

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем**

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

**Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка**

на тему: «Моделювання робототехнічних систем у середовищі MATLAB»

Виконав:
студентка 3 курсу, групи ПГ-п31
Гнатюк Марина Василівна

Керівник:
Професор, д.т.н., професор
Бурау Надія Іванівна

Рецензент:
Доцент, к.т.н., доцент
Ключко Тетяна Реджинальдівна

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.
Студентка _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма: «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Гнатюк Марині Василівні

1. Тема дипломної роботи «Моделювання робототехнічних систем у середовищі MATLAB»,
керівник Бурау Надія Іванівна, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дипломної роботи: 10 червня 2026 року
3. Вихідні дані до роботи: програмне середовище MATLAB (Robotics System Toolbox та Simscape Multibody), об'єкт моделювання: робототехнічна система для сортування маніпуляторного типу SCARA (прототип SR3iA), радіус робочої зони (в горизонтальній площині) 400мм, висота ходу (у вертикальній площині) 50 мм.

4. Перелік завдань, які потрібно розробити: Огляд літературних джерел за напрямком робототехнічних систем та методів їх моделювання. Аналіз функціональних можливостей інструментарію Simulink, Robotics System Toolbox та Simscape Multibody програмного середовища MATLAB. Розробка моделі робототехнічної системи маніпуляторного типу SCARA, реалізація прямої та оберненої кінематики, системи керування і моделювання роботи маніпулятора. Аналіз результатів моделювання. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація, яка містить методики, моделі, схеми, графіки.

6. Консультанти з розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «15» квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1.	Огляд літературних джерел за темою ДР	25.04.2026	
2.	Аналіз Robotics System Toolbox та Simscape Multibody програмного середовища MATLAB	05.05.2026	
3.	Розробка моделі маніпулятора	15.05.2026	
4.	Кінематичне та динамічне моделювання	30.05.2026	
5.	Оформлення рукопису ДР	08.06.2026	
6.	Оформлення презентації, підготовка до захисту	10.06.2026	

Студент

Марина ГНАТЮК

Керівник дипломної роботи

Надія БУРАУ

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена дослідженню можливостей програмного середовища MATLAB для моделювання робототехнічних систем із використанням інструментів Simulink, Simscape Multibody та Robotics System Toolbox. Основну увагу приділено розробці цифрової моделі робота-маніпулятора типу та дослідженню його роботи в умовах моделювання.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел, розглянуто історію розвитку робототехнічних систем, їх класифікацію, конструктивні особливості роботів-маніпуляторів та етапи їх проєктування. Також проведено огляд сучасних програмних засобів для моделювання робототехнічних систем і обґрунтовано вибір середовища MATLAB для реалізації поставленого завдання.

Другий розділ присвячено дослідженню функціональних можливостей MATLAB та його спеціалізованих пакетів. Розглянуто Simulink як середовище блокового моделювання, Simscape і Simscape Multibody як засоби створення фізичних моделей механічних систем, а також Robotics System Toolbox як інструмент для реалізації алгоритмів кінематики та керування роботами.

У третьому розділі розроблено механічну модель SCARA-маніпулятора з використанням Simscape Multibody, сформовано його кінематичну структуру та систему керування. Проведено моделювання роботи маніпулятора.

Отримані продемонстрували ефективність використання середовища MATLAB для проєктування, дослідження та аналізу роботів-маніпуляторів. Практичне значення роботи полягає у можливості використання створеної моделі для вдосконалення алгоритмів керування та розробки реальних робототехнічних систем.

Ключові слова: MATLAB, Simulink, SCARA, Simscape Multibody, Robotics System Toolbox, моделювання, робототехнічна система.

ABSTRACT

The bachelor's thesis is devoted to the study of MATLAB capabilities for robotic system modeling using Simulink, Simscape Multibody, and Robotics System Toolbox. The main focus is on the development of a digital model of a SCARA-type robotic manipulator and the investigation of its operation under simulation conditions.

The first chapter presents an analysis of scientific and technical literature, considers the history of robotic systems development, their classification, design features of robotic manipulators, and the main stages of their design. In addition, an overview of modern software tools for robotic system modeling is provided, and the choice of MATLAB as the main development environment is justified.

The second chapter is devoted to the analysis of MATLAB functionality and its specialized toolboxes. Simulink is considered as a block-diagram modeling environment, Simscape and Simscape Multibody as tools for creating physical models of mechanical systems, and Robotics System Toolbox as a software package for implementing robotic kinematics and control algorithms.

The third chapter describes the development of a mechanical model of a SCARA manipulator using Simscape Multibody. The kinematic structure of the manipulator is formed, and the mass and inertia properties of its links are specified. Simulation of the manipulator operation is carried out and the obtained results are analyzed.

The obtained results demonstrate the effectiveness of MATLAB for the design, investigation, and analysis of robotic manipulators. The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed model for further improvement of control algorithms and for the development of real robotic systems.

Keywords: MATLAB, Simulink, SCARA, Simscape Multibody, Robotics System Toolbox, modeling, robotic system.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
РОЗДІЛ 1.....	10
ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	10
1.1 Історія розвитку робототехнічних систем	10
1.2 Класифікація робототехнічних систем.....	13
1.3 Робот-маніпулятор: конструкція та принцип дії.....	15
1.4 Етапи проєктування роботів-маніпуляторів і значення їх моделювання.....	20
1.5 Огляд платформ і середовищ моделювання робототехнічних систем	22
Висновки до Розділу 1	24
РОЗДІЛ 2.....	26
ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ MATLAB ДЛЯ СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОБОТІВ.....	26
2.1 Моделювальне середовище Simulink.....	28
2.2 Simscape.....	32
2.3 Robotics System Toolbox	35
2.4 Simscape Multibody	39
Висновки до Розділу 2	44
РОЗДІЛ 3.....	46
РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ..	46
3.1 Розробка моделі маніпулятора та перенесення в MATLAB	47
3.2 Розробка та реалізація оберненої та прямої кінематики	52
3.3 Формування траєкторій руху та реалізація робочого циклу	57
3.4 Розробка системи керування маніпулятором	59
3.5 Моделювання роботи маніпулятора та аналіз результатів	63

Висновки до Розділу 3	69
ВИСНОВКИ	70
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3D – тривимірне представлення вигляду предмета

CAD – комп'ютерне автоматизоване проєктування

HRI – взаємодія людини і робота

MBD – проєктування на основі моделі

SC – генератор коду Simulink

ПР – промисловий робот

РТС – робототехнічна система

САПР – система автоматизованого проєктування

СК – система керування

ЧПУ – числове програмне управління

Вступ

Прогрес у галузі робототехніки та автоматизації постійно зростає, вимагаючи високої точності, ефективності та надійності на етапах проектування, моделювання та тестування роботів. Особливе значення має можливість створення цифрових прототипів перед фізичною реалізацією, що дозволяє суттєво скоротити час і кошти на розробку, а також забезпечити якісне дослідження поведінки системи в різних умовах.

Особливо важливим є моделювання роботів-маніпуляторів, які широко використовуються в промисловості, медицині, космічних дослідженнях та інших галузях, де необхідна висока точність переміщення та взаємодії з об'єктами. Для цього все частіше використовуються потужні спеціалізовані програмні засоби.

У цьому контексті особливе місце займає середовище MATLAB, разом із його інструментальними пакетами - Robotics System Toolbox та Simscape Multibody, які забезпечують комплексні засоби для створення, моделювання та аналізу систем.

Дипломна робота спрямована на розробку моделі робота-маніпулятора в середовищі MATLAB/Simulink з використанням бібліотек Robotics System Toolbox та Simscape Multibody. Метою роботи є дослідження можливостей цих інструментів для побудови та аналізу моделей маніпуляторів, а також порівняльний аналіз їх ефективності, переваг та обмежень у контексті проектування робототехнічних систем.

В роботі розглядаються основні етапи створення моделі маніпулятора, включаючи опис кінематичної структури, моделювання руху та реалізацію системи керування. Також проведено аналіз результатів симуляції.

Результати цього дослідження можуть бути корисними для освітніх закладів та промислових підприємств, які займаються проектуванням та розробкою роботів-маніпуляторів, а також для студентів і молодих спеціалістів, що вивчають методи моделювання робототехнічних систем.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Створення роботів-маніпуляторів супроводжується різноманітними технічними та інженерними завданнями, які потребують глибокого аналізу, точного проектування та комплексного підходу на етапі розробки. Однією з ключових задач є моделювання кінематики та динаміки маніпуляторів у різних режимах роботи, що дозволяє передбачити їхню поведінку, точність переміщення та взаємодію з об'єктами до фізичної реалізації.

Моделювання роботів-маніпуляторів із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення дає можливість створювати цифрові прототипи, тестувати алгоритми керування, аналізувати траєкторії руху та оцінювати вплив зовнішніх факторів. Це забезпечує виявлення певних проблем ще на етапі проектування та оптимізації параметрів системи без необхідності виготовлення фізичного пристрою. Особливо важливим є застосування таких інструментів для дослідження кінематичних моделей, систем керування та механічної взаємодії з навколишнім середовищем.

Використання спеціалізованих пакетів дозволяє значно спростити процес проектування, забезпечити високу точність обчислень і отримати наочну візуалізацію роботи маніпулятора. Такий підхід дозволяє ефективно вирішувати завдання, пов'язані з плануванням руху, керуванням, точністю позиціонування та аналізом динамічних характеристик, що забезпечує якість підвищення проектів, скорочує час на розробку та оптимізує витрати при створенні реальних робототехнічних систем.

1.1 Історія розвитку робототехнічних систем

Ідея створення механізмів, здатних імітувати або полегшувати дії людини, виникла ще в глибоку давнину. У V–III століттях до нашої ери

давньогрецький математик і інженер Герон Александрійський описував автоматизовані пристрої, що працювали на основі тиску пари, води чи протипаг. Його трактат «Пневматика» став прообразом сучасної автоматики і заклав теоретичне підґрунтя для майбутньої робототехніки [1].

У Середньовіччі та добі Відродження інтерес до автоматів зберігався. У XIII столітті арабський інженер Аль-Джазарі створював водяні годинники й автомати з елементами програмованої поведінки.

У XV столітті Леонардо да Вінчі спроектував одного з перших у світі механічних людей – так званого «механічного лицаря». Згідно з кресленнями, він мав броньований корпус і був здатен рухати руками, ногами, головою та навіть щелепою за допомогою складної системи тяг та шківів. Реконструкція пристрою в XX столітті підтвердила його функціональність (рис 1.1) [2].



Рис. 1.1 – Модель робота Леонардо, виставлена в Берліні [2]

Початок XX століття ознаменував перехід до технічної реалізації мрій минулого. У 1921 році чеський драматург Карел Чапек у п'єсі «R.U.R.» уперше ввів термін «робот», який згодом став основою для визначення штучного працівника [3].

У 1954 році Джордж Девол створив перший програмований маніпулятор Unimate, який уже в 1961 році впровадили на лінії складання General Motors. Цей

робот виконував важкі операції, як-от переміщення гарячих деталей, і значно підвищив безпеку праці (рис. 1.2) [4].

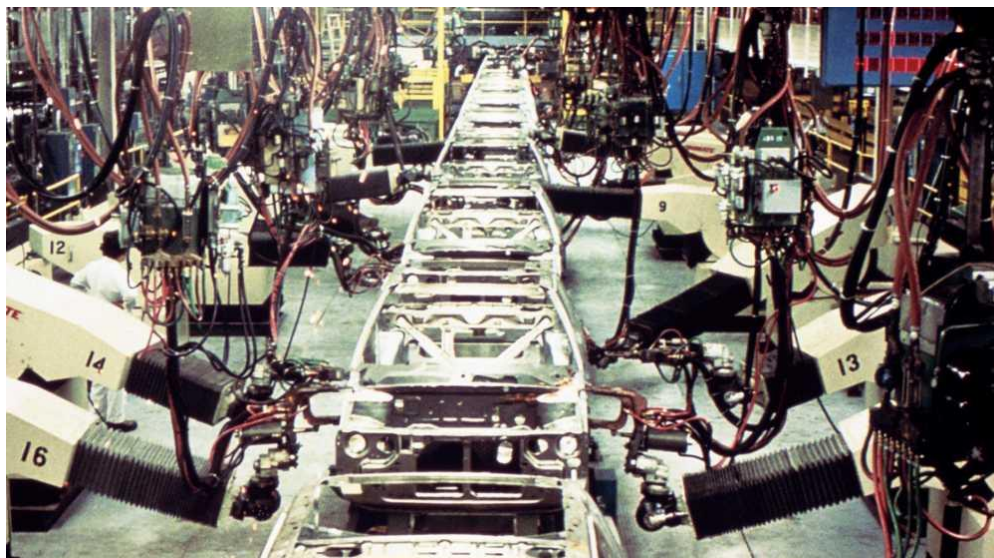


Рисунок 1.2 - Роботи Unimate на лінії точкового зварювання. Фабрика GM в Огайо, 1969 [4]

Наступні десятиліття, особливо 1970–1980-ті роки, стали періодом стрімкого розвитку галузі. У цей час роботи почали оснащуватись мікропроцесорами, датчиками зворотного зв'язку та гнучкими програмними алгоритмами. Розвиток електроніки та автоматизованих систем керування дозволив перейти від жорстко запрограмованих дій до адаптивного, варіативного управління. Значний внесок у розвиток робототехніки зробили компанії FANUC, Yaskawa, Kawasaki (Японія), KUKA (Німеччина), ABB (Швейцарія) тощо [5].

У XXI столітті робототехніка вийшла за межі промисловості, охопивши медицину, сільське господарство, сферу послуг, оборону та космос. Розвиток програмного забезпечення, зокрема MATLAB, ROS, Python, дозволив створювати віртуальні цифрові моделі роботів, моделювати поведінку систем у складних середовищах без фізичного прототипування [6].

Таким чином, сучасна робототехніка є міждисциплінарною галуззю, яка поєднує знання з механіки, електроніки, автоматичного керування, програмування, обробки сигналів та даних. Її історія – це безперервний шлях

еволюції і вдосконалення, результатом якого є інтелектуальні, гнучкі та доступні системи, що впевнено інтегруються в усі сфери людської діяльності.

1.2 Класифікація робототехнічних систем

Робототехнічні системи (РТС) становлять складну сукупність технічних, програмних та інформаційних засобів, призначених для виконання дій, які частково або повністю імітують людську діяльність [7]. Незважаючи на те, що в багатьох джерелах терміни «робот» і «робототехнічна система» (РСТ) вживаються як синоніми, у науково-технічній літературі під РТС мається на увазі не лише механізм (робот), а й керуюча система, сенсори, програмне забезпечення, модулі обробки даних та інтерфейси взаємодії з людиною (рис 1.3) [8].



Рисунок 1.3– Узагальнена структура сучасної робототехнічної системи [8]

Класифікація робототехнічних систем є багаторівневою й залежить від обраного критерію: конструктивного, функціонального, програмного чи галузевого [9]. Найбільш поширені типи класифікації базуються на принципах автономності, мобільності, сфери застосування та типу механічної структури [10].

Перший рівень класифікації стосується ступеня автономності систем.

Найпростішими є телекеровані системи, що виконують завдання під безпосереднім керуванням оператора. Напіваавтономні системи вже здатні до часткової самостійності, зокрема виконувати заздалегідь запрограмовані дії з використанням датчиків. У свою чергу, автономні РТС здійснюють повний цикл функціонування без участі людини завдяки інтеграції алгоритмів машинного зору, штучного інтелекту та систем зворотного зв'язку [11].

Наступна важлива ознака – мобільність. Розрізняють стаціонарні та мобільні системи. Стаціонарні зазвичай використовуються у промисловості, зокрема у вигляді маніпуляторів. Вони монтуються на одному місці, а їхня робоча зона обмежена конструктивною геометрією. Мобільні РТС, навпаки, здатні переміщатися у просторі: до таких належать колісні, гусеничні, крокуючі роботи, а також безпілотні літальні апарати [12].

Значну увагу приділяють і сфері застосування. Залежно від призначення розрізняють [13] :

1. Промислові роботи – наймасовіший клас робототехнічних систем, який широко застосовується у виробничих процесах. Вони призначені для автоматизації таких операцій, як дугове зварювання, фарбування, палетування, машинна обробка та збирання виробів на конвеєрних лініях, тощо [14].

2. Сервісні – обслуговують людину в побуті, наприклад, роботи-прибиральники XCLEA H30 Plus [15] .

3. Медичні – виконують хірургічні або діагностичні функції з високою точністю, наприклад, роботизована хірургічна система Da Vinci , яка забезпечує мініінвазивні операції з точністю до часток міліметра та 3D-візуалізацією хірургічного поля [16].

4. Космічні – спроектовані для функціонування в екстремальних умовах відкритого космосу, зокрема у вакуумі та за умов підвищеної радіації. Яскравим прикладом є антропоморфний робот Robonaut 2 (R2) [17].

5. Військові – призначені для виконання завдань у бойових або надзвичайних умовах (розвідка, розмінування, евакуація) з метою мінімізації ризиків для особового складу. Яскравим прикладом є вітчизняний безпілотний наземний комплекс «Saker Scout», що успішно застосовується для інженерної розвідки та патрулювання [18].

Окрема класифікація базується на механічній структурі. Тут виділяють: картезіанські, циліндричні, сферичні, SCARA, артикульовані та дельта-роботи [19]. Наприклад, артикульовані роботи є найбільш універсальні, з кількома ступенями свободи, які дозволяють виконувати широкий спектр рухів, що імітують людську руку. Саме такі системи часто моделюються в середовищі MATLAB із використанням Simulink, Simscape Multibody та Robotics System Toolbox [20], як це буде зроблено у межах даної дипломної роботи.

Робототехнічні системи (РСТ) – це комплекс технічних засобів, що включає апаратне і програмне забезпечення, які дозволяють здійснювати автоматизоване виконання різноманітних задач. Вони поєднують механічну конструкцію, виконавчі механізми (приводи), сенсори, контролери та програмне забезпечення.

1.3 Робот-маніпулятор: конструкція та принцип дії

Робот-маніпулятор є ключовим елементом у багатьох автоматизованих системах. Це один із найпоширеніших типів промислових роботів, який імітує функціональність людської руки. Його призначення полягає у виконанні точних і повторюваних операцій, таких як збирання, зварювання, сортування, пакування та інші. З розвитком цифрових технологій робот-маніпулятор став інтегральною частиною сучасного виробництва, медицини, логістики та навіть космічної галузі [21].

Зазвичай конструкція робота-маніпулятора складається з кількох основних частин (рис. 1.4). Першою є механічна структура, яка включає ланки

(жорсткі елементи) та з'єднання між ними (зазвичай шарніри). Ланки відповідають за передавання зусилля, а з'єднання – за створення рухомих ступенів свободи. Від кількості ланок і типу з'єднань залежить гнучкість і маневреність маніпулятора.

