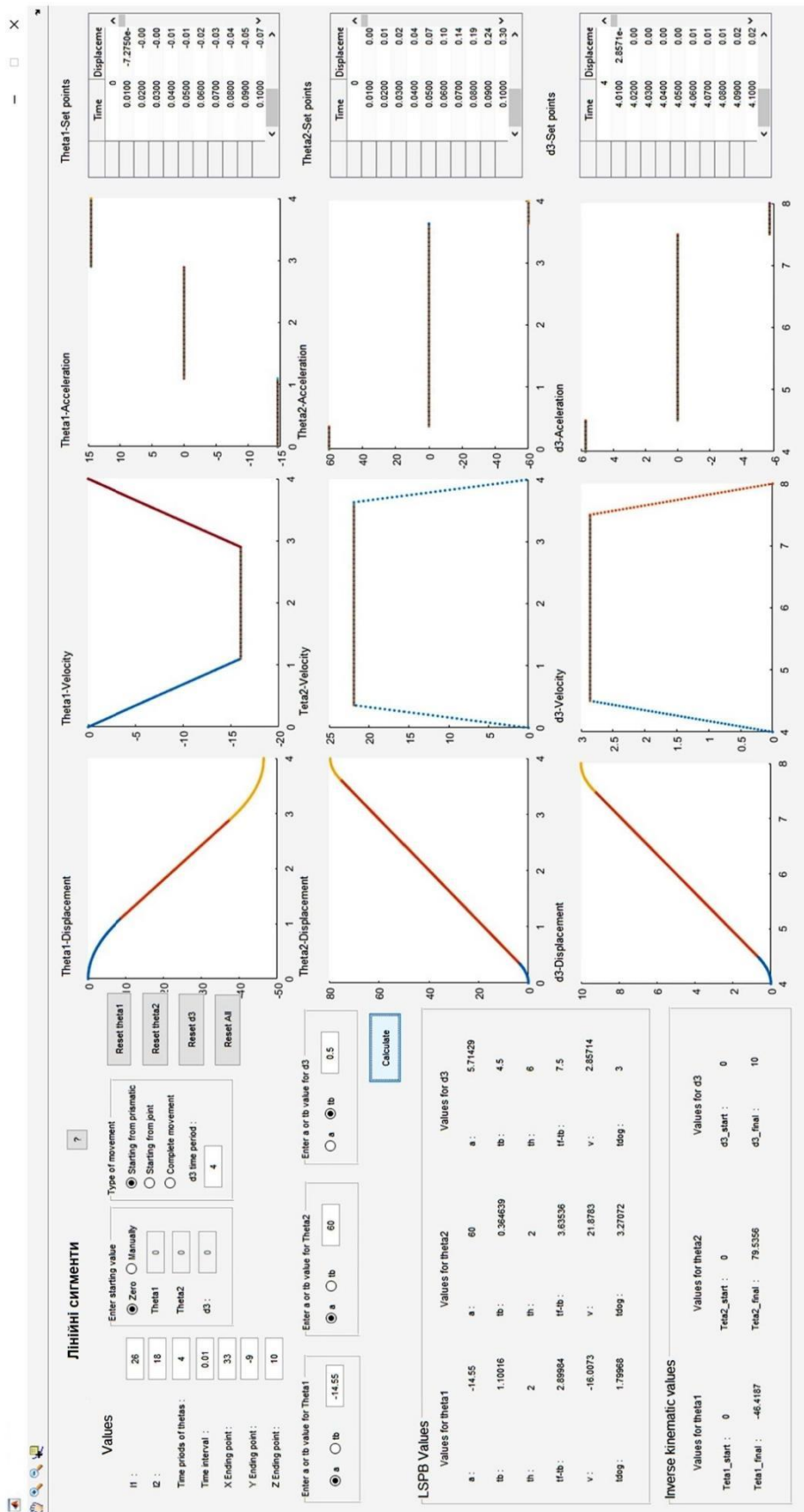


Рисунок 3.21 – Результати планування траєкторії

3.3 Висновки до третього розділу

На основі структурної схеми із другого розділу було побудовано принципову схему підключень для маніпулятора. Математичну модель із попереднього розділу, а саме аналітичну, було реалізовано у середовищі MATLAB відповідно до завдання. Після чого було побудовано блок-схему контролера за допомогою обчислення крутного моменту СТС. Далі було проведено симуляцію, загальну модель симуляції було зображено на рисунку 3.4. Після чого було отримано вихідні дані генератора траєкторії. Завдяки чому було обрано параметри контролерів. Після створеної моделі в MATLAB за допомогою провідника механіки було візуалізовано рух маніпулятора у 3D-просторі. 3-D модель маніпулятора зображено на рисунку 3.16, яку було створено завдяки Autodesk Fusion. В результаті чого, було реалізовано імітаційну модель промислового маніпулятора

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних частин було розроблено імітаційну модель промислового маніпулятора на базі Simulink і X3D.

У першому розділі проведено огляд існуючих способів побудови промислового маніпулятора і їх аналіз. Також у цьому розділі здійснено опис наявного апаратного забезпечення.

У другому розділі було побудовано математичну модель, в основі якої лежить виконання вимог системи та особливості обраних засобів. Також було обрано декілька моделей для різних частин системи.

У третьому розділі удосконалено імітаційну модель промислового маніпулятора. В основі запропонованого алгоритму лежить математична модель запропонована в 2 розділі. Розроблений алгоритм дозволяють повністю реалізувати математичну модель. Далі було наведено впровадження програмної частини системи промислового маніпулятора. Показано різні частини системи та відповідні регулятори які відповідають за них.

