

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

20.06.2024



Шкігін Д.О.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
Кафедра _____ КІТАР
Рівень вищої освіти _____ перший(бакалаврський)
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми _____ Освітньо-професійна
Освітня програма _____ Системна інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри _____
(підпис)

«__» _____ 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові _____ Шкітіну Дмитру Олександровичу
(шифр і назва)

1. Тема роботи: Моделювання триланкового маніпулятора типової модульної конструкції з механічними шарнірами

Затверджена наказом університету від _____ 03.06.2024 р. №545 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 25.06.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Дані для моделювання: точність обчислення кутів і координат; обмеження на кути повороту; маса кожної ланки повинна бути точно визначена для коректного розрахунку кінетичної енергії; 3.2 При реалізації графічного інтерфейсу слід забезпечити зручність користування, щоб користувач міг легко змінювати кути та одразу бачити результати на графіку; 3.3 Використання мови програмування Python

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Огляд типів маніпуляторів та їх застосування; 4.3 Аналіз типових модульних конструкцій маніпуляторів; 4.4 Аналіз конструкції та принцип роботи механічних шарнірів; 4.5 Аналіз кінематики та динаміки маніпуляторів; 4.6 Розробка кінематичної схеми маніпулятора; 4.7 Розрахунок динамічної моделі маніпулятора; 4.8 Розрахунок кінематики прямого завдання; 4.9 Вибір середовища програмування та інструментів; 4.10 Розробка алгоритмів управління маніпулятором; 4.11 Розробка функцій розрахунку кінетичної енергії; 4.12 Розробка функцій обчислення координат за кутами; 4.13 Розробка інтерфейсу користувача та візуалізація моделі; 4.14 Моделювання триланкового маніпулятора; 4.15 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4 –15 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд типів маніпуляторів та їх застосування	18.04.2024-20.04.2024	виконано
2	Аналіз типових модульних конструкцій маніпуляторів	21.04.2024-24.04.2024	виконано
3	Аналіз конструкції та принцип роботи механічних шарнірів	25.04.2024-29.04.2024	виконано
4	Аналіз кінематики та динаміки маніпуляторів	30.04.2024-01.05.2024	виконано
5	Розробка кінематичної схеми маніпулятора	02.05.2024-05.05.2024	виконано
6	Розрахунок динамічної моделі маніпулятора	06.05.2024-08.05.2024	виконано
7	Розрахунок кінематики прямого завдання	09.05.2024-12.05.2024	виконано
8	Вибір середовища програмування та інструментів	13.05.2024-14.05.2024	виконано
9	Розробка алгоритмів управління маніп.	15.05.2024-17.05.2024	виконано
10	Розробка функцій розрахунку кінетичної енергії	18.05.2024-22.05.2024	виконано
11	Розробка функцій обчислення координат	23.05.2024-26.05.2024	виконано
12	Розробка інтерфейсу користувача	27.05.2024-02.06.2024	виконано
13	Моделювання триланкового маніпулятора	03.06.2024-07.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 3 червня 2024р.

Студент

(підпис)

Шкітін Д.О.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Демська Н.П.

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 63 с., 4 табл., 4 рис., 2 дод., 16 джерел.

МАНІПУЛЯТОР, ПРИНЦИП РОБОТИ МАНІПУЛЯТОРА, МЕХАНІЧНИЙ ШАРНІР, КІНЕМАТИКА МАНІПУЛЯТОРА, ДИНАМІКА МАНІПУЛЯТОРА, КІНЕМАТИЧНА СХЕМА, МОДЕЛЮВАННЯ ТРИЛАНКОВОГО МАНІПУЛЯТОРА, АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ.

Мета роботи – розробка інтерфейсу користувача програмного засобу розрахунку кінетичної енергії та обчислення координат за кутами триланкового маніпулятора.

Об’єкт розробки – кінетика та динаміка механічних шарнірів маніпуляторів.

Предмет розробки – методи та алгоритми візуалізації моделі моделювання триланкового маніпулятора.

В даній кваліфікаційній роботі проведено огляд типів маніпуляторів та їх застосування. Проаналізовано типові модульні конструкції маніпуляторів, конструкції та принцип роботи механічних шарнірів та кінематику та динаміку маніпуляторів.

Наступним етапом роботи була розробка кінематичної схеми маніпулятора. Далі було проведено розрахунок динамічної моделі маніпулятора та кінематики прямого завдання.

Після проведено вибір середовища програмування та інструментів, розроблено алгоритми управління маніпулятором. Далі було розроблено функції розрахунку кінетичної енергії та обчислення координат за кутами. Заключними етапами роботи була розробка інтерфейсу користувача та візуалізація моделі, моделювання триланкового маніпулятора.

ABSTRACT

Explanatory note: 63 pages, 4 tables, 4 figures, 2 app, 16 sources.

MANIPULATOR, PRINCIPLE OF MANIPULATOR WORK, MECHANICAL HINGE, KINEMATICS OF MANIPULATOR, DYNAMICS OF MANIPULATOR, KINEMATIC SCHEME, SIMULATION OF THREE-LINK MANIPULATOR, MANIPULATOR CONTROL ALGORITHM.

The purpose of the work is to develop a three-dimensional model of a three-link manipulator of a typical modular design with mechanical hinges.

The object of development is a manipulator.