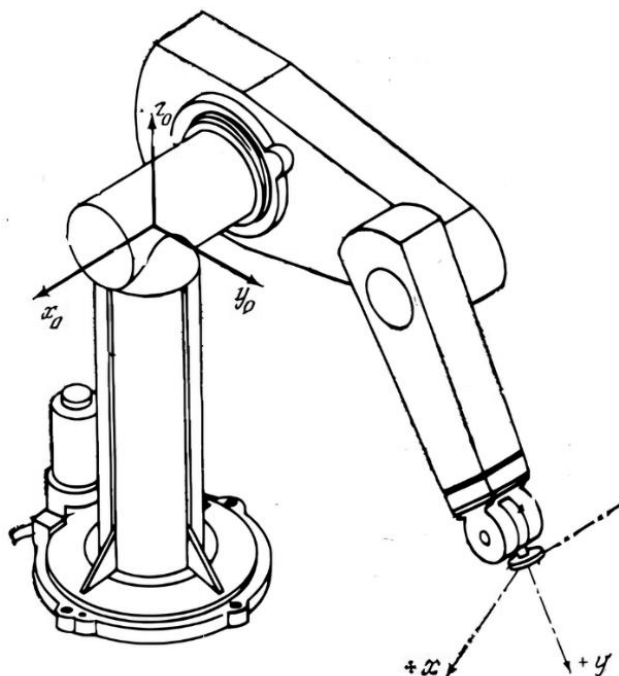


Рисунок 1.4 – Узагальнена схема робота-маніпулятора [22]

Наступним важливим компонентом є актуатори (приводи). Саме вони забезпечують рух у зчленуваннях. У більшості сучасних роботів використовуються електричні двигуни, але також застосовуються гідравлічні чи пневматичні приводи, залежно від умов експлуатації. Управління актуаторами здійснюється за допомогою контролера – центрального елемента системи керування. Він обробляє сигнали від сенсорів та формує команди для виконавчих механізмів.

Для забезпечення точності руху робот використовує сенсори. Це можуть бути датчики кута повороту, швидкості, прискорення, зусилля, а також камери чи лазерні сканери. Сенсори формують зворотний зв'язок, який дозволяє системі коригувати свої дії в реальному часі.

На кінці маніпулятора встановлюється ендефектор – робочий орган, що виконує безпосередню дію [23]. Це може бути захват, зварювальний пальник, вакуумна присоска або інший інструмент залежно від завдання. Наприклад, на виробництві часто використовують електромагнітні захвати для металевих деталей.

Принцип дії робота-маніпулятора базується на вирішенні задач прямої та зворотної кінематики. Система керування обчислює положення та орієнтацію кінцевого органу у просторі, після чого визначає, які рухи має виконати кожен привод, щоб досягти бажаної точки. Це вимагає точного математичного моделювання та використання складних алгоритмів [6].

У сучасній практиці існує багато прикладів застосування роботів-маніпуляторів, як у промисловості, так і в освітньому середовищі. Розглянемо кілька характерних прикладів:

- промисловий робот-маніпулятор з вакуумним захоплювачем [24] на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 - Промисловий робот-маніпулятор з вакуумним захоплювачем [24]

Цей тип роботів використовується на складах та виробничих лініях для переміщення коробок, деталей, тари. Завдяки вакуумному захвату робот може обережно взаємодіяти з крихкими предметами, забезпечуючи точність позиціонування.

- робот-маніпулятор FEEDBOT [25], зображений на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Робот-маніпулятор FEEDBOT [25]

Робот-маніпулятор FEEDBOT застосовується на металообробних підприємствах для автоматичного завантаження центрів обробки з ЧПУ. Це дозволяє прискорити виробництво та знизити ризики, пов'язані з людським фактором.

- навчальні роботи-маніпулятори на рис. 1.7 [26] та рис. 1.8 [27]

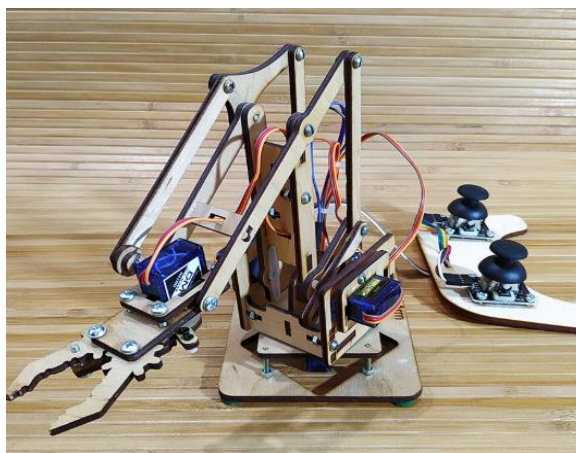


Рисунок 1.7 – Навчальний маніпулятор MeArm [26]

Маніпулятор MeArm – це доступний за ціною відкритий проект для вивчення основ електроніки та програмування. Часто використовується в технічних школах і гуртках робототехніки.



Рисунок 1.8 – Робот-маніпулятор, надрукований на 3D-принтері [27]

Такий підхід дозволяє виготовити навчальний зразок для тестування алгоритмів керування та механіки з мінімальними витратами. Його активно застосовують у STEM-освіті [27].

Важливо зазначити, що для проектування, аналізу та тестування таких роботів активно використовуються інструменти комп'ютерного моделювання. Наприклад, в середовищі MATLAB можна створити цифрову модель маніпулятора за допомогою бібліотек *Robotics System Toolbox* і *Simscape Multibody*, що дозволяє перевірити працездатність конструкції до її фізичного виготовлення.

Таким чином, робот-маніпулятор є складною, але надзвичайно ефективною робототехнічною системою, здатною виконувати широкий спектр завдань у різних галузях. Його універсальність і гнучкість роблять його незамінним інструментом для автоматизації сучасного виробництва.

1.4 Етапи проєктування роботів-маніпуляторів і значення їх моделювання

Процес розробки роботів-маніпуляторів охоплює послідовність інженерних етапів, що базуються на міждисциплінарних знаннях у сфері механіки, мехатроніки, електроніки, програмування та систем автоматичного керування. Особливу роль у цьому процесі відіграє комп'ютерне моделювання, яке дозволяє проаналізувати функціональні характеристики системи ще до виготовлення фізичного прототипу.

Основні етапи створення робототехнічної системи маніпуляторного типу включають [6]:

1. Аналіз вимог та формування технічного завдання. На цьому етапі визначаються кінцеві цілі проєкту, типи задач, які виконуватиме маніпулятор (зварювання, сортування, пакування тощо), а також експлуатаційні умови, конструктивні обмеження та критерії ефективності.

2. Концептуальне проєктування, на якому розробляється загальна архітектура маніпулятора: вибір типу конструкції (наприклад, артикульований, SCARA, дельта-робот), кількість ступенів свободи, типи приводів, робоча зона та система керування. Застосування CAD-засобів дає змогу створити 3D-модель, яка стане основою для подальшого аналізу.

3. Моделювання та віртуальна перевірка: за допомогою програмного забезпечення (Simulink, Simscape Multibody, Robotics System Toolbox) виконується кінематичне та динамічне моделювання. Це дозволяє оцінити роботу механізмів, перевірити рухливість, визначити зусилля в зчленуваннях та змодельовати поведінку системи у змінних умовах.

4. Розробка керуючих алгоритмів: в середовищі MATLAB/Simulink реалізуються ПД-регулятори, алгоритми зворотного зв'язку, планування траєкторій. Моделювання дозволяє виявити нестабільні режими та оптимізувати структуру керування.

5. Виготовлення прототипу та інтеграція – після віртуального тестування проєкт переходить у фізичну реалізацію: друк деталей, монтаж сенсорів, мікроконтролерів і приводів. На цьому етапі втілюється все, що було апробовано в моделі.

6. Тестування та удосконалення: прототип проходить реальні випробування. Результати порівнюються з результатами симуляцій. За потреби вносяться коригування в конструкцію або програмну логіку.

Моделювання відіграє ключову роль на всіх етапах розробки мобільних робототехнічних систем. Завдяки моделюванню можливо на ранньому етапі виявити та усунути конструктивні і функціональні недоліки, що позитивно впливає на точність, стійкість і керованість роботів у складному середовищі. Це дозволяє створювати більш надійні системи управління та покращувати маневрові властивості пристрою.

Серед основних переваг моделювання виділяють [6]:

1. Проведення численних віртуальних експериментів, що дає змогу уникнути витрат, пов'язаних із виготовленням фізичних прототипів, а також значно пришвидшити цикл розробки нових конструкцій.

2. Комплексний аналіз параметрів системи, таких як: кінематичні та динамічні характеристики, поведінка під час зміни умов роботи, а також ефективність алгоритмів планування та управління рухом.

3. Гнучкість у налаштуванні моделей, що дозволяє змінювати конфігурації системи, перевіряти різні сценарії експлуатації та миттєво оцінювати результати.

Таким чином, моделювання роботів – це потужний інструмент, що поєднує точність, гнучкість і безпеку. Воно значно підвищує ефективність процесу проєктування та сприяє створенню надійних, адаптивних і продуктивних робототехнічних систем.

1.5 Огляд платформ і середовищ моделювання робототехнічних систем

Стрімкий розвиток галузі робототехніки обумовлює зростання вимог до інженерних засобів проєктування, тестування та вдосконалення складних технічних систем. Одним із ключових етапів життєвого циклу роботизованих пристроїв, зокрема маніпуляторів, є їх моделювання у цифровому середовищі. Це дозволяє здійснювати перевірку працездатності конструкцій, аналіз поведінки механізмів, налаштування систем керування, а також виявлення можливих недоліків без необхідності фізичного виготовлення. Моделювання виконує роль віртуальної лабораторії, де можна відтворити кінематику й динаміку системи, оцінити ефективність алгоритмів керування та передбачити її реакцію на змінні зовнішні умови.

Сучасні програмні засоби для симуляції та моделювання робототехнічних систем дозволяють не лише створювати геометричні та фізичні моделі механізмів, а й інтегрувати їх з системами візуалізації, сенсорики та логіки управління. Особливу актуальність вони набувають у випадках проєктування роботів маніпуляторного типу, які характеризуються великою кількістю ступенів свободи, складними траєкторіями руху та високими вимогами до точності позиціонування. Виконаємо огляд найпоширеніших програмних середовищ, що застосовуються для віртуального моделювання роботів, з акцентом на їх функціональні можливості, переваги та недоліки, а також обґрунтуємо вибір найбільш доцільної платформи для реалізації в даній роботі.

Найпопулярнішими програмним середовищами є:

1. ROS (Robot Operating System): потужна модульна платформа для розробки програмного забезпечення для роботів, що включає багато інструментів, бібліотек і API для керування, симуляції (через Gazebo) та передачі даних між компонентами системи [28].

2. Gazebo: фізично точний симулятор, який використовується у зв'язці з ROS. Підтримує моделювання складних систем, реалістичну фізику, обробку сенсорних даних і точно розраховує фізичні зіткнення (колізії) [29].

3. CoppeliaSim (V-REP): універсальна платформа для створення і симуляції роботів, що підтримує інтеграцію з MATLAB, Python та іншими середовищами. Забезпечує потужні засоби для візуалізації, фізичного моделювання та розрахунків [30].

4. Webots: середовище з відкритим кодом, зручне для навчання та швидкого прототипування. Має підтримку роботів з різними конфігураціями, візуалізацію та просте підключення до Python і MATLAB [31].

5. Unity Robotics Hub: дозволяє створювати складні симуляції з високою якістю графіки. Часто використовується для HRI (взаємодії людина і робот), моделювання VR/AR-інтерфейсів, однак вимагає потужного апаратного забезпечення та знання мови програмування C# [32].

6. MATLAB/Simulink: комплексне середовище з розширеннями Robotics System Toolbox та Simscape Multibody, яке дозволяє здійснювати моделювання кінематики, динаміки, алгоритмів керування, візуалізацію та генерацію коду для вбудованих систем. Його підключення до апаратного забезпечення (через Arduino, Raspberry Pi, STM32 та інші) робить MATLAB універсальним інструментом як для досліджень, так і для промислових застосувань [33].

Переваги MATLAB у порівнянні з іншими платформами полягають у високому рівні точності розрахунків, наявності спеціалізованих блоків для моделювання маніпуляторів, підтримці обчислювального інтелекту (штучні нейронні мережі, оптимізація), а також зручності інтеграції з CAD-моделями та системами в реальному часі.

Таким чином, хоча сучасний ринок пропонує багато гідних інструментів для моделювання робототехнічних систем, MATLAB залишається оптимальним вибором для розробки роботів-маніпуляторів завдяки поєднанню інженерної

точності, багатой бібліотеки інструментів, а також простоти побудови і симуляції складних робототехнічних моделей.

Для наочного порівняння розглянутих платформ у табл. 1.1 узагальнено їхні основні характеристики, зокрема здатність до інтеграції з CAD-системами та інженерними розрахунками. Як видно з таблиці, MATLAB/Simulink забезпечує найповніший цикл проєктування від імпорту геометрії до генерації вбудованого коду, що зумовило вибір цього середовища для даної дипломної роботи

Таблиця 1.1 – Порівняння платформ моделювання робототехнічних систем

Платформа	Основне призначення	Генерація коду	Імпорт CAD-моделей	Точність фізики
ROS / Gazebo	Симулювання мобільних роботів та середовища	Ні	Обмежений (потребує конвертації в URDF)	Висока
CoppeliaSim	Універсальне прототипування	Ні	Так	Висока
Webots	Навчання та базове моделювання	Часткова	Часткова	Середня
Unity Robotics Hub	Візуалізація	Ні	Ні	Ігрова (низька точність)
MATLAB / Simulink	Комплексне інженерне моделювання	Повна автоматична (Embedded Coder)	Повна	Найвища (математично точна)

Висновки до Розділу 1

В першому розділі проаналізували сучасний стан галузі. Промислові маніпулятори залишаються наймасовішим класом обладнання на виробництві.

Вони автоматизують процеси зварювання, фарбування, палетування та сортування.

Систематизація робототехнічних комплексів за рівнем автономності та мобільністю показує їхню технічну різноманітність. Окремо розглянуто роботи типу маніпулятор. Така кінематична схема дає високу точність позиціонування при роботі в горизонтальній площині.

Вивчення архітектури маніпулятора визначило його головні вузли. Це механічні ланки, приводи, датчики зворотного зв'язку, контролер та кінцевий ефектор. Керування рухами базується на математичних моделях прямої та зворотної кінематики.

Проаналізувавши етапи створення пристрою, ми підтвердили важливість цифрового моделювання. Інженери виявляють помилки на початку проєктування. Віртуальні тести економлять кошти на фізичних прототипах. Цей метод забезпечує точний розрахунок кінематичних і динамічних параметрів.

Порівнюючи програмні засоби, ми обґрунтували застосування середовища MATLAB. Пакети Simulink, Simscape Multibody та Robotics System Toolbox закривають повний цикл розробки. Система імпортує креслення з CAD програм і генерує код для мікроконтролерів. Таким чином, зроблений огляд допоможе нам виконати наступну частину дипломної роботи для подальшого моделювання.

РОЗДІЛ 2

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ MATLAB ДЛЯ СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОБОТІВ

Програмне середовище MATLAB пропонує комплексний набір інструментів, розроблених для ефективного моделювання, аналізу та керування роботизованими системами. Завдяки таким модулям, як Robotics System Toolbox, Simulink та Simscape Multibody, MATLAB широко використовується в наукових дослідженнях, освіті та промисловості для розробки цифрових прототипів роботів різної складності [23].

Ці інструменти забезпечують виконання ключових етапів розробки робототехнічних систем, серед яких [9]:

1. Кінематичне та динамічне моделювання дозволяє створити складні багатоланкові механічні структури, врахувати рухомі з'єднання, інерційні параметри та сили, що впливають на елементи конструкції.
2. Розробка й тестування алгоритмів керування відкриває можливість створення адаптивних і класичних систем керування (PID, MPC, LQR тощо), які можуть бути перевірені у віртуальному середовищі Simulink до їх реалізації на реальному обладнанні.
3. Планування руху, траєкторій і навігація завдяки вбудованим функціям систем дозволяють моделювати поведінку роботів у складних умовах, створювати карти середовища, уникати перешкоди та оптимізувати маршрути руху.
4. Інтеграція з апаратним забезпеченням передбачає підтримку генерації коду для мікроконтролерів, а також забезпечує обмін даними із зовнішніми пристроями через послідовні інтерфейси або протокол ROS. Це дозволяє проводити апаратно-орієнтовану перевірку алгоритмів.

5. Візуалізація результатів та аналіз даних здійснюється за допомогою зручних засобів MATLAB для побудови графіків, анімацій та 3D-відображень процесів, що відбуваються в моделі робота.

Особливу роль відіграє модульна архітектура середовища MATLAB, яка чітко розмежовує базове ядро системи від спеціалізованих інструментальних пакетів (toolbox). Ядро MATLAB містить фундаментальні засоби для математичних обчислень, обробки даних, візуалізації та програмування, які є необхідною основою для будь-якої інженерної задачі. А інструментальні пакети є додатковими модулями, призначеними для вирішення конкретних проблем робототехніки та фізичного моделювання. Така структура дозволяє зручно налаштувати програмне середовище під конкретні потреби дослідження та забезпечує баланс між універсальними базовими алгоритмами та детальним спеціалізованим аналізом [9].

Серед ключових розширень для розробки робототехнічних систем варто виділити Robotics System Toolbox та Simscape Multibody. Перший пропонує комплексний набір функцій, призначених для просторових перетворень, а також моделювання маніпуляторів на основі параметрів Денавіта-Хартенберга, він також підтримує планування траєкторії та аналіз зворотної кінематики. А другий тулбокс Simscape Multibody дозволяє користувачу створювати тривимірні моделі механічних систем за допомогою візуальних блоків із точним визначенням фізичних властивостей компонентів. Застосування цих засобів дозволяє перевірити поведінку системи перед створенням фізичних прототипів, що значно знижує витрати на матеріали та пришвидшує цикли розробки. Саме висока стабільність обчислень, масштабованість архітектури та всебічна технічна підтримка обумовила вибір MATLAB як ідеальну платформу для даної дипломної роботи [34].

У цьому розділі здійснюється аналітичний огляд функціональних можливостей, які пропонує інструментарій MATLAB, що застосовується для

моделювання, візуалізації та комп'ютерного аналізу зі складними технічними об'єктами. Детально розглядаються ключові компоненти основних інструментаріїв та їх можливості. Метою даного розділу ж обґрунтування вибору найбільш доцільного пакету інструментів для побудови моделі робототехнічної системи відповідно до вимог технічного завдання.

2.1 Моделювальне середовище Simulink

Simulink є інтегрованим середовищем для графічного моделювання, чисельної симуляції та аналізу динамічних систем, що тісно пов'язане з платформою MATLAB. На відміну від звичайних бібліотек або інструментальних пакетів, Simulink виступає як повноцінна візуальна платформа, яка реалізує підхід визначення на основі моделей (Model-Based Design, MBD). Ця методологія дозволяє створювати структурно зрозумілі цифрові прототипи шляхом компонування функціональних блоків на основі блок-схем, забезпечуючи безперервний потік даних від концептуальної ідеї до фізичної реалізації [35].

Однією з ключових особливостей Simulink є підтримка моделювання динамічних систем у визначеному часі. Користувачі можуть моделювати як лінійні, так і нелінійні, безперервні та дискретні системи, задавати параметри інтеграції, запускати симуляцію в реальному часі або з варіативним кроком інтегрування. Створення моделей відбувається у графічному редакторі за допомогою додавання і з'єднання елементів з бібліотек. Основними компонентами є сигнальні блоки, логічні схеми, джерела та приймачі сигналів, модулі для керування, динаміки та зворотного зв'язку.