Впровадження результатів роботи дозволило створити ефективну імітаційну модель промислового маніпулятора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Soyaslan M., Fenercioglu A., and Kozkurt C. A new truck based order picking model for automated storage and retrieval system (AS/RS). *Journal of Engineering Research*, pp. 169–194, 2017.
2. Soyaslan M., Kozkurt C., and Fenercioglu A. Automated Storage and Retrieval Systems (ASRS): Research on warehouse configuration and performance studies. *Academic Platform Journal of Engineering and Science - APJES*, pp. 8–26, 2015.
3. Robot Hall of Fame, Inductees-SCARA, *Carnegie Mellon University* (2006). <http://www.robotalloffame.org/inductees/06inductees/scara.html> (06.02.2023).
4. Visioli A. and Legnani G. On the trajectory tracking control of industrial SCARA robot manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 224–232, 2002.
5. Das M.T. and Dulger L.C. Mathematical modelling, simulation and experimental verification of a SCARA robot. *Simulation Modelling Practice and Theory*, pp. 257-271, 2005.
6. Alshamasin M.S., Ionescu F., and Al-Kasasbeh R.T. Kinematic modelling and simulation of a scara robot by using solid dynamics and verification by Matlab/Simulink. *European Journal of Scientific Research*, pp. 388–405, 2009.
7. Urrea C. and Kern J. Modelling, simulation and control of a redundant SCARA-type manipulator robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, p. 58, 2012.
8. Kaleli A., Dumlu A. Corapsiz M.F., and Erenturk K. Detailed analysis of SCARA-type serial manipulator on a moving base with LabVIEW. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, p. 189, 2013.
9. Korayem M.H., Yousefzadeh M., and Manteghi S. Tracking control and vibration reduction of flexible cable-suspended parallel robots using a robust input shaper. *Scientia Iranica B*, pp. 230–252, 2018.

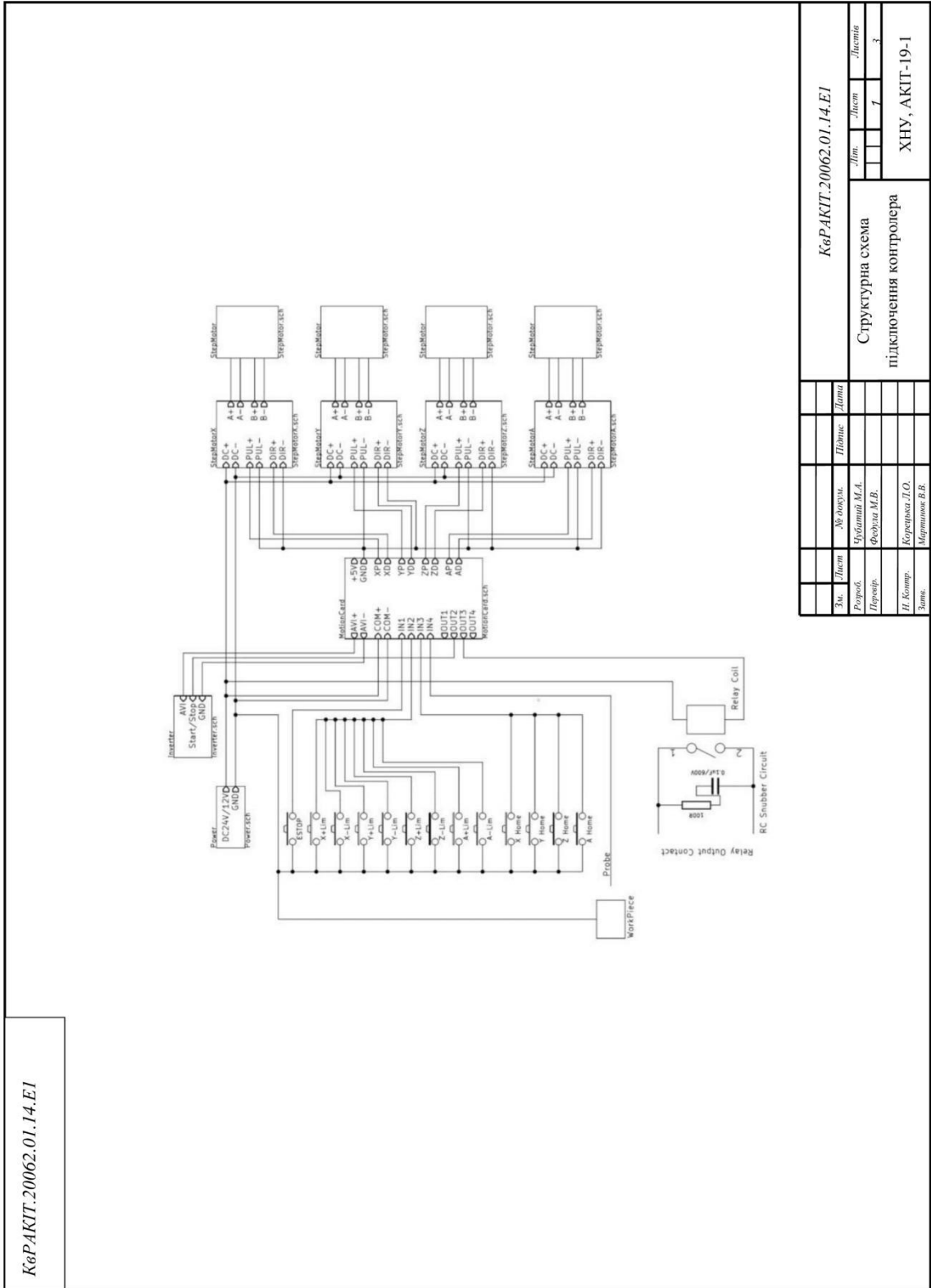
10. Kozkurt C. and Soyaslan M. Software development for kinematic analysis of scara robot arm with Euler wrist. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, pp. 27–32, 2011.
11. Kucuk S. and Bingul Z. An off-line robot simulation toolbox. *Computer Applications in Engineering Education*, pp. 41–52, 2009.
12. Adar N.G. and Kozan R. Comparison between real time PID and 2-DOF PID controller for 6-DOF robot arm. *Acta Phys. Pol. A*, pp. 269–271, 2016.
13. Adar N.G., Tiriyaki A.E., and Kozan R. Real time visual servoing of a 6-DOF robotic arm using Fuzzy-PID controller. *Acta Phys. Pol. A*, pp. 348–351, 2015.
14. Saygin A. and Rashid A.M. Position control of a turret using LabVIEW. *Acta Phys. Pol. A*, pp. 970–973, 2017.
15. Karayel D. and Yegin V. Design and prototype manufacturing of a torque measurement system. *Acta Phys. Pol. A*, pp. 272–275, 2016.
16. Fenercioglu A., Soyaslan M., and Kozkurt C. Automatic storage and retrieval system (AS\RS) based on Cartesian robot for liquid food industry. *12th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, pp. 283–287, 2011.
17. Korayem M.H., Maddah S.M., Taherifar M. Design and programming a 3D simulator and controlling graphical user interface of ICaSbot, a cable suspended robot. *Scientia Iranica B*, pp. 663–681, 2014.
18. Sayyaadi H. and Eftekharian A.A. Modeling and intelligent control of a robotic gas metal arc welding system. *Scientia Iranica*, pp. 75–93, 2008.
19. Gulzar M.M., Murtaza A.F., Ling Q. Kinematic modeling and simulation of an economical scara manipulator by Pro-E and verification using MATLAB/Simulink. *IEEE International Conference on Open Source Systems & Technologies (ICOSST)*, pp. 102–107, 2015.
20. Ibrahim B.S.K.K. and Zargoun A.M.A. Modelling and control of SCARA manipulator. *Procedia Computer Science*, pp. 106–113, 2014.
21. Urrea C., Cortes J., and Pascal J. Design, construction and control of a SCARA manipulator with 6 degrees of freedom. *Journal of Applied Research and Technology*, pp. 396–404, 2016.