Simulink забезпечує підтримку ієрархічного моделювання, що дозволяє створювати складні системи за допомогою підсистем і вкладених моделей. Такий підхід дозволяє побудувати модель з високим рівнем структурування, що значно полегшує її подальший аналіз та технічну підтримку [10].

Середовище надає можливість комплексного циклу MBD, який охоплює два основні етапи. Першим етапом є симуляція та аналіз динаміки систем для верифікації алгоритмів. А другим етапом є автоматизація розробки: генерація оптимізованого програмного коду (C/C++) за допомогою Simulink Coder та Embedded Coder, його валідація, налаштування та завантаження на цільові мікропроцесори або апаратні платформи (Simulink Real-Time) [10]. Такий підхід значно скорочує цикл розробки та мінімізує ризики помилок при переході від віртуальної моделі до фізичного пристрою.

На рис. 2.1 представлено стандартний інтерфейс бібліотеки блоків Simulink Block Library, який забезпечує інтуїтивно зрозумілий доступ до функціональних елементів для побудови моделей динамічних систем. Бібліотека містить систематизовані категорії блоків, організовані за принципом їхнього функціонального призначення [35]:

- Базові елементи моделювання: Sources (джерела сигналів), Sinks (приймачі сигналів), Continuous (блоки безперервних систем) та Discrete (блоки дискретних систем);
- Математичні та логічні операції: Math Operations, Logic and Bit Operations, Lookup Tables, Matrix Operations;
- Спеціалізовані функції: User-Defined Functions, Signal Routing, Signal Attributes, String, Messages & Events;
- Інструменти верифікації та налагодження: Model Verification, Dashboard, Model-Wide Utilities;
- Розширені можливості: Blocksets & Toolboxes, Ports & Subsystems, Commonly Used Blocks, Additional Math & Discrete.

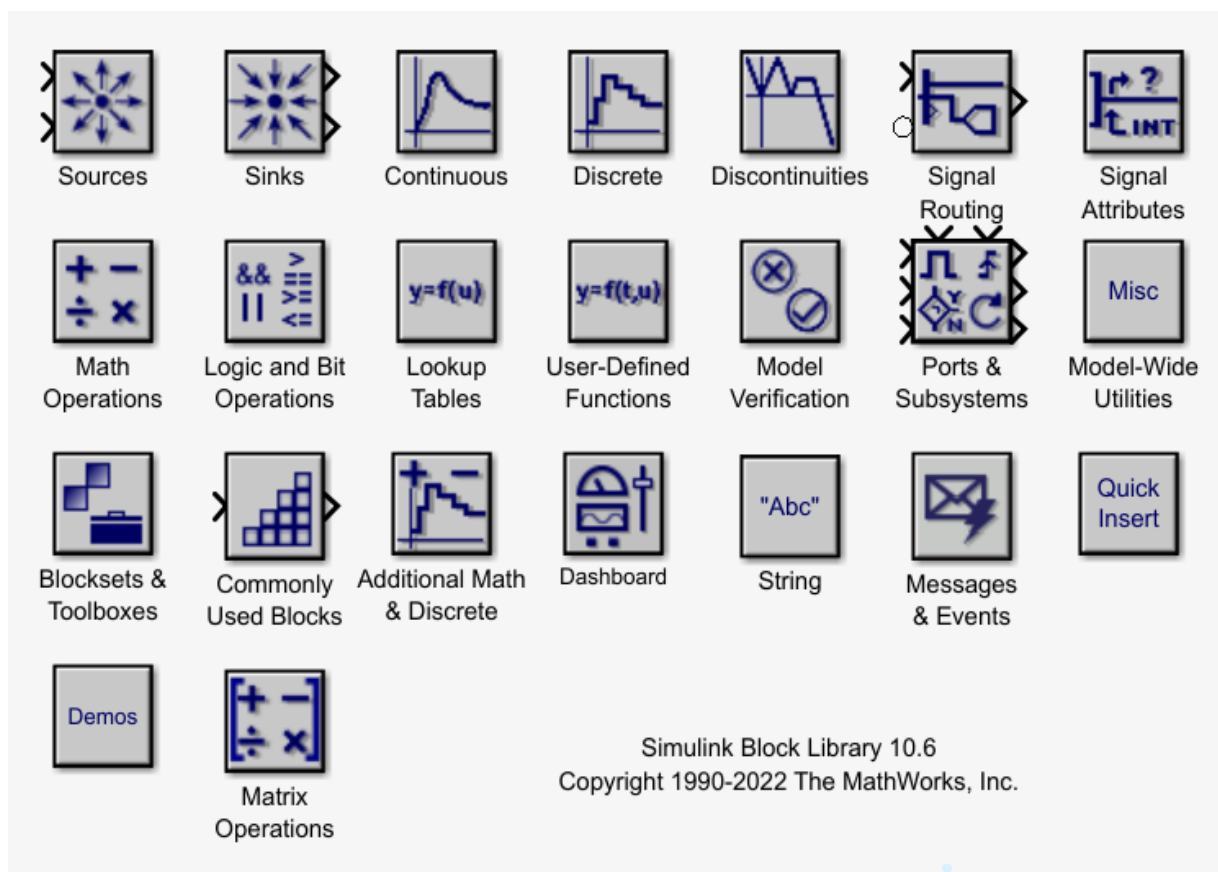


Рисунок 2.1 – Категорії блоків у бібліотеці Simulink

Simulink функціонує як візуальне середовище, яке базується на принципі блок-схем. Розробник має змогу будувати модель шляхом компонування стандартних елементів із бібліотеки та з'єднання їх логічними зв'язками, що репрезентують фізичні або інформаційні взаємодії у системі. Завдяки цьому можливо реалізувати складні проєкти з великою кількістю підсистем, зберігаючи при цьому структурованість і читабельність моделі.

Користувач може проводити гнучке налаштування параметрів системи. А саме змінювати структуру моделі без необхідності переписування коду та здійснювати автоматичне оптимізування налаштувань і візуалізувати процеси у вигляді графіків, діаграм та 3D-анімацій.

На рис. 2.2, який надає офіційний сайт MathWorks для свого продукту, представлено два основних етапи життєвого циклу розробки систем: моделювання та автоматизацію.

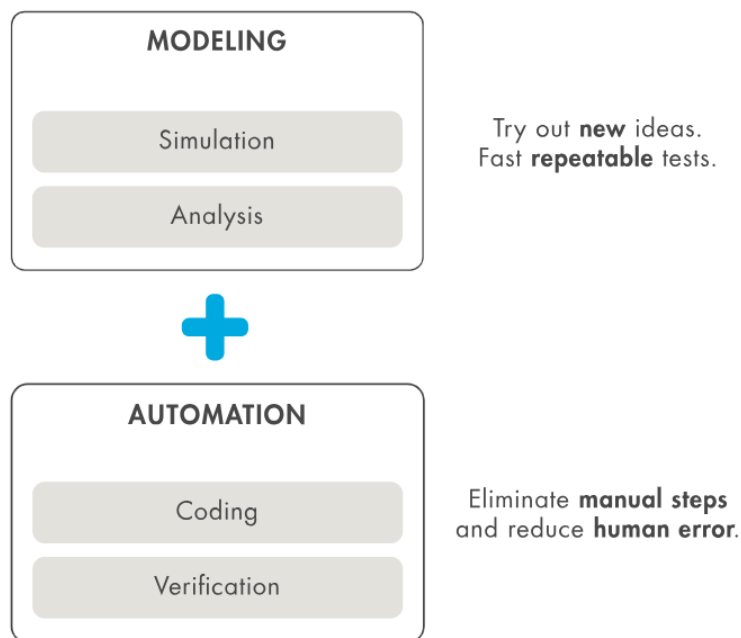


Рисунок 2.2 – Ілюстративна схема використання Simulink: поділ на моделювання та автоматизацію [10]

Перша складова охоплює процеси симуляції та аналізу моделі. Дозволяє швидко тестувати ідеї в умовах цифрового середовища. Друга складова автоматизація включає в себе генерацію коду та верифікацію, що сприяє зменшенню людського фактору і підвищенню надійності реалізації [10].

У стандартній поставці Simulink доступний широкий набір вбудованих функціональних блоків, які охоплюють різні аспекти моделювання: обробку сигналів, реалізацію математичних операцій, логіку керування, динамічні елементи та засоби інтеграції з фізичними пристроями.

Найбільшою перевагою середовища є підтримка модульності: користувач може створити власні підсистеми або окремі блоки, які легко масштабувати і застосувати у різних частинах проєкту. Це забезпечує високу ефективність повторного використання елементів і пришвидшує цикл розробки. Крім того, Simulink органічно інтегрується з іншими інструментами MATLAB. За допомогою m-скриптів можна автоматизувати процеси та збільшити продуктивність роботи з даними.

У підсумку, Simulink є потужною платформою для моделювання, яка дозволяє проводити всебічний аналіз, оптимізацію та візуалізацію роботи складних технічних систем. Його інтуїтивний інтерфейс, гнучкість і широка підтримка інженерних задач роблять його одним із найважливіших інструментів у сучасній науково-технічній практиці.

2.2 Simscape

Simscape є одним із спеціалізованих інструментів середовища MATLAB, призначеним для побудови моделей фізичних систем різної складності. На відміну від класичного підходу, що базується на чисельному описі систем за допомогою диференціальних рівнянь, Simscape дозволяє будувати модель шляхом компонування елементів, що імітують реальні фізичні компоненти: маси, пружини, електричні елементи, джерела енергії, гідравлічні пристрої тощо. Такий підхід робить процес розробки більш наочним, особливо під час створення складних моделей [33].

Цей пакет працює на основі фундаментальних фізичних законів (другий закон Ньютона, закон Ома, закони термодинаміки), що дозволяє створювати точні цифрові двійники реальних систем. Розробник формує структуру моделі шляхом поєднання компонентів із вбудованих бібліотек, які охоплюють електричні схеми, гідравліку, пневматику, теплові мережі та багатотільну механіку (Multibody).

Ілюстративний вигляд бібліотек інструментарію Simscape наведено на рис. 2.3, де показано ключові сфери застосування та структуру доступних бібліотек у середовищі Simulink.

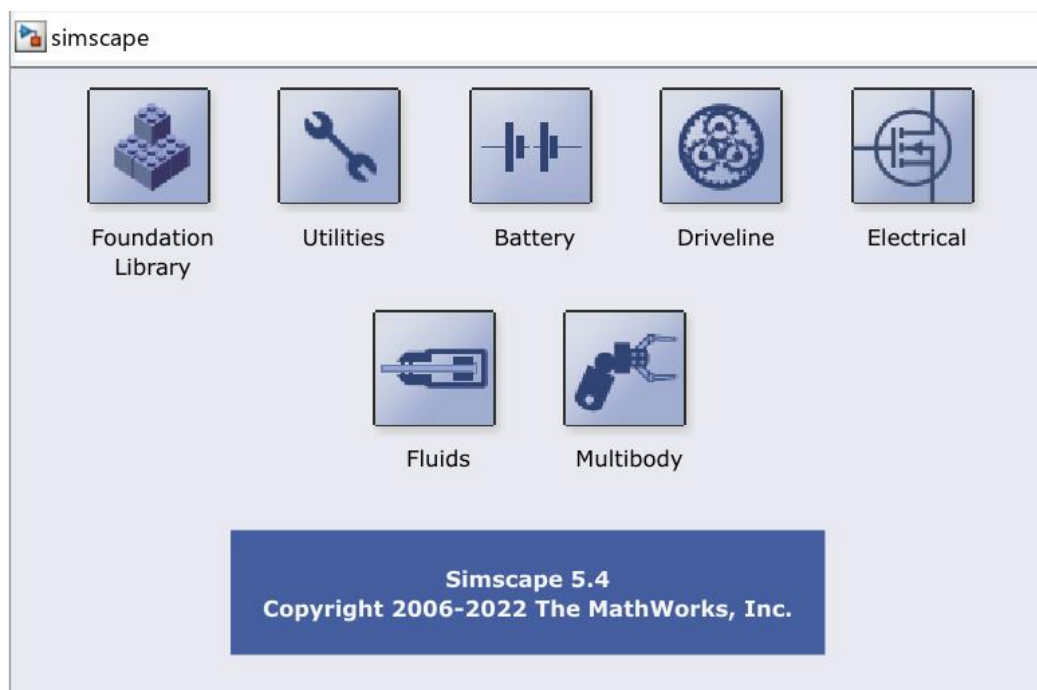


Рисунок 2.3 – Основні компоненти пакету Simscape

Також Simscape дозволяє створювати модульні моделі, які можна повторно використовувати в різних проєктах, що значно спрощує підтримку складних систем, оскільки інженерам не доводиться щоразу створювати всі елементи з нуля. Цей інструментарій містить інструменти для аналізу та оптимізації моделей, включаючи симуляцію поведінки в різних сценаріях та автоматичне налаштування параметрів. Він повністю інтегрований з MATLAB і іншими його інструментами, що розширює можливості моделювання. Зокрема, підтримується взаємодія з Simulink для побудови і симуляції складних гібридних моделей [20].

Для побудови моделі роботизованої системи найчастіше застосовуються наступні блоки з бібліотек Simscape та Simscape Multibody:

1. Simscape Foundation Electrical Elements – базовий електричний ланцюг, який включає резистор (R), конденсатор (C) та джерело струму. Використовується для моделювання електроприводу або елементів керування (рис. 2.4, а).

2. Rotational Electromechanical Converter – перетворює електричну енергію в обертальний механічний рух (рис. 2.4, b). Це один із ключових блоків для моделювання двигунів у маніпуляторах.
3. Ideal Angular Velocity Sensor – сенсор для вимірювання кутової швидкості. Дозволяє виводити швидкість обертання зчленувань для аналізу або регулювання (рис. 2.4, c).
4. Constraint Block (функціональне обмеження) – задає обмеження у вигляді рівнянь для координат або параметрів між частинами системи. Часто використовується для синхронізації рухів (рис. 2.4, d).
5. Solver Configuration – обов’язковий блок для фізичних мереж у Simscape, що задає параметри чисельного інтегратора (рис. 2.4, e).
6. Cartesian Joint – з’єднання з можливістю поступального руху в кількох напрямках. Використовується для опису руху кінцевого ефектора в просторі (рис. 2.4, f).
7. Rigid Transform – визначає просторове розміщення елементів, забезпечуючи зміщення та обертання між з’єднаними компонентами (рис. 2.4, g).
8. Revolute Joint – дозволяє обертальний рух навколо однієї осі. Є основою для побудови ланок маніпулятора (рис. 2.4, h).
9. Prismatic Joint – реалізує поступальний рух уздовж певної осі. Може використовуватись для симуляції лінійних приводів або подовжувачів (рис. 2.4, i).
10. Gripper Mechanism (умовна схема клешні) – блок, який візуалізує функціональність виконавчого органу робота, наприклад, захоплення об’єктів (рис. 2.4, j).

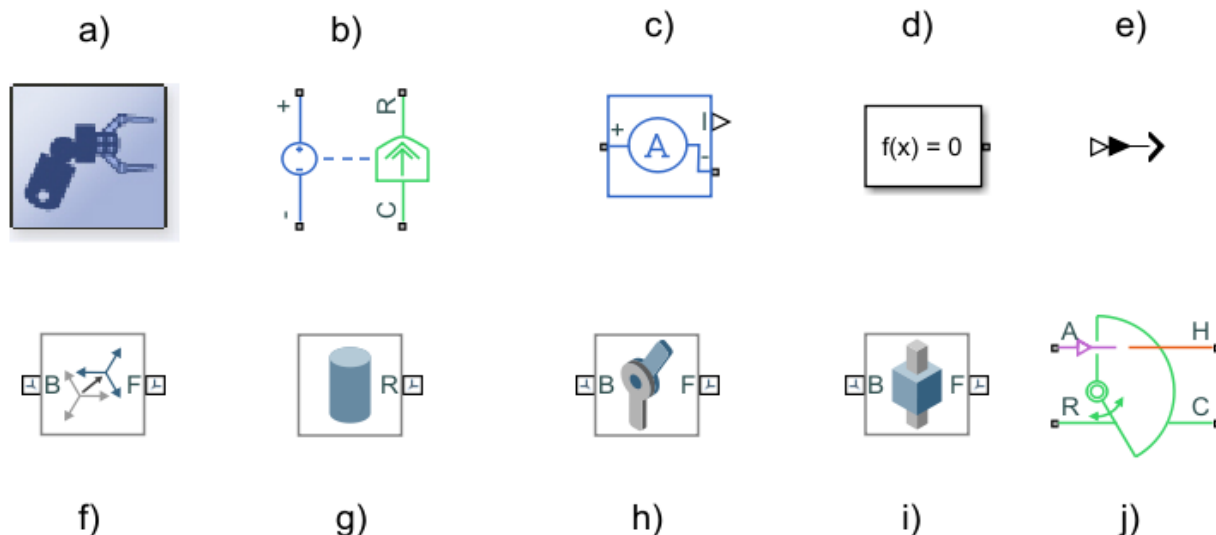


Рисунок 2.4 – Найбільш вживані блоки бібліотек Simscape та Simscape Multibody

Simscape широко використовується в промисловості, наприклад, в автомобілебудуванні, авіації, електроніці, енергетиці. Завдяки підтримці механічних, електричних, гідравлічних та теплових компонентів користувачі можуть будувати й тестувати повноцінні цифрові двійники фізичних систем перед їхнім фізичним втіленням [35].

В освітньому середовищі цей інструментарій застосовується для вивчення фізичних процесів через інтерактивне моделювання. Це дозволяє студентам бачити вплив змін параметрів у реальному часі, краще розуміти закони фізики, аналізувати системи та розв'язувати прикладні завдання.

Таким чином, Simscape є універсальним інженерним інструментом для точного моделювання, що дозволяє зменшити витрати на створення прототипів, пришвидшити розробку та підвищити якість інженерних рішень.

2.3 Robotics System Toolbox

Основною перевагою Robotics System Toolbox є системний підхід до моделювання, який базується на концепції дерева жорстких тіл (rigidBodyTree).

Цей інструментарій формалізує кінематичну структуру маніпулятора у вигляді ієрархічного графа, де вершини представляють жорсткі ланки, а ребра визначають типи кінематичних пар між ними [34]. Такий підхід дозволяє виконувати точні розрахунки прямої кінематики через функцію `forwardKinematics`, яка обчислює положення кінцевого ефектора (End-effector) за заданими кутами суглобів, та зворотної кінематики через об'єкт `inverseKinematics`, що знаходить необхідну конфігурацію суглобів для досягнення бажаної точки у просторі [9].

У випадку мобільних роботів інструментарій надає вбудовані алгоритми локалізації (наприклад, за допомогою Extended Kalman Filter), побудови карти середовища (SLAM), планування шляху (A^* , RRT) та слідування маршрутом із врахуванням динамічних перешкод. Такий підхід особливо ефективний для симуляції автономних транспортних засобів, роботів-розвідників або складських візків.