22. Kevin M. Lynch and Frank C. Park Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control, p. 554, 2017.
23. Sciavicco, Lorenzo, Siciliano, Bruno Modelling and Control of Robot Manipulators, p. 378, 2010.
24. Etienne Dombre and Wisama Khalil. Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators, p. 398, 2007.
25. John J. Craig Introduction to Robotics Mechanics and Control, p. 408, 2014.
26. Richard M. Murray, Zexiang Li, S. Shankar Sastry A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, p. 519, 2017.
27. F. Neri and E. Mininno Memetic Compact Differential Evolution for Cartesian Robot Control. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, pp. 54–65, 2010.
28. M. Shariatee, A. Akbarzadeh, A. Mousavi, and S. Alimardani, Design of an economical SCARA robot for industrial applications, 2014.
29. G. Gao, G. Sun, J. Na, Y. Guo, and X. Wu Structural parameter identification for 6 DOF industrial robots. *Mechanical systems and signal processing*, pp. 145–155, 2018.
30. J.-D. Sun, G.-Z. Cao, W.-B. Li, Y.-X. Liang, and S.-D. Huang Analytical inverse kinematic solution using the D-H method for a 6-DOF robot, 2017.
31. F. Rubio, F. Valero, and C. Llopis-Albert A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, p. 172, 2019.
32. R. Featherstone and D. Orin Robot dynamics: equations and algorithms, IEEE, p. 826, 2010.
33. R. Kelly, V. Santibanez and A. Loria Control of Robot Manipulators in Joint Space, p. 429, 2015.
34. Peter Corke Robotics Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB, p. 693, 2017.
35. Denavit, J. and Hartenberg, R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *ASME J. Appl. Mechan.*, pp. 215–221 2015.