Ілюстративний вигляд бібліотек інструментарію Robotics System Toolbox наведено на рис. 2.5, де показано ключові сфери застосування, наведемо опис кожного з них [34]:

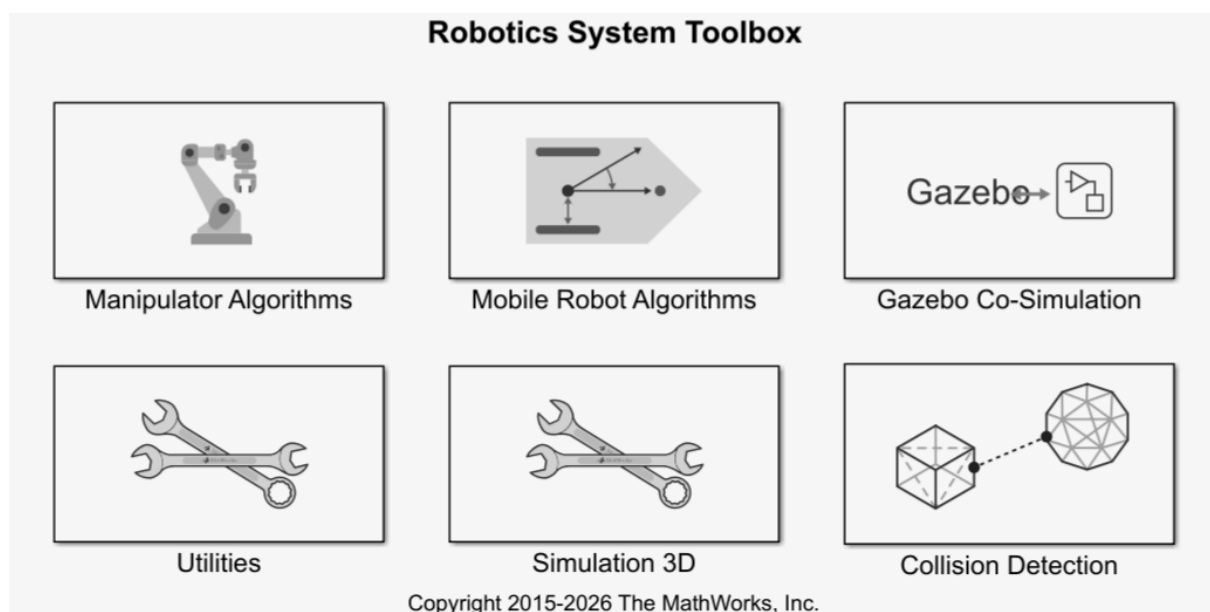


Рисунок 2.5 – Основні модулі Robotics System Toolbox [34]

1. Manipulator Algorithms надає інструменти для моделювання маніпуляторів на основі дерева жорстких тіл. Основне призначення полягає у розрахунку прямої та зворотної кінематики, аналізі динаміки та плануванні траєкторій. Модуль містить алгоритми розрахунку матриці мас та векторів сил інерції. Використовує параметри Денавіта-Хартенберга, імпорт моделей з форматів URDF та SDF, доступ до бібліотеки готових промислових роботів KUKA, UR, ABB [9, 34].
2. Mobile Robot Algorithms забезпечує реалізацію алгоритмів навігації для мобільних робототехнічних платформ. Модуль охоплює задачі локалізації робота в просторі, побудови карти навколишнього середовища та планування маршруту руху. Для визначення положення робота можуть використовуватися алгоритми фільтрації та обробки даних від датчиків, зокрема Extended Kalman Filter. Також підтримуються методи одночасної локалізації та картографування (SLAM), які дозволяють роботу формувати карту невідомого середовища та одночасно визначати власні координати. Для побудови траєкторії передбачені алгоритми пошуку шляху, зокрема A^* та Rapidly-exploring Random Tree (RRT), що дають можливість знаходити безпечний маршрут з урахуванням наявних перешкод [36].
3. Gazebo Co-Simulation забезпечує синхронізацію з фізичним симулятором Gazebo. Дає можливість створювати реалістичні умови тестування алгоритмів керування. Модуль дозволяє керувати приводами робота у тривимірному просторі з точною фізикою зіткнень [20, 34].
4. Utilities цей модуль містить функції роботи з однорідними перетвореннями та системами координат. Дає змогу спрощувати математичні обчислення, забезпечує сумісність між різними форматами даних, підтримує векторні та матричні операцій [9].

Simulation 3D забезпечує тривимірну візуалізацію робототехнічних систем та процесів їхнього функціонування. Модуль дозволяє відображати кінематичні ланцюги роботів, аналізувати їхній рух у віртуальному середовищі та контролювати взаємодію з навколишніми об'єктами. Для створення моделей підтримується імпорт описів роботів у форматах URDF і SDF, що спрощує інтеграцію розроблених конструкцій у середовище моделювання. Simulation 3D дає можливість оцінювати траєкторії руху та перевіряти коректність роботи алгоритмів [20].

5. Collision Detection призначає кожній ланці маніпулятора геометричні об'єми для виявлення зіткнень. Використовує сфери, циліндричні форми або опуклі багатокутники для представлення фізичних розмірів елементів. Під час симуляції руху система аналізує взаємне перекриття цих об'ємів. Цей підхід прискорює обчислення за рахунок спрощеної геометричної конструкції [34].

Завдяки сумісності даного тулбоксу із середовищем MATLAB та інструментом Simulink забезпечується пряма взаємодія між розрахунковими сценаріями, блоками керування та фізичним рівнем системи (або її цифровим двійником). Підтримка автоматичного синтезу вихідного коду дозволяє уникнути ручного перенесення алгоритмів. Такий підхід є базовим для розробки сучасних embedded-систем і автономних роботів, де ключовою вимогою є жорстке визначення часу виконання операцій.

На відміну від Simscape Multibody, Robotics System Toolbox орієнтований насамперед на розрахунок кінематичних параметрів, планування руху та розробку алгоритмів керування роботами, а не на детальне фізичне моделювання механічної структури.

2.4 Simscape Multibody

Simscape Multibody є спеціалізованим інструментом середовища MATLAB/Simulink, призначеним для моделювання багатотільних механічних систем. Його використання є особливо доцільним під час розробки моделей робототехнічних систем, оскільки дає змогу відтворювати рух ланок, шарнірів, механічних з'єднань і виконавчих органів у тривимірному просторі [40].

Основною перевагою Simscape Multibody є можливість створення моделі механічної системи у тривимірному просторі. У процесі моделювання кожна ланка робота може бути представлена як тверде тіло з відповідними геометричними та масово-інерційними параметрами. З'єднання між ланками описуються за допомогою шарнірів, які визначають допустимі типи руху. Наприклад, для маніпуляторів можуть використовуватися обертальні шарніри, які забезпечують поворот ланки відносно певної осі, та поступальні шарніри, що задають лінійне переміщення.

Важливою можливістю Simscape Multibody є підтримка імпорту моделей із CAD-систем. Механічну конструкцію можна розробити у SolidWorks, після чого експортувати її за допомогою плагіна Simscape Multibody Link. Під час експорту формується XML-файл з описом структури збірки та набір геометричних файлів, які використовуються для візуалізації окремих деталей. Надалі ці файли імпортуються в MATLAB/Simulink за допомогою команди `smimport`, у результаті чого автоматично створюється модель Simscape Multibody [40].

Такий підхід значно спрощує процес створення робототехнічної моделі. Замість ручного задання геометрії кожної ланки можна використати вже розроблену CAD-модель. Це дозволяє зберегти форму деталей, їхнє взаємне розташування, орієнтацію систем координат та частину масо-інерційних характеристик. Для дипломного проєктування це є важливою перевагою, оскільки дає змогу пов'язати етап тривимірного конструювання з подальшим

моделюванням руху в MATLAB/Simulink. Загальний вигляд середовища розробки у MatLab Simulink показано на рис.2.6.

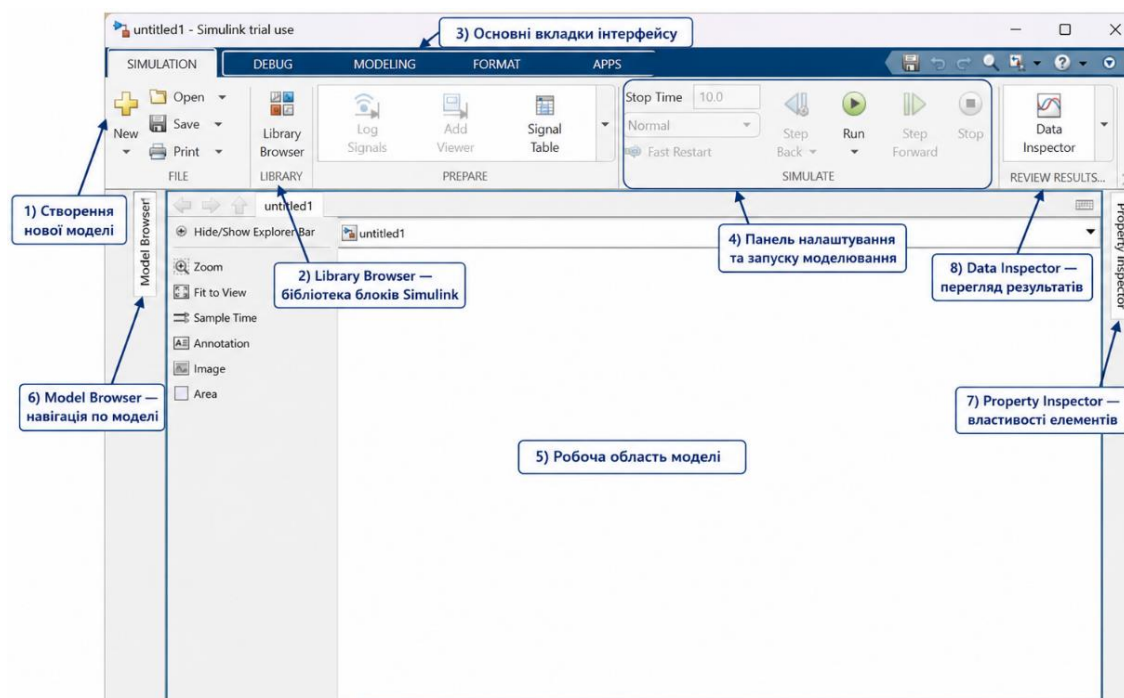


Рисунок 2.6 – Середовище Simulink

Додавання Simscape Multibody розширює можливості, дозволяючи моделювати складні механічні системи з великою точністю та деталізацією.

Нові блоки у меню "Library Browser" дозволяють швидко створювати та налаштовувати компоненти механічних систем, включаючи тіла, зв'язки, сили, датчики та інші елементи. Це спрощує процес моделювання та дозволяє швидко створювати складні системи. Знайти блоки можна після встановлення інструментарію, відкривши "Library Browser" та прогорнувши бічну смугу прокручування вниз, як це показано на рис.2.7.

Крім того, Simscape Multibody надає розширені інструменти для аналізу динаміки та поведінки механічних систем. Цей тулбокс дозволяє виконувати симуляції руху, аналізувати напруження та сили у різних частинах системи, визначати оптимальні параметри конструкції та багато чого іншого. Це дозволяє детально досліджувати характеристики механічної системи та оптимізувати її дизайн.

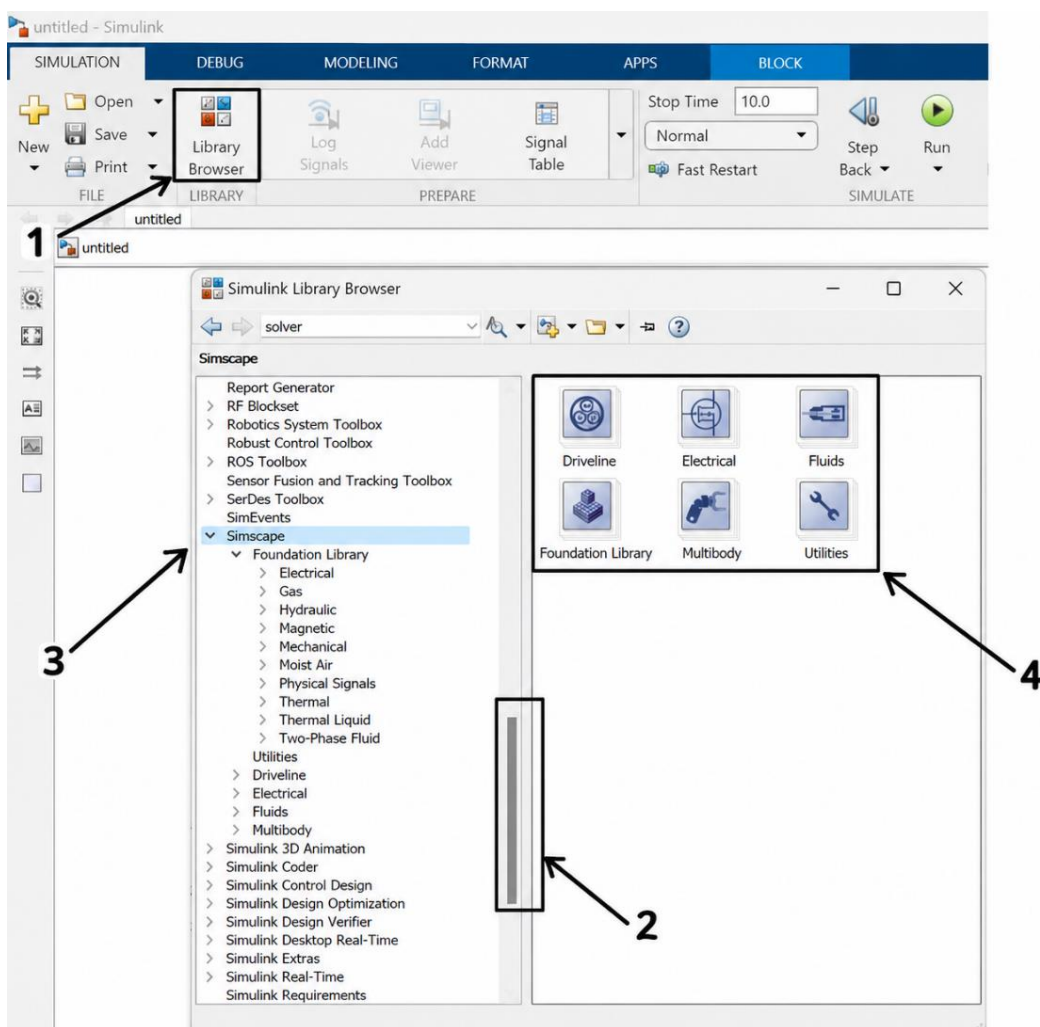


Рисунок 2.7 – Розташування бібліотеки блоків інструментарію Simscape

Пакет SimScape MultiBody дозволяє створювати 3D-моделі твердих тіл двома різними способами.

Одним зі способів побудови моделі є імпорт моделей комп'ютерного проектування (Computer-Aided Design - CAD) або моделей об'єднаного формату опису роботів (Unified Robot Description Format – URDF) для робота в SimScape MultiBody за допомогою функції SM import [40].

Створення нової моделі SimScape MultiBody здійснюється за допомогою команди `ssc_new`, яку необхідно ввести в командному вікні MATLAB. Застосування цієї команди дозволяє автоматизувати початкове налаштування проєкту та використовувати рекомендовані параметри середовища моделювання. Після виконання команди система автоматично формує нову

модель Simscape, додає базові блоки, необхідні для побудови фізичної схеми, налаштовує параметри розв'язувача та активує реєстрацію результатів моделювання. Це спрощує процес розробки та дозволяє користувачу зосередитися безпосередньо на створенні моделі, а не на початковому конфігуруванні середовища [41].

Стандартна кількість бібліотек Simscape становить шість, як це показано на рис.2.7. За бажанням користувач може створювати свої, абсолютно унікальні блоки, які підходять під певні параметри та потреби, але основне наповнення інструментарію складають, як показано на рис. 2.7.:

1. Driveline: Бібліотека Simscape Driveline використовується для моделювання різних механічних приводів і систем передачі руху. Вона містить готові елементи, за допомогою яких можна створювати моделі редукторів, передач, валів, муфт та інших механізмів. Також у бібліотеці доступні компоненти, що дозволяють моделювати окремі вузли транспортних засобів, наприклад двигуни або трансмісії. Застосування Simscape Driveline дає можливість досліджувати процес передачі механічної енергії між елементами системи та аналізувати їхню роботу за різних умов. Бібліотека легко поєднується з іншими засобами MATLAB і Simulink, що дозволяє створювати комплексні моделі та перевіряти роботу алгоритмів керування [39].
2. Electrical: Бібліотека Simscape Electrical призначена для створення та дослідження моделей електричних і електронних систем різної складності. До її складу входять елементи для моделювання електричних кіл, силової електроніки, електродвигунів, джерел живлення та електромеханічних пристроїв. За допомогою цієї бібліотеки можна аналізувати роботу електронних схем, вивчати характеристики електроприводів, а також досліджувати процеси, що відбуваються в електроенергетичних системах. Simscape Electrical дає змогу поєднувати електричні моделі з механічними, гідравлічними та іншими фізичними

підсистемами, створюючи єдину модель об'єкта [39].

3. Fluids: Simscape Fluids (раніше SimHydraulics) пропонує бібліотеку компонентів для моделювання систем рідин, включаючи гідравлічні насоси, клапани та інше. У робототехніці Simscape Fluids може застосовуватися для моделювання пневматичних і гідравлічних приводів маніпуляторів, допоміжних механізмів захоплення та систем охолодження обладнання. Завдяки інтеграції із Simulink можливе поєднання фізичних моделей з алгоритмами керування та проведення HIL (Hardware-in-the-Loop) випробувань [39].
4. Foundation Library: Ця бібліотека є базовою у середовища Simscape, вона містить набір фундаментальних фізичних компонентів. Для задач робототехніки Foundation Library відіграє роль основи під час побудови моделей маніпуляторів. А саме, механічні обертальні та поступальні елементи можуть використовуватися для опису руху окремих ланок, приводів і виконавчих механізмів робота. Важливою перевагою бібліотеки є можливість створення власних компонентів на основі базових блоків та їх подальшого об'єднання у параметризовані підсистеми. Це дає змогу адаптувати модель до конкретної конструкції маніпулятора та повторно використовувати створені компоненти в інших проєктах [39].
5. Utilities: це набір корисних інструментів, які спрощують процес створення моделей фізичних мереж у середовищі Simscape. Її основним призначенням є забезпечення взаємодії між фізичними мережами Simscape та функціональними блоками Simulink. Одним із ключових елементів бібліотеки є блок Solver Configuration, який визначає параметри розрахунку фізичної мережі та є обов'язковим для кожної моделі Simscape. Саме він забезпечує коректне розв'язання системи рівнянь, що описують поведінку фізичних компонентів під час симуляції. А для обміну даними між середовищами Simscape та Simulink

використовуються блоки Simulink-PS Converter і PS-Simulink Converter[39].

6. Multibody: Simscape Multibody є додатковим тулбоксом в рамках середовища Simscape, призначеним для моделювання та імітації рухомих механічних систем. До його складу входять компоненти для моделювання та аналізу руху твердих тіл, з'єднань, механізмів та мехатронних систем. За допомогою бібліотеки можна відтворити геометричну структуру робота, задати параметри ланок і шарнірів, а також дослідити траєкторії руху робочого органу. Можливості цієї бібліотеки доповнюють основні функції Simscape, розширюють їх до моделювання руху [39].

Отже, Simscape Multibody є важливим доповненням середовища Simscape, орієнтованим саме на моделювання багатокomпонентних механічних систем у тривимірному просторі. Він посилює функціональність Simscape, дозволяючи моделювати рухомі механічні системи з високою точністю та деталізацією. Саме тому даному інструментарію було приділено окремий підрозділ. Для розробки моделі маніпулятора можливості Simscape Multibody є ключовими, тому що дозволяють створити тривимірну модель робота, дослідити траєкторії переміщення робочого органу ще до виготовлення фізичного прототипу.

Висновки до Розділу 2

У другому розділі було розглянуто програмне середовище MATLAB та його основні інструментальні пакети, які можуть бути використані для моделювання робототехнічних систем. Особливу увагу приділено засобам Simulink, Simscape, Simscape Multibody та Robotics System Toolbox, оскільки саме вони були обрані для подальшої розробки моделі робота-маніпулятора в рамках даної роботи.

Під час аналізу було встановлено, що Simulink забезпечує зручні засоби для побудови структурних схем і реалізації алгоритмів керування, а також дозволяє досліджувати поведінку системи під час моделювання. Використання графічного представлення моделі значно спрощує процес її розробки та подальшого налагодження.

Розгляд можливостей Simscape показав, що даний пакет дозволяє створювати фізичні моделі технічних об'єктів із урахуванням їх реальних параметрів. Особливий інтерес для даної роботи становить бібліотека Simscape Multibody, яка надає можливість формувати тривимірні моделі механізмів, задавати кінематичні зв'язки між окремими елементами конструкції та досліджувати їх взаємодію під час руху.

Крім того, було досліджено можливості Robotics System Toolbox, який містить необхідні засоби для роботи з роботами-маніпуляторами, виконання розрахунків прямої та оберненої кінематики, аналізу робочої зони та формування траєкторій руху. Це робить його корисним інструментом при розробці та дослідженні роботизованих систем різного призначення.

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що середовище MATLAB забезпечує всі необхідні засоби для створення цифрової моделі робота-маніпулятора та проведення її дослідження. Поєднання можливостей Simulink, Simscape Multibody та Robotics System Toolbox дозволяє виконувати як побудову механічної структури робота, так і розробку алгоритмів керування та аналіз отриманих результатів у межах одного програмного середовища.

Таким чином, отримані в даному розділі результати стали основою для подальшого виконання практичної частини роботи. У наступному розділі буде розглянуто процес створення моделі маніпулятора типу SCARA, реалізацію його кінематичної структури, розробку системи керування та дослідження роботи роботизованої системи під час виконання операцій сортування.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Основна мета третього розділу полягає у демонстрації можливостей інструментаріїв Simulink, Robotics System Toolbox, Simscape Multibody та Simscape для моделювання робота-маніпулятора, основою є опрацьована інформація у попередніх розділах. У межах цієї роботи більшу увагу приділимо процесу створення цифрової моделі робота-маніпулятора типу SCARA, що є прототипом промислової системи сортування.

Відповідно до завдання, в дипломній роботі в середовищі SolidWorks розроблено модель робототехнічної системи маніпуляторного типу SCARA, виконано обґрунтування і підбір функціональних елементів.

Об'єктом моделювання є робот-маніпулятор SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), конструкція якого складається з нерухомої основи, двох обертальних ланок і вертикальної поступальної ланки. Ця структура забезпечує переміщення робочого органу у горизонтальній площині та зміну його положення по вертикальній осі. Ми обрали саме SCARA-маніпулятор, тому що він славиться широким використанням у виробничих системах для виконання різних операцій типу складання та сортування, а також вимогами технічного завдання.

Під час виконання третього розділу ми виконаємо такі етапи:

1. Створимо тривимірну модель маніпулятора.
2. Перенесемо CAD-моделі в середовище.
3. Застосуємо зворотну та пряму кінематику.
4. Додамо та налаштуємо PID-контролери.
5. Додамо параметри траєкторії та їх протестуємо.
6. Налаштуємо контролери з двигунами постійного струму.

7. Проведемо моделювання роботи та виконаємо аналіз отриманих результатів.

Таким чином, у даному розділі буде представлено повний цикл створення робота-маніпулятора, від формування механічної структури до реалізації алгоритмів керування та аналізу результатів моделювання. Отримані результати дозволять оцінити ефективність використання середовища MATLAB для розробки та дослідження робототехнічних систем і підтвердять або спростують доцільність застосування цифрового моделювання на етапі проєктування роботизованих систем.

3.1 Розробка моделі маніпулятора та перенесення в MATLAB

Проектування моделі робототехнічної системи здійснюємо в середовищі SolidWorks. Вибір саме цього пакету САПР обумовлений тим, що він просто інтегрується із середовищем MATLAB/Simulink через спеціалізований інструментарій Simscape Multibody Link, використання цього пакету дозволяє експортувати повний набір фізико-механічних параметрів збірки (маса, точне положення центрів мас та тензори інерції).

Відповідно до завдання, в дипломній роботі в середовищі SolidWorks розроблено модель робототехнічної системи маніпуляторного типу SCARA. Елементи, з яких складається збірка, зображені на рис. 3.1.

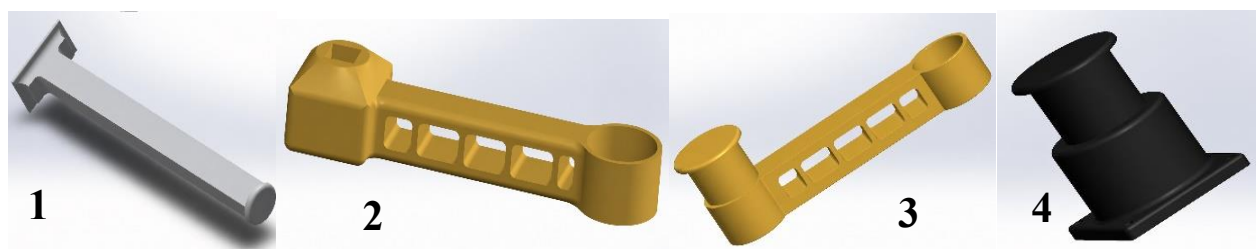


Рисунок 3.1 – Основні деталі маніпулятора.

1. Електромагнітний захват (griper) – кінцевий виконавчий пристрій маніпулятора, призначений для захоплення, утримання та переміщення феромагнітних об'єктів. Принцип його роботи ґрунтується на створенні магнітного поля під час подачі електричного струму на котушку електромагніту. Використання електромагнітного захвату дозволяє спростити конструкцію робочого органу та забезпечити надійне переміщення металевих деталей у процесі сортування.

2. Перша ланка маніпулятора (link_1) – рухома ланка, з'єднана з кінцевим виконавчим пристроєм та другою ланкою. Забезпечує переміщення робочого органу та розширює досяжність маніпулятора.

3. Друга ланка маніпулятора (link_2) – рухома ланка, з'єднана з опорною стійкою та першою ланкою. Вона виконує обертальний рух навколо горизонтальної осі, формуючи робочу зону маніпулятора.

4. Опорна стійка (base) – вертикальний елемент конструкції, який забезпечує кріплення маніпулятора та слугує опорою для рухомих ланок.

На рис. 3.2. показано повну збірку маніпулятора SCARA.

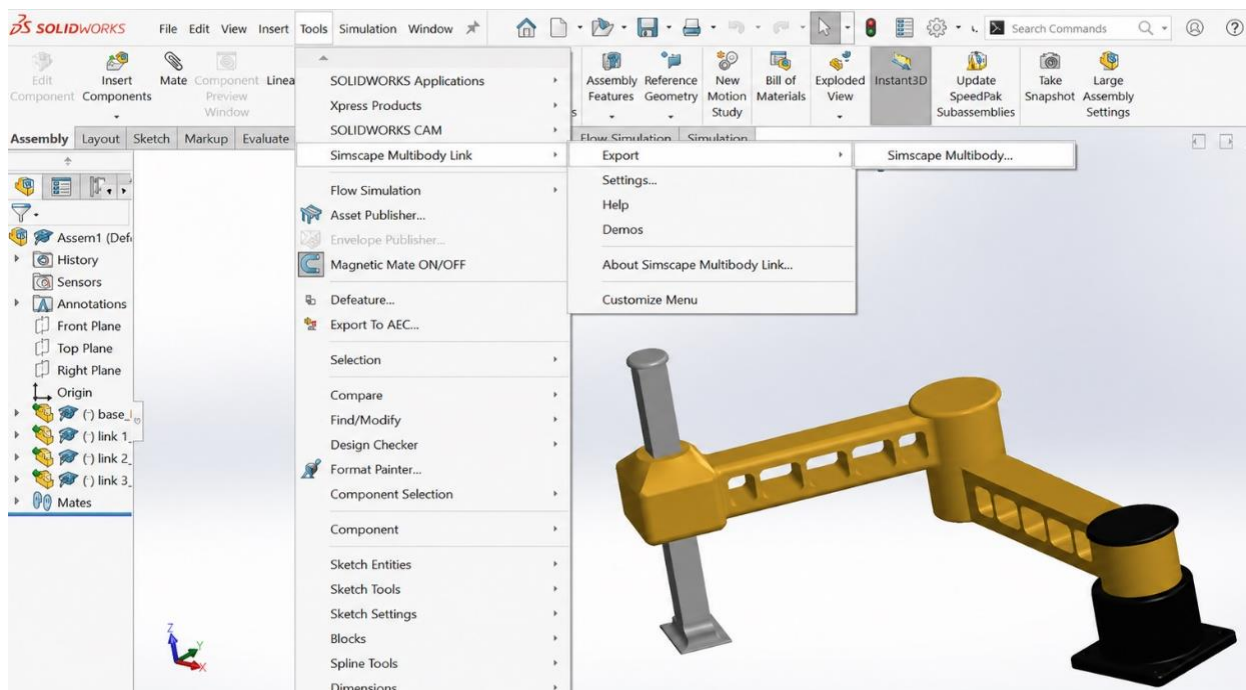


Рисунок 3.2 – Повна збірка маніпулятора в SolidWorks

Також рис. 3.2 демонструє використання модуля Simscape Multibody Link, який забезпечує експорт тривимірної моделі та її параметрів до середовища MATLAB/Simulink.

Для реалізації механічної частини роботизованої системи було імпортовано та покращено s-модель SCARA-маніпулятора в середовище Simscape Multibody. Дана модель відображає кінематичну структуру робота та містить основні елементи, необхідні для моделювання його руху. Загальний вигляд моделі наведено на рис.3.3.

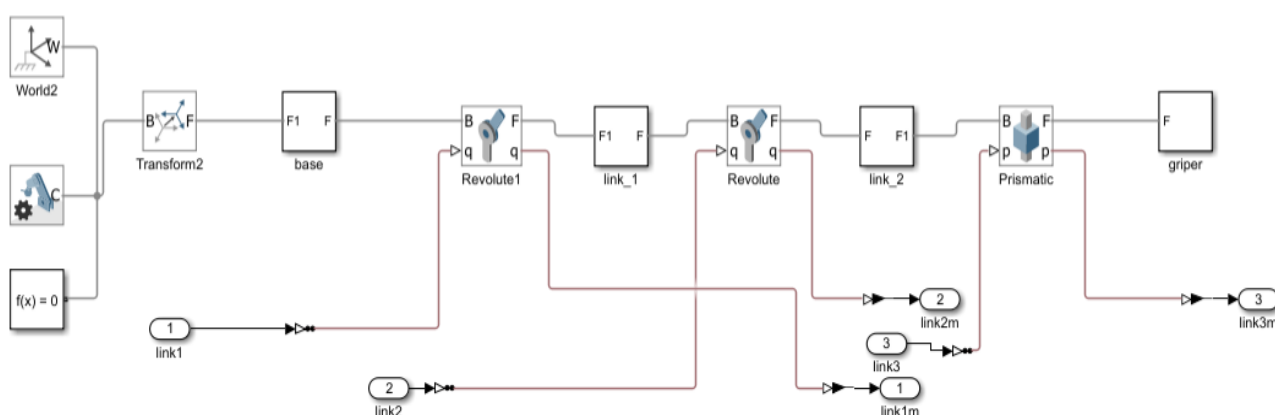


Рисунок 3.3 – Розроблена S-модель робота-маніпулятора

Опишемо структуру імпортованої моделі. Перший блок, який використано, це World Frame (World2), він формує систему координат та визначає нерухому систему відліку для всіх елементів системи. Також до моделі включено блок Mechanism Configuration, який виконує налаштування параметрів фізичного середовища, а саме силу та напрямку дії гравітації. Для виконання розрахунків під час моделювання використано блок Solver Configuration, який забезпечує коректну роботу фізичної моделі та обчислює параметри руху маніпулятора. Отже, на початковому етапі ми сформували базове середовище моделювання, яке включає систему координат, параметри фізичного середовища та засоби чисельного розрахунку.

Для правильного розташування конструкції відносно глобальної системи координат використовуємо блок Transform2, за допомогою якого задано початкове положення моделі у просторі. До нього приєднано тверде тіло base_1, що представляє нерухому основу маніпулятора. Внутрішня структура кожної ланки наведена на рис. 3.4.

Кожну ланку маніпулятора сформовано на основі блоку Solid, для якого задано геометричні характеристики та масово-інерційні параметри. Для визначення локальної системи координат використано блок Reference Frame, а просторове розташування окремих елементів конструкції реалізовано за допомогою блоку Rigid Transform. Така структура використана як для основи маніпулятора, так і для всіх його рухомих ланок.

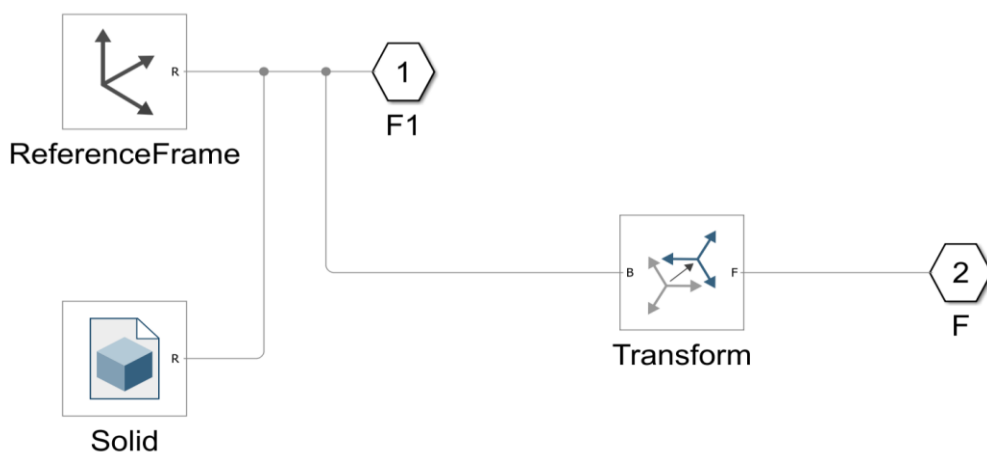


Рисунок 3.4 – Внутрішня структура твердого тіла моделі SCARA-маніпулятора

Перший ступінь свободи маніпулятора реалізовано обертальним шарніром Revolute1, що забезпечує поворот ланки відносно основи навколо горизонтальної осі. До нього приєднано першу рухому ланку link_1. Для керування кутовим переміщенням використано вхідний сигнал link1, який надходить на шарнір під час моделювання (рис. 3.3).

Другий ступінь свободи маніпулятора реалізовано аналогічним чином. Для цього до першої ланки link_1 через обертальний шарнір Revolute приєднано

другу ланку link_2. Цей шарнір забезпечує поворот другої ланки відносно першої та розширює можливості позиціонування робочого органу. Кут повороту другої ланки задається керуючим сигналом, який подається через вхідний порт link2 (рис. 3.3).

Третій ступінь свободи виконано за допомогою поступального шарніра Prismatic. Цей елемент забезпечує рух уздовж вертикальної осі Z. До шарніра приєднано ланку gripper, яка виконує функцію кінцевого ефектора. Керування поступальним переміщенням здійснюється через вхідний сигнал link3 (рис. 3.3).

У результаті виконаних етапів сформовано кінематичну структуру типу R–R–P, яка є характерною для маніпуляторів класу SCARA. Два обертальні шарніри забезпечують переміщення кінцевого ефектора в горизонтальній площині, тоді як поступальний шарнір відповідає за його переміщення вздовж вертикальної осі. Така конфігурація дозволяє здійснювати позиціонування робочого органу в межах заданої робочої зони.

Наступним етапом перевірено масо-інерційні характеристики такі як маса, положення центра мас та моменти інерції. Налаштування даних параметрів виконувалося у блоці Solid, який використовується для опису фізичних властивостей кожної ланки маніпулятора. Приклад задання масо-інерційних характеристик наведено на рис. 3.5.

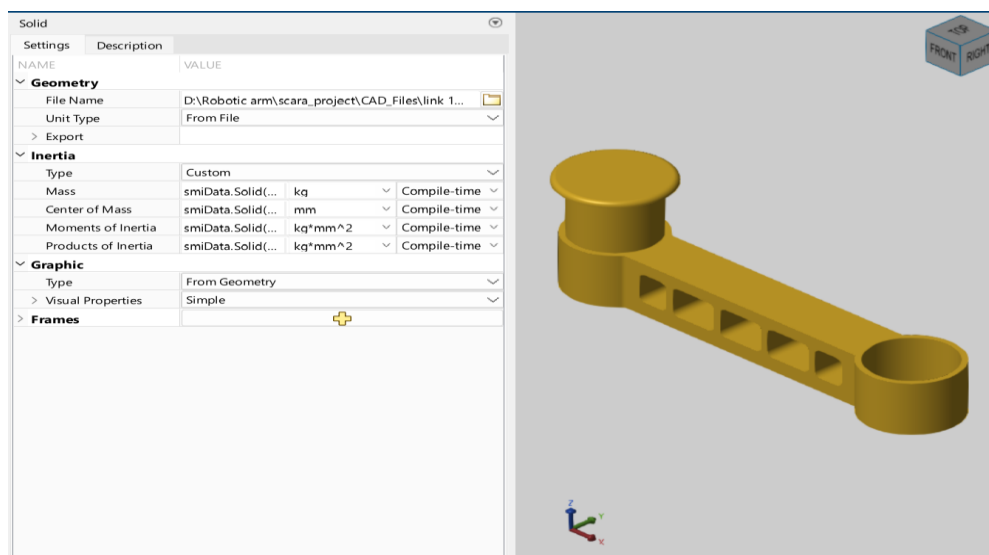


Рисунок 3.5 – Вікно налаштування масо-інерційних характеристик в блоці Solid

Як видно з рис. 3.5, у параметрах блоку Solid масо-інерційні характеристики не вводяться вручну, а підтягуються зі структури smiData.Solid. Ця структура зберігається у MATLAB-файлі Scara_DataFile1.m, який формується під час імпорту CAD-моделі до середовища Simscape Multibody. У файлі (рис. 3.6) містяться числові значення маси, координат центра мас, моментів інерції та добутків інерції для кожного елемента конструкції.

```

scara_DataFile1.m
D:\Robotic arm\scara_project\scara_DataFile1.m
101 smiData.Solid(3).opacity = 1;
102 smiData.Solid(3).ID = "link 2*:Default";
103
104 %%
105 smiData.Solid(4).mass = 0.31576932885540948; % kg
106 smiData.Solid(4).CoM = [0 0 66.427973804086378]; % mm
107 smiData.Solid(4).MoI = [672.32739435656129 672.32739435656106 345.88631799435939];
108 smiData.Solid(4).PoI = [0 0 0]; % kg*mm^2
109 smiData.Solid(4).color = [0.792156862745098 0.81960784313725488 0.933333333333333];
110 smiData.Solid(4).opacity = 1;
111 smiData.Solid(4).ID = "base*:Default";
112 %%
113 %===== Кінематичні з'єднання (Joint) =====%
114

```

Рисунок 3.6 – Фрагмент коду з параметрами основи маніпулятора

У результаті виконання даного етапу було експортовано та створено механічну модель SCARA-маніпулятора, яка є основою для подальшої реалізації алгоритмів прямої та оберненої кінематики.