36. Bingul, Z. and Kucuk, S. Ileri kinematik, ters kinematic. *In Robot Teknigi I*, pp. 104–200, 2005.
37. TB6600 Stepper Motor Driver (2017). <https://www.dfrobot.com/product-1547.html> (06.03.2023).
38. Dynamixel-All in one actuator, Robotis Inc (2014). <http://www.robotis.us/dynamixel/> (13.03.2023).
39. Robot Modeling and Control. *Industrial Robot: An International Journal*, pp. 403–403, 2006.
40. Virtual Reality Modeling Language (VRML) - MATLAB & Simulink (2017). <https://www.mathworks.com/help/sl3d/vrml.html> (20.03.2023).

Додаток А

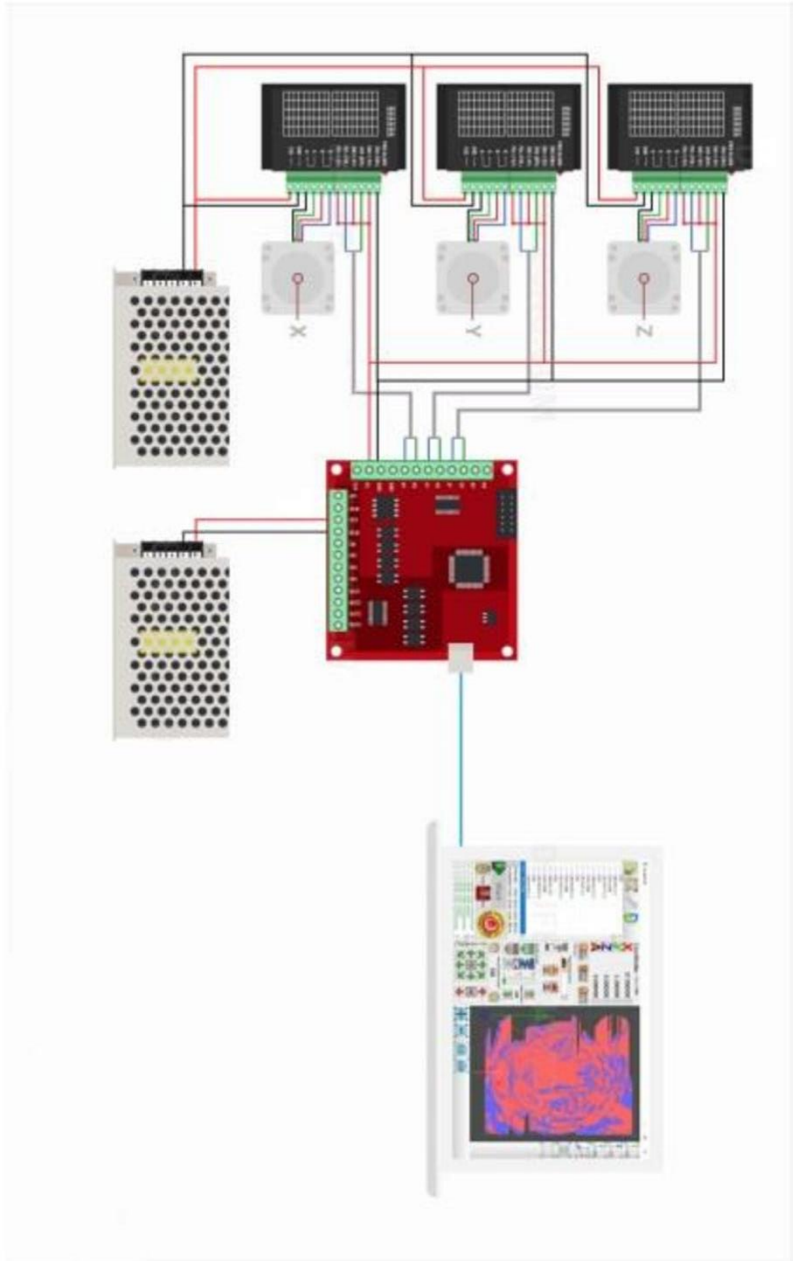
Структурна схема підключення контролера



Додаток Б

Принципова схема підключення контролера

КАРАКТ.20062.01.14.ЕЗ

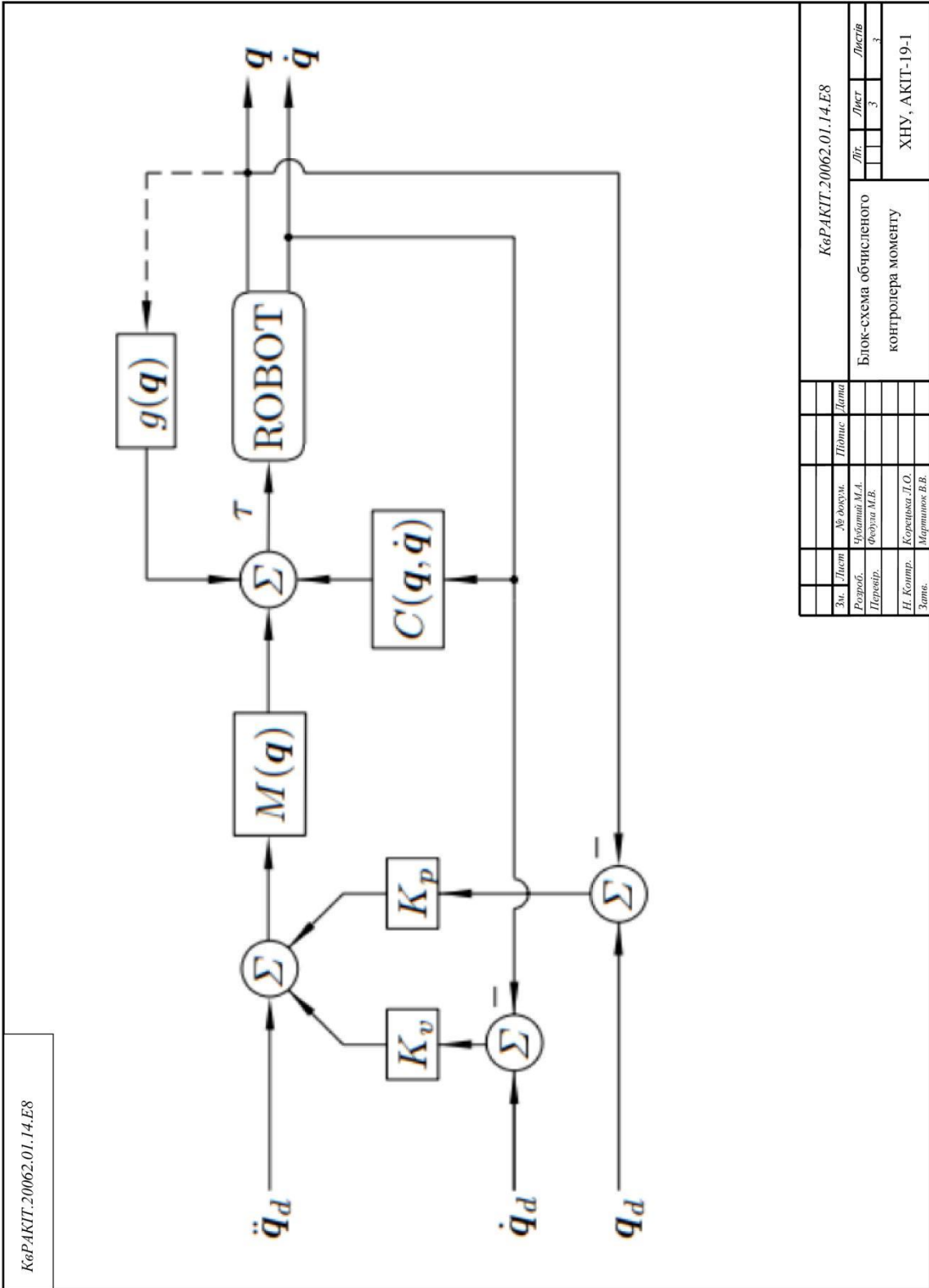


КАРАКТ.20062.01.14.ЕЗ								
Зм.	Лист	№ докум.	Питанє	Дати	Принципова схема підключення контролера	Дтп.	Лист	Листів
Розроб.	Чухотий М.А.					2	3	
Перевір.	Федюк М.В.							
Н. Кошир.	Ковалюк Т.О.							
Конт.	Морозов В.В.							

ХНУ, АКГГ-19-1

Додаток В

Блок-схема обчисленого контролера моменту



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1015691295

Дата перевірки:
26.06.2023 09:25:17 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
26.06.2023 10:02:53 EEST

ID користувача:
100005862

Назва документа: Чубатий

Кількість сторінок: 71 Кількість слів: 7849 Кількість символів: 55220 Розмір файлу: 7.15 MB ID файлу: 1015335131

115 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

4.68% Схожість

Найбільша схожість: 1.45% з Інтернет-джерелом (http://thesis.essa-tlemcen.dz/bitstream/handle/STDB_UNAM/286/Mem).

4.68% Джерела з Інтернету 85 Сторінка 73

2.03% Джерела з Бібліотеки 62 Сторінка 73

0% Цитат

Цитати 3 Сторінка 74

Посилання 1 Сторінка 74

0.01% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

Немає вилучених Інтернет-джерел

0.01% Вилученого тексту з Бібліотеки 16 Сторінка 74

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 3

Підозріле форматування 15 сторінок

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 11%

ID: 118070 Назва: БКР Імітаційна модель промислового маніпулятора на базі засобів Simulink та ХЗД Додано в БД: 2023-06-26 Автора: Максим ЧУБАТИЙ Керівники: Микола ФЕДУЛА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	45519	481	1184 (3%)	14 (3%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Чубатий Максим Андрійович

Тема: Імітаційна модель промислового маніпулятора на базі Simulink і X3D

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 74

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: розроблено імітаційну модель промислового маніпулятора на базі Simulink і X3D
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: у першому розділі кваліфікаційної роботи наведено основні технічні характеристики елементів маніпулятора, проаналізовано існуючі типи маніпуляторів та встановлено їх основні переваги та недоліки. У другому розділі розроблено принцип роботи та розглянуто функції маніпулятора; розроблено технологічну та функціональну схеми роботи сервоприводів; обрано тип маніпулятора; проведено обґрунтування та вибір компонентів для реалізації промислової точності. У третьому розділі розроблено алгоритм автоматизованого процесу управління промисловим маніпулятором, рух до об'єкта та рух в кінцеве положення. Проведено симуляцію в Simulink та побудовано 3-D модель в Autodesk Fusion 360. Розроблено програмне забезпечення контролера для управління сервоприводами за допомогою драйверів, проведено та представлено результати моделювання роботи промислового маніпулятора.
4. Позитивні сторони роботи: бюджетна реалізація поставленої задачі, отриманий досвід під час практичної реалізації.

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Чубатий М.А.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи АКІТ-19-1

ЗАЯВА

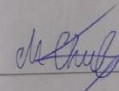
З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

06.06.23

дата



підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Імітаційна модель промислового маніпулятора на базі засобів Simulink та X3D

Автор: Чубатий Максим Андрійович

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Федула Микола Васильович, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

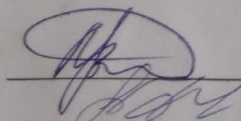
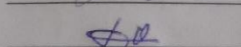
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 4,68% і адресується до 147 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 26.06.2023р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Валерій МАРТИНЮК

Юрій ФОРКУН

Микола ФЕДУЛА