3.2 Розробка та реалізація оберненої та прямої кінематики

Кінематичний аналіз є одним із основних етапів проєктування робототехнічних систем, оскільки дозволяє визначити взаємозв'язок між координатами робочого органу та положенням окремих ланок маніпулятора. Для розробленого маніпулятора було реалізовано моделі прямої та оберненої кінематики в середовищі MATLAB/Simulink. Отримані алгоритми забезпечують визначення координат робочого органу за відомими параметрами з'єднань

(суглобів), а також розрахунок необхідних кутів повороту ланок для досягнення заданої точки в робочому просторі [37].

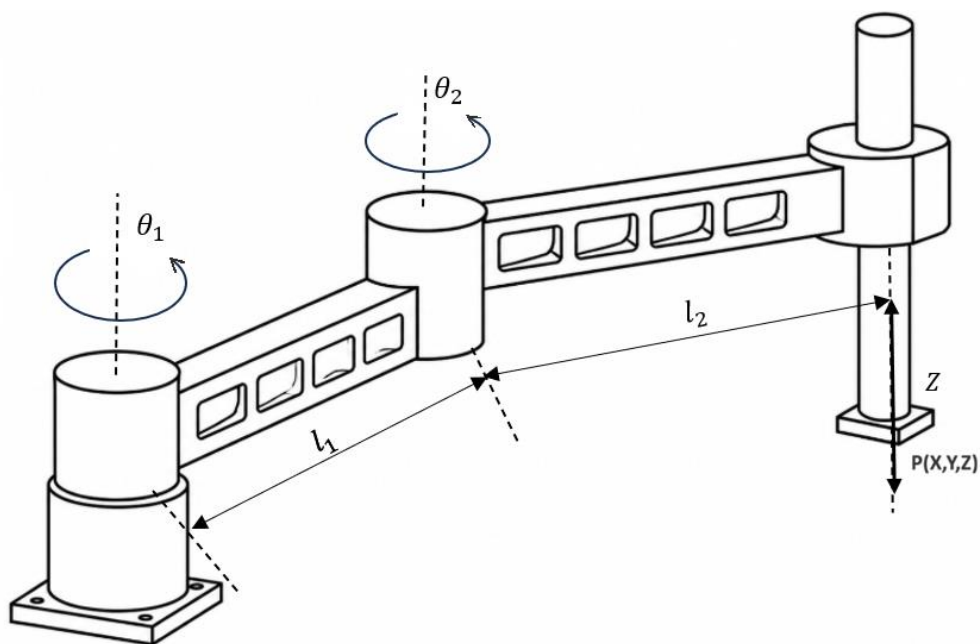


Рисунок 3.7. – Кінематична схема SCARA-маніпулятора

Задача прямої кінематики полягає у визначенні положення робочого органу маніпулятора за відомими значеннями координат кутів повороту першої та другої ланок, а також вертикального переміщення. Результатом розрахунку є просторові координати робочого органу X , Y та Z .

Для маніпулятора SCARA пряма кінематика описує залежність координат кінцевого ефектора від довжин ланок і кутів їх повороту. Координати робочого органу визначаються за такими рівняннями [38]:

$$\begin{aligned} X &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ Y &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2), \\ Z &= d. \end{aligned} \quad (3.1)$$

де l_1 та l_2 – довжини першої та другої ланок маніпулятора; θ_1 та θ_2 – кути повороту першої та другої ланок маніпулятора; d – вертикальне переміщення.

Координати X та Y визначають положення робочого органу в горизонтальній площині, а координата Z відповідає його переміщенню по вертикалі.

Для реалізації прямої кінематики в середовищі MATLAB розроблено функцію FK (Forward Kinematics), яка обчислює координати робочого органу за заданими кутами повороту ланок та вертикальним переміщенням. Програмна реалізація функції наведена на рис. 3.7.

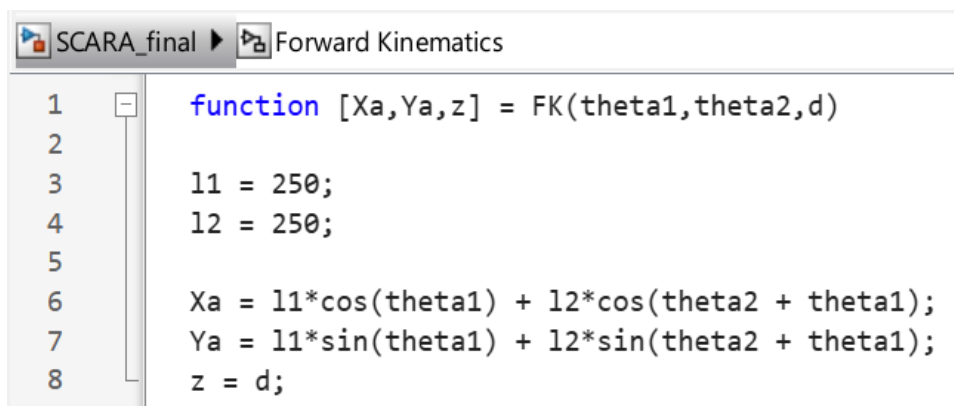


Рисунок 3.7 – Програмна реалізація прямої кінематики маніпулятора

Отримані значення використовуються для перевірки правильності роботи алгоритму оберненої кінематики та подальшого моделювання руху маніпулятора в середовищі Simulink.

Задача оберненої кінематики полягає у визначенні параметрів суглобів маніпулятора за заданими координатами робочого органу. На відміну від прямої кінематики, де за відомими кутами повороту визначаються координати кінцевого ефектора, обернена кінематика дозволяє знайти кути повороту ланок та величину вертикального переміщення, необхідні для досягнення заданої точки в робочому просторі [37].

Довжини першої та другої ланок прийнято однаковими та такими, що становлять 250 мм:

$$\begin{aligned} l_1 &= 250 \text{ мм}, \\ l_2 &= 250 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Перед виконанням основних розрахунків реалізовано перевірку координати Z. Якщо задане значення виходить за допустимі межі переміщення маніпулятора, воно автоматично обмежується. Такий підхід дозволяє уникнути

формування недосяжних положень робочого органу та підвищує стійкість роботи моделі.

Для визначення кута повороту другої ланки використано геометричні співвідношення, отримані на основі теореми косинусів. Спочатку обчислюється значення косинуса кута θ_2 , в подальшому позначене як c_2 , [38]:

$$c_2 = \cos \theta_2 = \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}, \quad (3.3)$$

де X та Y — координати робочого органу;

l_1 та l_2 — довжини першої та другої ланок маніпулятора.

Далі перейдемо до обчислення значення синуса кута θ_2 повороту другої ланки позначене, як s_2 , що визначається за формулою :

$$s_2 = \sin \theta_2 = \sqrt{1 - c_2^2}, \quad (3.4)$$

Кут повороту другої ланки визначається на основі знайдених значень синуса та косинуса цього кута на основі оберненої тригонометричної тотожності за формулою:

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{s_2}{c_2}\right), \quad (3.5)$$

Проте в програмному середовищі використовуємо функцію *atan2*, на противагу до формули (3.5), вона враховує знаки обох аргументів, забезпечує коректне визначення кута повороту другої ланки в усіх чотирьох чвертях координатної площини:

$$\theta_2 = \text{atan2}(s_2, c_2), \quad (3.6)$$

Кут повороту першої ланки θ_1 визначається як різниця між напрямком на задану точку в площині XU та додатковим кутом, що враховує положення другої ланки маніпулятора. У програмній реалізації для коректного визначення кута з

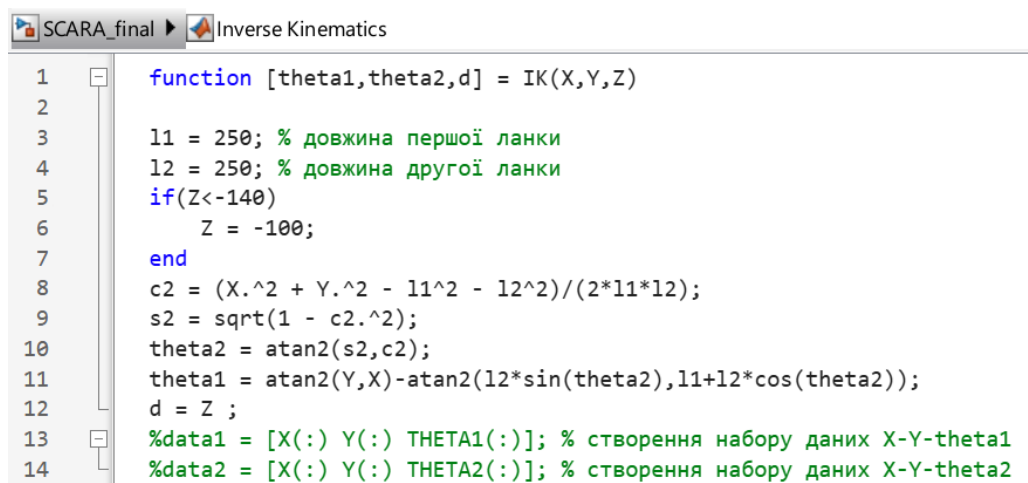
урахуванням чверті координатної площини функцію $\arctan$ замінено на atan2 , тому формула набуває вигляду:

$$\theta_1 = \text{atan2}(Y, X) - \text{atan2}(l_2 \sin \theta_2, l_1 + l_2 \cos \theta_2), \quad (3.7)$$

Вертикальне переміщення поступального шарніра задається співвідношенням:

$$d = Z. \quad (3.8)$$

Реалізація алгоритму оберненої кінематики була проведена таким же чином, як і алгоритм прямої кінематики, з використанням функції ІК (Inverse Kinematics), програму реалізації зображено на рис.3.8.



```

SCARA_final ▶ Inverse Kinematics
1  function [theta1,theta2,d] = IK(X,Y,Z)
2
3      l1 = 250; % довжина першої ланки
4      l2 = 250; % довжина другої ланки
5      if(Z<-140)
6          Z = -100;
7      end
8      c2 = (X.^2 + Y.^2 - l1^2 - l2^2)/(2*l1*l2);
9      s2 = sqrt(1 - c2.^2);
10     theta2 = atan2(s2,c2);
11     theta1 = atan2(Y,X)-atan2(l2*sin(theta2),l1+l2*cos(theta2));
12     d = Z ;
13     %data1 = [X(:) Y(:) THETA1(:)]; % створення набору даних X-Y-theta1
14     %data2 = [X(:) Y(:) THETA2(:)]; % створення набору даних X-Y-theta2

```

Рисунок 3.8 –Реалізація оберненої кінематики

Таким чином, у середовищі MATLAB було реалізовано математичну модель оберненої кінематики SCARA-маніпулятора. Розроблений алгоритм дозволяє за заданими координатами точки автоматично визначати кути повороту обертальних шарнірів та переміщення поступальної ланки. Отримана модель використовується на наступному етапі роботи для формування керуючих сигналів та побудови системи автоматичного керування маніпулятором.

3.3 Формування траєкторій руху та реалізація робочого циклу

Наступним етапом розробки, який слідує за реалізацією алгоритмів прямої й оберненої кінематики, є побудова траєкторії руху робочого органу. Цей етап має на меті домогтися переміщення робочого органу в межах визначеної зони, згідно з розробленим алгоритмом. Оскільки саме траєкторія визначає послідовність переміщення маніпулятора між заданими точками робочої зони та забезпечує виконання робочого циклу, цей етап є важливою складовою процесу моделювання.

Введення координат бажаних точок у моделі реалізовано через підсистему INPUTS, її структуру можна побачити на рис. 3.9.

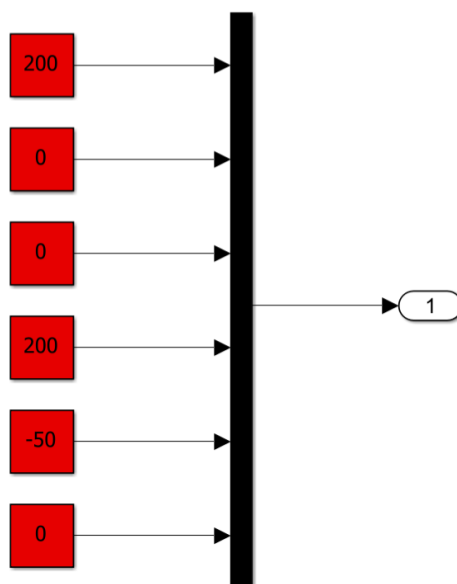


Рисунок 3.9 – Підсистема для задання координат цільових точок

Ця підсистема слугує для генерації координат, які окреслюють положення кінцевого ефектора в межах робочого простору маніпулятора. Джерелами даних є блоки постійних сигналів (Constant), у яких задали значення координат точок переміщення.

На рис. 3.9 видно, що для моделі використано шість незмінних сигналів, які створюють координати двох робочих позицій. Верхні три значення

відповідають координатам першої точки (200; 0; 0), а нижні три блоки координатам другої точки (200; -50; 0). Таким чином задається початкове та кінцеве положення маніпулятора під час виконання робочого циклу.

Блок Mux об'єднує всі сигнали в єдиний вектор даних, який передається до наступного етапу обробки. Надалі сформований набір координат використовується блоком формування траєкторії для послідовного переміщення робочого органу між заданими точками.

Сформований у підсистемі INPUTS набір координат надходить до підсистеми Co-ordinates Generator, структура якої наведена на рис. 3.10.

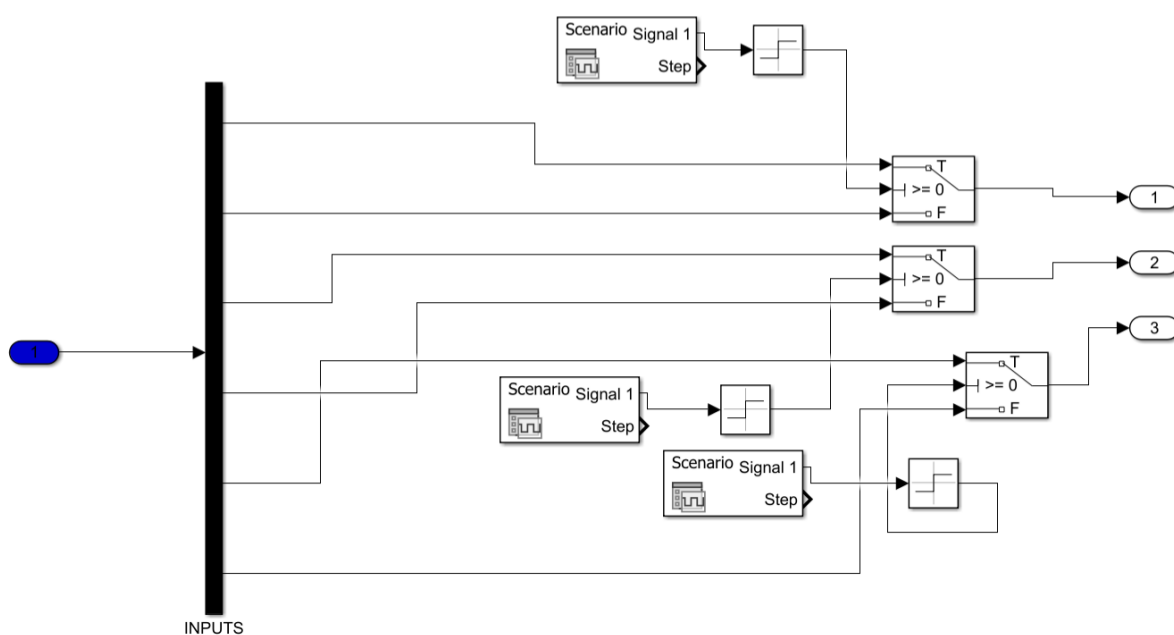


Рисунок 3.10 – Підсистема формування траєкторії руху маніпулятора

Підсистема Co-ordinates Generator відповідає за створення послідовності точок, які робот повинен пройти у процесі виконання робочого циклу. Його основним завданням є автоматичне перемикання між заданими точками та формування координат, що надалі передаються до блоку оберненої кінематики.

Для реалізації зміни положення робочого органу використано блоки Scenario Signal та Switch. Блок Scenario Signal генерує керуючі сигнали у задані моменти часу. Блок Switch перемикається між наборами координат залежно від

стану сигналу. Таким чином ми автоматизували зміну положення маніпулятора без ручного втручання під час симуляції. Така схема забезпечує послідовне виконання циклу.

На виході блоку формуються три сигнали, які відповідають координатам (X), (Y) та (Z) кінцевого ефектора. Отримані координати надходять до блоку оберненої кінематики, де перетворюються на значення кутів повороту шарнірів та величину переміщення поступальної ланки.

Таким чином, на даному етапі було реалізовано механізм формування траєкторії руху SCARA-маніпулятора. Для задання координат цільових точок розроблено блок INPUTS, а формування послідовності переміщень виконано за допомогою блоку Co-ordinates Generator. Реалізована структура забезпечує автоматичну зміну положення кінцевого ефектора відповідно до заданого робочого циклу та передачу координат до блоку оберненої кінематики для подальшого керування маніпулятором.

3.4 Розробка системи керування маніпулятором

Наступним етапом є створення системи автоматичного керування, яка забезпечує переміщення ланок маніпулятора у задані положення. Основним завданням системи керування є формування керуючих впливів для приводів шарнірів, щоб фактичне положення ланок максимально збігалось з розрахованими значеннями.

У розробленій структурі керування PID-регулятори використовуються для зменшення похибки між заданим і фактичним положенням ланок маніпулятора. На вхід кожного регулятора подається різниця між заданим значенням координати шарніра та його поточним значенням, яке отримали із механічної моделі через зворотний зв'язок.

Налаштування PID-регуляторів виконувалося експериментальним методом послідовного підбору коефіцієнтів. Такий підхід полягав у поступовій зміні параметрів регулятора та аналізі реакції системи.

На першому етапі виконувалося налаштування пропорційної складової (K_p). Значення цього коефіцієнта змінювалося для кожного PID-регулятора окремо з метою забезпечення достатньо швидкої реакції системи на зміну заданого положення. Збільшення K_p дозволяє зменшити початкову похибку та прискорити вихід ланки до заданого положення. Проте якщо збільшити цей коефіцієнт надто сильно, це може призвести до коливань.

Після отримання прийнятної реакції системи було виконано налаштування інтегральної складової (K_i). Вона використовується для зменшення залишкової статичної похибки, яка може залишатися після дії пропорційної складової.

На завершальному етапі виконувалося налаштування диференціальної складової (K_d). Вона використовується для зменшення коливань та стабілізації перехідного процесу. Диференціальна складова реагує на швидкість зміни похибки, тому дозволяє зробити рух маніпулятора більш плавним.

Результати налаштування ПІД-регуляторів надані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Кінцеві параметри ПІД-контролерів

Контролер	K_p	K_i	K_d	Коефіцієнт фільтрації (N)
PID 1	5	5	0.2	100
PID 2	80	80	1	100
PID 3	0,001	0,001	0,001	100

За результатами моделювання на рис.3.11 видно, що похибка становить приблизно 10^{-12} , що є надзвичайно хорошим результатом. По осі абсцис відкладено час моделювання, а по осі ординат – похибку координати X .

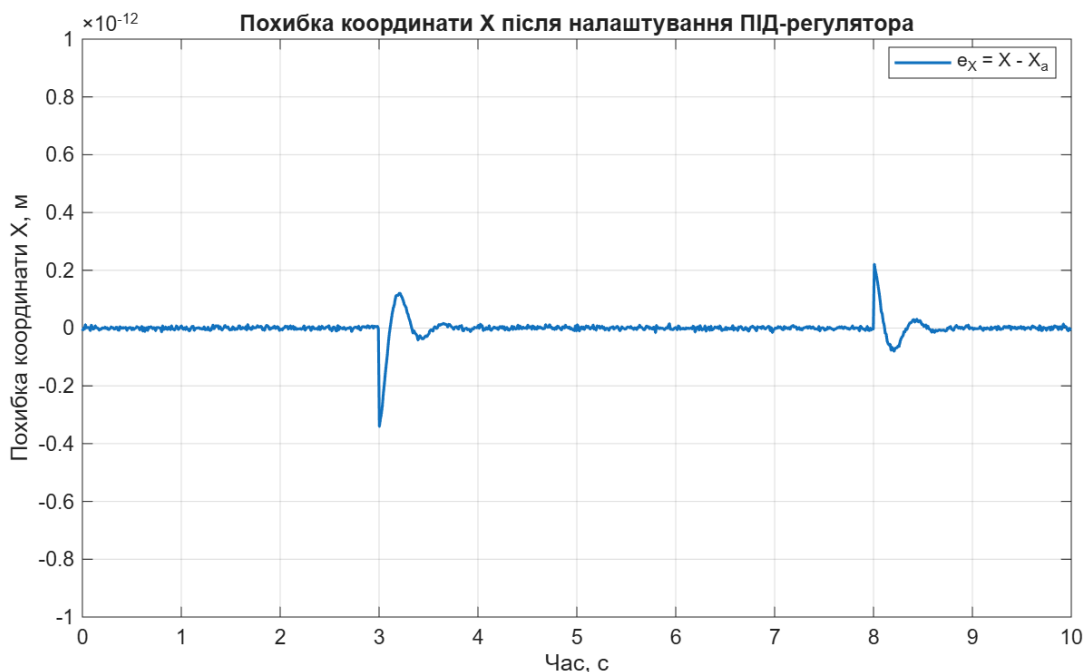


Рисунок 3.11 – Графік змінювання похибки координати X у часі

На рис. 3.12 наведено структуру системи керування SCARA-маніпулятором, реалізовану на основі трьох незалежних ПІД-регуляторів. Кожен регулятор відповідає за керування окремим ступенем свободи маніпулятора.

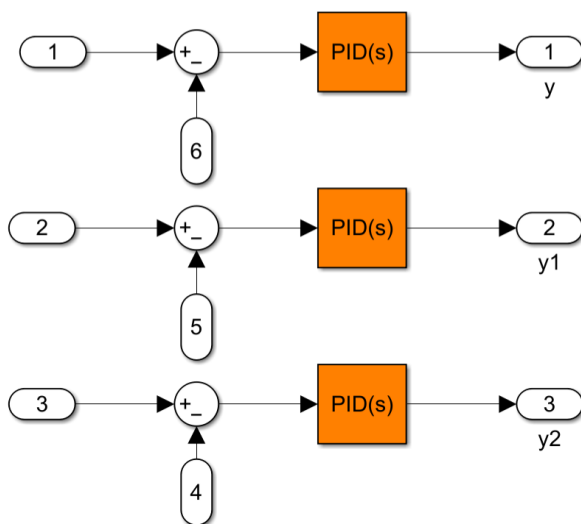


Рисунок 3.12 – Структура системи керування на основі ПІД-регуляторів

На ліві входи схеми надходять задані значення положення (1,2,3), отримані в результаті розрахунку оберненої кінематики. Одночасно на нижні входи суматорів (6,5,4) подаються фактичні значення координат шарнірів, які надходять

із механічної моделі через канали зворотного зв'язку. У суматорах виконується порівняння заданого та фактичного положення (функція віднімання), внаслідок чого на виходах суматорів формуються сигнали похибки.

Похибка, яка сформувалася, надходить на ПІД-регулятор, який обчислює керуючий вплив для приводу ланки. Перший регулятор керує кутом повороту першої ланки маніпулятора, другий – кутом повороту другої ланки, а третій відповідає за керування поступальним переміщенням виконавчого органу вздовж вертикальної осі.

На виходах регуляторів формуються сигнали u , u_1 та u_2 , які передаються до механічної моделі. Застосування персонального контролера для кожної ланки забезпечує вищу точність позиціонування та стабільну роботу системи.

У прикладах моделювання маніпуляторів PID-регулятори можуть поєднуватися з окремою електромеханічною моделлю двигуна постійного струму. У такому випадку вихідний сигнал PID-регулятора подається на модель двигуна, де перетворюється у струм або момент, що приводить у рух відповідний шарнір.

У межах даної дипломної роботи окрема схема двигуна постійного струму не розроблялася. Це пов'язано з тим, що основна увага роботи зосереджена на побудові механічної моделі SCARA-маніпулятора, реалізації алгоритмів прямої та оберненої кінематики, а також дослідженні системи керування положенням. Тому функцію виконавчих механізмів у моделі виконують керовані шарніри підсистеми SCARA Robot, на які подаються сигнали від PID-регуляторів.

Цей підхід дозволяє спростити структуру моделі та зосередитися на аналізі переміщення кінцевого ефектора, точності позиціонування і правильності відпрацювання заданої траєкторії. Моделювання окремих електричних приводів, їх параметрів, моменту, струму та передавальних механізмів може бути виконане окремо, або на наступних етапах дослідження. Наприклад, у межах магістерської роботи для більш детального наближення цифрової моделі до реальної робототехнічної системи.

3.5 Моделювання роботи маніпулятора та аналіз результатів

Після завершення розробки механічної моделі, реалізації алгоритмів оберненої кінематики, налаштування системи керування та формування траєкторій руху було виконано моделювання роботи SCARA-маніпулятора в середовищі MATLAB Simulink. Основною метою даного етапу є перевірка працездатності розробленої моделі, оцінка точності позиціонування кінцевого ефектора та аналіз поведінки системи під час виконання заданого робочого циклу.

Під час моделювання маніпулятор здійснює послідовне переміщення між заданими координатними точками, які формуються блоком INPUTS та передаються до системи керування через блок формування траєкторії. На основі цих координат блок оберненої кінематики розраховує необхідні значення кутів повороту обертальних шарнірів і величину переміщення поступальної ланки.

Отримані сигнали надходять до ПІД-регуляторів, які формують керуючі впливи для кожного ступеня свободи маніпулятора. Завдяки використанню зворотного зв'язку система безперервно контролює фактичне положення ланок та виконує коригування руху до досягнення заданих координат.

Після запуску моделі було отримано графіки зміни координат маніпулятора, наведені на рис. 3.13.

По осі абсцис на графіків відкладено час моделювання. По осі ординат відкладено значення координат кінцевого ефектора у робочому просторі маніпулятора.

Верхній графік показує зміну координати X_a , тобто переміщення робочого органа вздовж осі X . Середній графік показує зміну координата Y_a , характеризує переміщення кінцевого ефектора вздовж осі Y , а координата Z_a відображає вертикальний рух поступальної ланки.

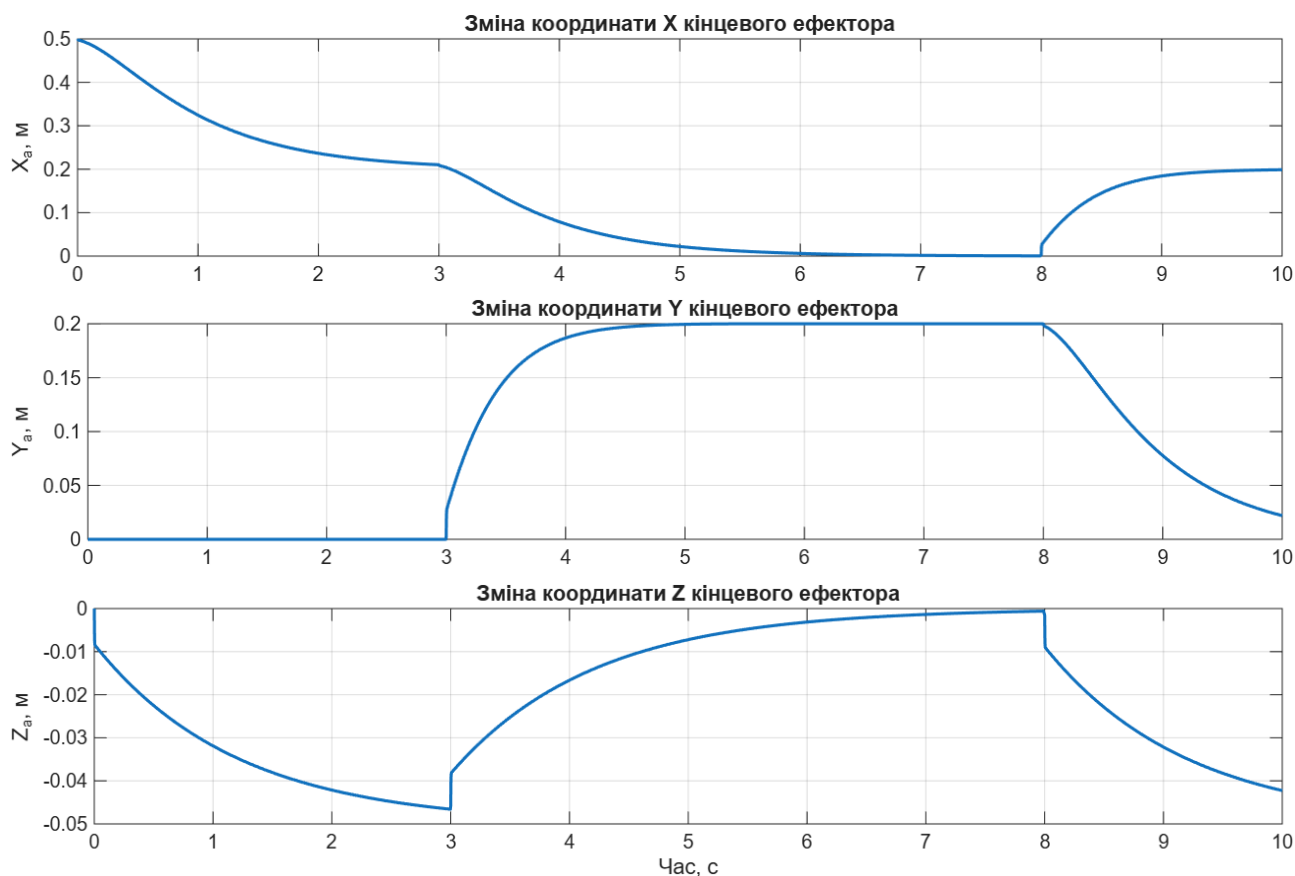


Рисунок 3.13 – Зміна координат кінцевого ефектора під час виконання робочого циклу

Аналізуючи отримані результати бачимо, що маніпулятор успішно відпрацьовує задану траєкторію руху. На початковому етапі моделювання відбувається переміщення робочого органу від початкового положення до першої заданої точки. Після досягнення необхідних координат система переходить до наступного етапу робочого циклу, що супроводжується зміною координат у горизонтальній та вертикальній площинах.

З графіків видно, що зміна положення кінцевого ефектора відбувається плавно та без різких стрибків. Перехідні процеси мають аперіодичний характер, а коливання практично відсутні. Це свідчить про коректне налаштування ПД-регуляторів та стійкість розробленої системи керування.

На рис. 3.14 наведено графіки змінювання похибок відпрацювання координат кінцевого ефектора.

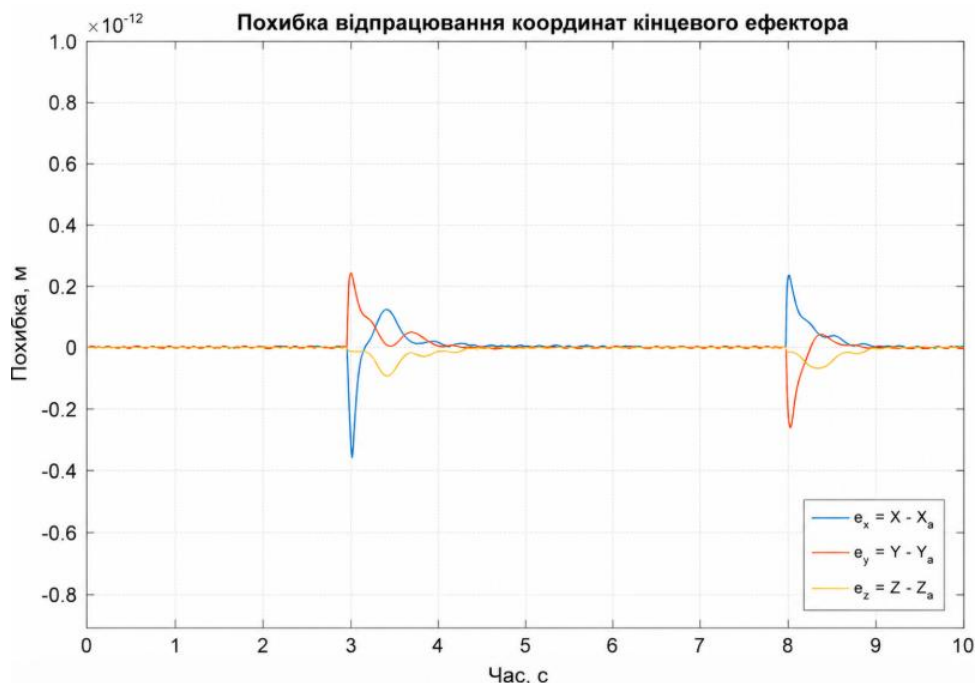


Рисунок 3.14 – Похибка координат кінцевого ефектора

Аналізуючи графік, ми можемо спостерігати, що статична похибка положення для всіх трьох каналів керування дорівнює нулю. Це свідчить про повну компенсацію статичних моментів опору завдяки інтегральній складовій ПІД-контролерів. Сплески похибки виникають в моменти інтенсивного розгону або гальмування ланок. Масштаб осі ординат становить $\times 10^{-12}$, це вказує на надзвичайно малі значення похибок. Такі значення пояснюються ідеалізацією комп'ютерної моделі та відсутністю випадкових шумових завад і сил тертя у шарнірах. У реальних умовах експлуатації похибка буде вищою.

Отриманий результат підтверджує правильність реалізації алгоритму оберненої кінематики та ефективність використаного контуру зворотного зв'язку.

На рис. 3.15 по осі абсцис відкладено фактичну координату (X_a), м, а по осі ординат фактичну координату (Y_a), м, отримані після блоку прямої кінематики. Проведене моделювання показало, що розроблена модель SCARA-маніпулятора забезпечує точне позиціонування кінцевого ефектора в межах робочої зони та може бути використана для дослідження процесів сортування й переміщення

об'єктів.

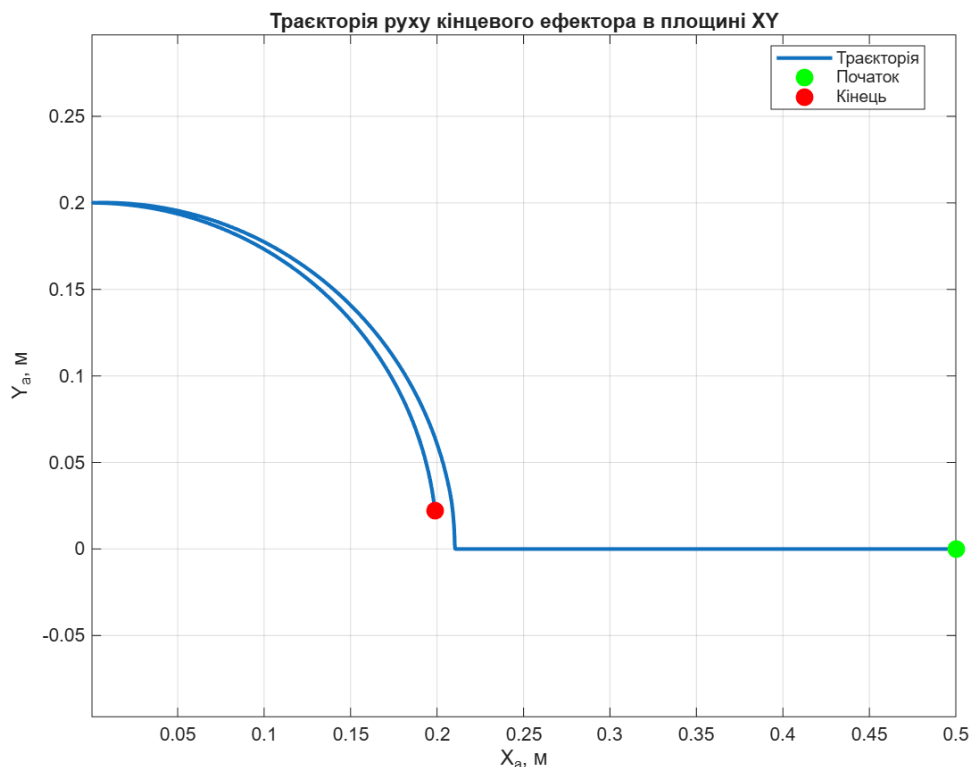


Рисунок 3.15 – Траєкторія руху кінцевого ефектора SCARA-маніпулятора в площині XY

Для додаткової перевірки працездатності розробленої моделі було використано вікно Mechanics Explorer, яке автоматично формується за допомогою засобів Simscape Multibody під час виконання моделювання. Результат моделювання наведено на рис. 3.16.

На 3D представленні спостерігаємо зміну положення ланок у часі. З рис. 3.16 бачимо, що модель працює коректно, що підтверджує узгодженість роботи механічної моделі з алгоритмами оберненої кінематики і системою автоматичного керування. У процесі моделювання не було виявлено порушень кінематичних зв'язків чи нестійких режимів роботи, що свідчить про коректність реалізованої моделі. Варто зазначити, що ця модель є прототипом

Порівняння результатів графічного аналізу координат кінцевого ефектора з візуальною анімацією руху показало відповідність між розрахованими та фактичними переміщеннями маніпулятора. Це підтверджує працездатність

розробленої системи та можливість її використання для дослідження процесів позиціонування і сортування об'єктів в подальших роботах.

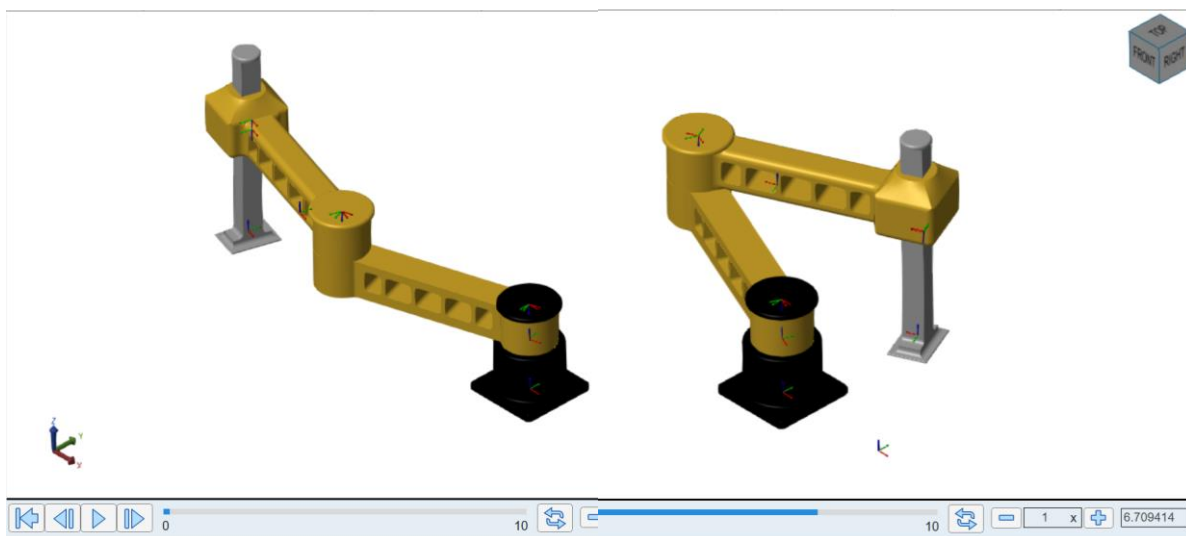


Рисунок 3.16 – Результат моделювання SCARA-маніпулятора у середовищі Mechanics Explorer

На рис. 3.17 наведено загальну структуру розробленої моделі SCARA-маніпулятора, яка об'єднує всі основні функціональні блоки системи.

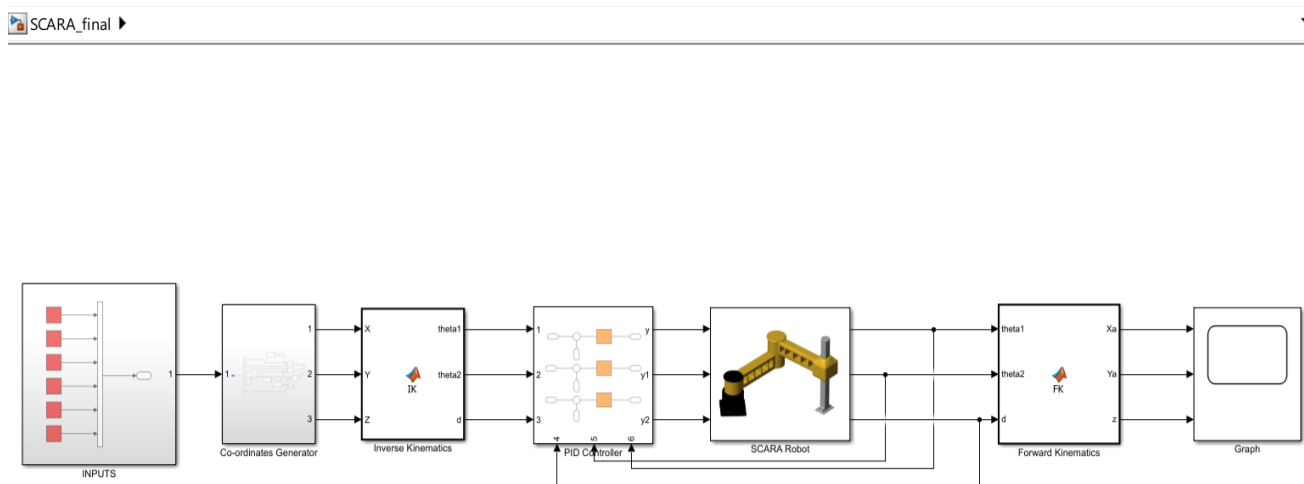


Рисунок 3.17 – Загальна структура розробленої моделі в середовищі Simulink

Модель складається з підсистем задання координат, формування траєкторії руху, оберненої кінематики, системи автоматичного керування, механічної моделі маніпулятора, прямої кінематики та блоку візуалізації результатів.

Загальна послідовність етапів розробки, моделювання та налаштування системи керування маніпулятора SCARA наведена на рис. 3.18.

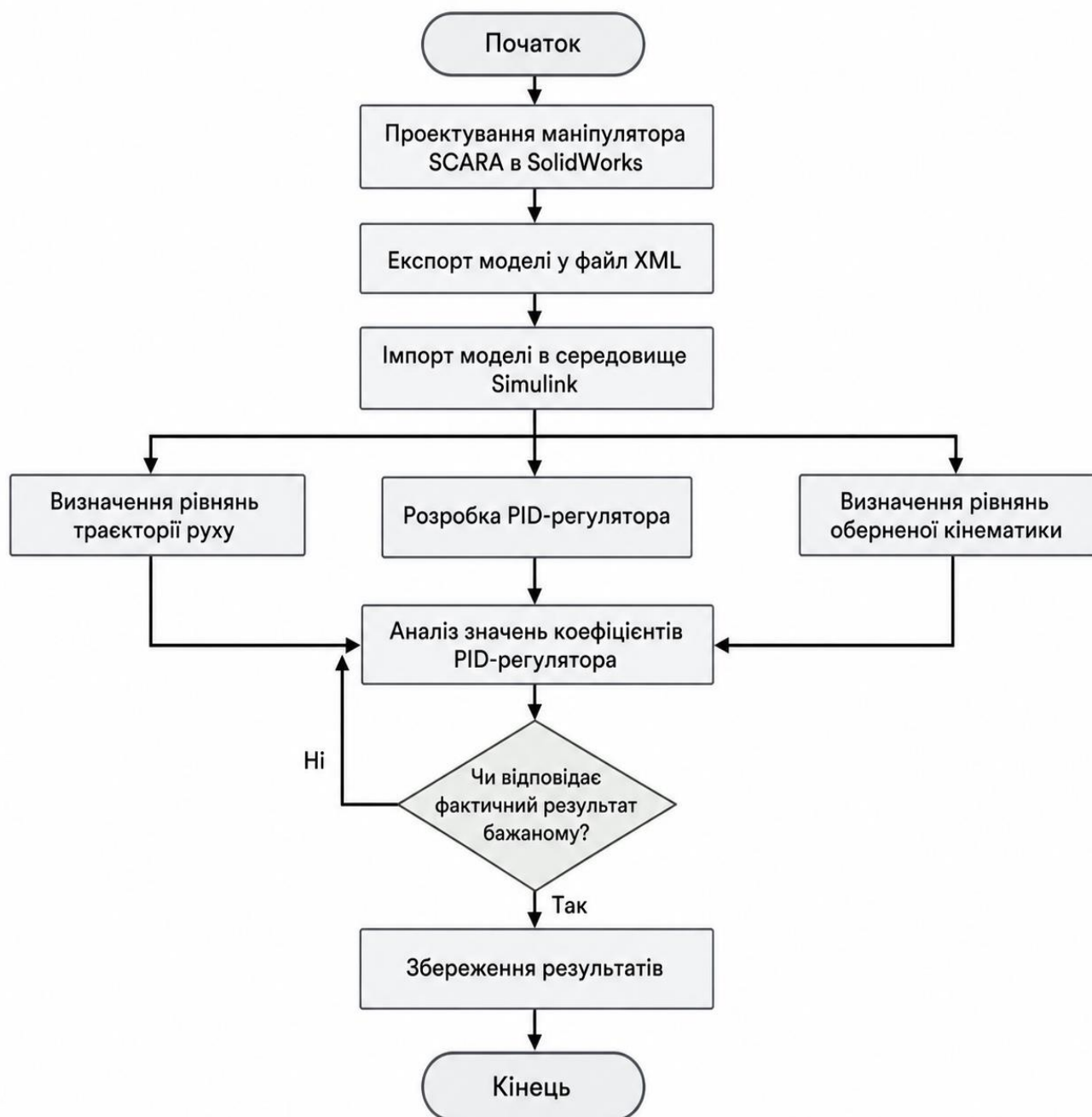


Рисунок 3.18 – Блок-схема процесу розробки та моделювання маніпулятора

Висновки до Розділу 3

У третьому розділі розроблено цифрову модель SCARA-маніпулятора в середовищі MATLAB із використанням засобів Simulink, Simscape та Simscape Multibody. Під час створення моделі сформовано механічну структуру маніпулятора, яка включає основу, дві обертальні ланки та вертикальну поступальну ланку.

Для опису руху робочого органу побудовано математичну модель оберненої та прямої кінематики. Це дозволяє визначати необхідні координати шарнірів за заданим положенням кінцевого ефектора. Коректність розрахунків перевірено за допомогою блоку прямої кінематики та аналізу результатів моделювання.

Окрему увагу приділено розробці системи керування. Для кожного ступеня свободи застосовано ПД-регулятор, що забезпечує відпрацювання заданих координат. На основі сформованих координатних точок реалізовано робочий цикл переміщення маніпулятора в межах робочої зони.

Проведене моделювання показало, що створена модель стабільно виконує задані переміщення та досягає необхідних координат кінцевого ефектора. Аналіз графіків і тривимірної візуалізації підтвердив узгодженість роботи механічної частини, алгоритму оберненої кінематики та системи керування.

Підсумовуючи, розроблена модель може використовуватися для дослідження режимів роботи SCARA-маніпулятора, аналізу процесів позиціонування та подальшого вдосконалення алгоритмів керування робототехнічними системами.

ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі було досліджено та проаналізовано можливості використання програмного середовища MATLAB для моделювання та дослідження роботів-маніпуляторів. Основним результатом роботи стала розробка моделі SCARA-маніпулятора із застосуванням інструментів Simulink, Simscape Multibody та Robotics System Toolbox. Створена модель дозволяє відтворювати роботу маніпулятора, аналізувати його кінематичні характеристики та досліджувати процеси керування в умовах комп'ютерного моделювання.

У ході виконання роботи було реалізовано механічну модель маніпулятора з кінематичною структурою типу R–R–P. Для всіх елементів конструкції задано геометричні та масо-інерційні характеристики.

Практична цінність виконаної роботи полягає в тому, що створена модель може бути використана для дослідження та вдосконалення роботизованих систем без необхідності виготовлення фізичного прототипу. Зокрема, використання MATLAB дозволяє:

1. Виконувати моделювання руху SCARA-маніпулятора в межах заданої робочої зони та аналізувати його кінематичні параметри.
2. Розробляти та тестувати системи автоматичного керування на основі ПІД-регуляторів.
3. Налаштовувати та тестувати системи автоматичного керування без необхідності створення фізичного прототипу.
4. Аналізувати траєкторії руху кінцевого ефектора та оцінювати точність виконання технологічних операцій.
5. Скорочувати витрати часу та ресурсів на етапах проектування, налагодження та випробування робототехнічних систем.

Результати проведеного моделювання підтвердили працездатність створеної роботизованої системи та коректність реалізованих алгоритмів. Аналіз графіків координат і тривимірної візуалізації руху показав, що маніпулятор

забезпечує точне позиціонування виконавчого органу та відпрацьовує задані режими роботи.

Отже, результати проведеного дослідження свідчать про ефективність використання інструментів MATLAB для проєктування та аналізу роботів-маніпуляторів. Розроблена модель може бути використана як основа для подальшого вдосконалення алгоритмів керування, оптимізації траєкторій руху та створення реального прототипу SCARA-маніпулятора для виконання задач автоматизованого сортування та переміщення об'єктів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герон Александрійський. Пневматичні машини : [Електронний ресурс] / Герон Александрійський. – URL: <https://web.archive.org/web/20101206213657/http://www.history.rochester.edu/steam/hero/treatise.html> (дата звернення: 20.05.2026).
2. Leonardo's robot : [Електронний ресурс] / Wikipedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo%27s_robot (дата звернення: 20.05.2026).
3. Čapek K. R.U.R. (Rossum's Universal Robots) : [Електронний ресурс] / Karel Čapek. – URL: <https://www.gutenberg.org/ebooks/59112> (дата звернення: 20.05.2026).
4. Devol G. Programmed Article Transfer : U.S. Patent № 2 988 237, 1954.
5. Engelberger J. Unimate : [Електронний ресурс] / Joseph Engelberger. – URL: <https://www.automate.org/robotics/engelberger/joseph-engelberger-unimate> (дата звернення: 20.05.2026).
6. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics : Modelling, Planning and Control. – London : Springer, 2009.
7. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. – Cham : Springer, 2016.
8. Робототехнічні комплекси в гнучких виробничих системах: лекція 6 / ВНТУ. – 2019. – [Електронний ресурс]: <https://studfile.net/preview/9168017/page:21/> (дата звернення: 17.04.2026)
9. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2020.
10. MathWorks. Simulink – Simulation and Model-Based Design : [Електронний ресурс] / MathWorks. – URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (дата звернення: 17.04.2026).
11. Zeglin G. Uniroo: a one legged dynamic hopping robot : [Електронний ресурс] / G. Zeglin. – URL:

<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/13052/26223168-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (дата звернення: 17.04.2026).

12. Feng S., Xinjilefu X., Atkeson C. G., Kim J. Optimization based controller design and implementation for the Atlas robot in the DARPA Robotics Challenge Finals : [Електронний ресурс] / S. Feng, X. Xinjilefu, C. G. Atkeson, J. Kim. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7363480> (дата звернення: 17.04.2026).

13. Du C., Lee K.-H., Newman W. Manipulation planning for the Atlas humanoid robot : [Електронний ресурс] / C. Du, K.-H. Lee, W. Newman. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7090482> (дата звернення: 17.04.2026).

14. International Federation of Robotics. World Robotics 2023: Industrial Robots [Електронний ресурс] / IFR Statistical Department. – Frankfurt : International Federation of Robotics, 2023. – URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-553052-industrial-robots-installed-globally> (дата звернення: 17.04.2026).

15. XCLEA H30 Plus Smart Robot Vacuum and Mop Cleaner [Електронний ресурс] : [інструкція з експлуатації] / Xiaomi Corporation. – 2021. – URL: <https://manuals.plus/xclea/2c601ruw-smart-robot-vacuum-and-mop-cleaner-h30-plus-white-manual> (дата звернення: 22.04.2026).

16. Lanfranco A. R. Robotic-assisted surgery / A. R. Lanfranco, A. E. Castellanos, J. P. Desai, A. E. Castellanos // Current Opinion in Orthopaedics. – 2004. – Vol. 15, № 4. – P. 292–298.

17. Diftler M. A. Robonaut 2: The first humanoid robot in space / M. A. Diftler, J. S. Mehling, M. E. Abdallah // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Shanghai : IEEE, 2011. – P. 2178–2183.

18. Saker Scout [Електронний ресурс] // Defense Express. – 2023. – URL: <https://defence-ua.com/> (дата звернення: 22.04.2026).

19. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. – London: Springer, 2009

20. MathWorks. Simscape Multibody User's Guide [Електронний ресурс] / The MathWorks, Inc. – 2024. URL:

<https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ug/> (дата звернення: 22.04.2026).

21. Robot Manipulator [Електронний ресурс] / Wevolver. – URL: <https://www.wevolver.com/article/robot-manipulator> (дата звернення: 22.04.2026).

22. Robôs Manipuladores Industriais [Електронний ресурс] // Automação e Robótica. – 2012. – URL: <https://automacaoerobotica.blogspot.com/2012/07/11-robos-manipuladores-industriais.html> (дата звернення: 22.04.2026).

23. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control [Електронний ресурс] / John J. Craig. – 4th ed. – Pearson, 2017. – P. 5 – URL: <https://marsuniversity.github.io/ece387/Introduction-to-Robotics-Craig.pdf> (дата звернення: 23.04.2026).

24. Yaskawa. Industrial Robots with Vacuum End-Effectors [Електронний ресурс] / Yaskawa Electric Corporation. – 2024. – URL: <https://www.motoman.com/en-us/products/peripherals/equipment-and-accessory> (дата звернення: 22.04.2026).

25. Robot FEEDBOT C-300 for CNC processing centers [Електронний ресурс] / HOMAG GmbH. – 2024. – URL: <https://www.homag.com/en/product-detail/machines/automation/robot-solutions-for-the-furniture-industry/robot-management-feedbot-on-cnc-processing-centers> (дата звернення: 22.04.2026).

26. MeArm Open Source Robot Arm [Електронний ресурс] / Phenoptix. – URL: <https://shop.mearm.com/collections/mearm> (дата звернення: 22.04.2026).

27. 3D Printed Robotic Arm [Електронний ресурс] / Instructables. – URL: <https://www.instructables.com/3D-Printed-Robot-Arm/> (дата звернення: 25.04.2026).

28. ROS: Robot Operating System [Електронний ресурс] / Open Source Robotics Foundation. – URL: <https://www.ros.org/> (дата звернення: 25.04.2026)

29. Gazebo: A Powerful Robotics Simulation Tool [Електронний ресурс] / Open Robotics. – 2024. – URL: <https://gazebo.org/home> (дата звернення: 15.04.2026).

30. CoppeliaSim (formerly V-REP): Virtual Robot Experimentation

Platform [Електронний ресурс] / Coppelia Robotics AG. – 2024. URL: <https://www.coppeliarobotics.com/> (дата звернення: 15.04.2026).

31. Webots: Professional Mobile Robot Simulation [Електронний ресурс] / Cyberbotics S.A. – URL: <https://cyberbotics.com/> (дата звернення: 15.04.2026).

32. Unity Robotics Hub [Електронний ресурс] / Unity Technologies. – 2024. – URL: <https://github.com/Unity-Technologies/Unity-Robotics-Hub> (дата звернення: 02.05.2026).

33. MathWorks. Simscape Multibody User's Guide [Електронний ресурс] / The MathWorks, Inc. – 2024. – URL: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sm/ug/> (дата звернення: 02.05.2026).

34. MathWorks. Robotics System Toolbox. Design, simulate, test, and deploy robotics applications : [Електронний ресурс] / MathWorks. – URL: <https://www.mathworks.com/products/robotics.html> (дата звернення: 02.05.2026).

35. Гераїмчук М. Й., Лазарєв Ю. Ф., Толочко Т. В. Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK [Електронний ресурс]– URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a2900f2d-de83-4943-b031-b3fa6f8e7c5b/content> (дата звернення: 02.04.2026).

36. Mobile Robot Planning [Електронний ресурс] // MathWorks. – 2024. – URL: https://www.mathworks.com/help/robotics/mobile-robot-planning.html?s_tid=ai_sources_2_Mobile+Robot+Algorithms (дата звернення: 24.05.2026).

37. Михайлов Є. П. Дослідження переміщення маніпулятора за допомогою апаратних та комп'ютерних моделей / Є. П. Михайлов, А. В. Серединський // Інформатика. Культура. Техніка. – 2025. – Том 2. – С. 478–484. – URL: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.72> (дата звернення: 24.05.2026).

38. ECE470 Introduction to Robotics: Lecture 11-2 [Електронний ресурс] / University of Illinois at Urbana-Champaign. – 2021. – URL: <https://publish.illinois.edu/ece470-intro-robotics/files/2021/10/ECE470Lec11-2.pdf> – (дата звернення: 03.06.2026).

39. MathWorks. Simscape Product Family Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> – (дата звернения: 03.06.2026).

40. MathWorks. Simscape Multibod [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape-multibody.html>. – Дата звернения: 08.06.2026.

41. MathWorks. ssc_new (To be removed) Create new Simscape model populated by required and commonly used blocks [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/ssc_new.html. – Дата звернения: 06.06.2026