The subject of development is methods and algorithms for creating a three-dimensional model of a manipulator using mechanical hinges. In this qualification work, an overview of the types of manipulators and their application was carried out. Typical modular designs of manipulators, designs and principle of operation of mechanical hinges, and kinematics and dynamics of manipulators are analyzed.

The next stage of the work was the development of the kinematic scheme of the manipulator. Next, the dynamic model of the manipulator and the kinematics of the direct task were calculated.

After the programming environment and tools were selected, manipulator control algorithms were developed. Next, functions for calculating kinetic energy and calculating coordinates by angles were developed. The final stages of the work were the development of the user interface and visualization of the model, modeling of the three-link manipulator.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ	9
1 Аналіз модульних конструкцій маніпуляторів та їх кінематики та динаміки	11
1.1 Огляд типів маніпуляторів та їх застосування	11
1.2 Аналіз типових модульних конструкцій маніпуляторів	12
1.3 Аналіз конструкції та принцип роботи механічних шарнірів	14
1.4 Аналіз кінематики та динаміки маніпуляторів	17
2 Розробка кінематичної схеми маніпулятора та розрахунки моделі переміщення	21
2.1 Розробка кінематичної схеми маніпулятора	21
2.2 Розрахунок динамічної моделі маніпулятора	24
2.3 Розрахунок кінематики прямого завдання	29
3 Розробка програми для моделювання керуванням маніпулятором	32
3.1 Вибір середовища програмування та інструментів	32
3.2 Розробка алгоритмів управління маніпулятором	33
3.3 Розробка функцій розрахунку кінетичної енергії	36
3.4 Розробка функцій обчислення координат за кутами	38
3.5 Розробка інтерфейсу користувача та візуалізація моделі	40
3.6 Моделювання триланкового маніпулятора	45
3.7 Охорона праці	49
Висновки	51
Перелік джерел посилання	52
Додаток А Код програми	55
Додаток Б Демонстраційний матеріал	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

DH – Денавіта-Хартенберга;

DOF – ступені свободи;

GUI – графічний інтерфейс користувача;

НМІ – людино-машинний інтерфейс.

ВСТУП

Моделювання триланкового маніпулятора типової модульної конструкції з механічними шарнірами є важливою задачею в сучасній інженерії та робототехніці. Цей тип маніпуляторів знаходить широке застосування в промисловості, медицині, автоматизації виробничих процесів та інших сферах. Актуальність такого моделювання полягає в тому, що воно дозволяє вирішувати ряд важливих завдань: від оптимізації конструкції та вибору оптимальних параметрів до аналізу кінематики та динаміки руху.

Моделювання такого маніпулятора дозволяє інженерам та дослідникам вивчати різноманітні сценарії роботи та взаємодії з оточуючим середовищем. Зокрема, воно може використовуватися для прогнозування руху робота при виконанні конкретних завдань, визначення оптимальних траєкторій та уникнення перешкод. Крім того, моделювання дозволяє вдосконалювати механізми керування маніпулятором, враховуючи різноманітні умови та обмеження.

Загалом, моделювання триланкового маніпулятора є ключовим етапом в розробці та вдосконаленні робототехнічних систем. Воно дозволяє ефективно вирішувати складні завдання та робити кроки до подальшого автоматизованого та ефективного виробництва, що робить його актуальним і перспективним напрямком досліджень.

Мета роботи – розробка інтерфейсу користувача програмного засобу розрахунку кінетичної енергії та обчислення координат за кутами триланкового маніпулятора.

Об'єкт розробки – кінетика та динаміка механічних шарнірів маніпуляторів.

Предмет розробки – методи та алгоритми візуалізації моделі моделювання триланкового маніпулятора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести огляд типів маніпуляторів та їх застосування;
- провести аналіз типових модульних конструкцій маніпуляторів;
- провести аналіз конструкції та принцип роботи механічних шарнірів;
- провести аналіз кінематики та динаміки маніпуляторів;
- розробити кінематичну схему маніпулятора;
- провести розрахунок динамічної моделі маніпулятора;
- провести розрахунок кінематики прямого завдання;
- провести вибір середовища програмування та інструментів;
- розробити алгоритми управління маніпулятором;
- розробити функції розрахунку кінетичної енергії;
- розробити функції обчислення координат за кутами;
- розробити інтерфейс користувача та візуалізацію моделі;
- провести моделювання триланкового маніпулятора.

Дана кваліфікаційна робота була виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], а також, керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3].

1 АНАЛІЗ МОДУЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ МАНІПУЛЯТОРІВ ТА ЇХ КІНЕМАТИКИ ТА ДИНАМІКИ

1.1 Огляд типів маніпуляторів та їх застосування

Маніпулятори є різновидом робототехнічних систем, призначених для виконання різних завдань, які потребують точного і контрольованого руху. Вони знаходять широке застосування в багатьох галузях, від промисловості до медицини, завдяки своїм можливостям автоматизувати процеси та підвищувати ефективність виробництва. Розглянемо основні типи маніпуляторів та сфери їх застосування [4].

Промислові маніпулятори – це роботизовані руки, які використовуються в автоматизованих виробничих процесах. Вони можуть бути різних конструкцій і мати різну кількість ступенів свободи (DOF). Каркасні маніпулятори мають структуру, схожу на людську руку, з плечем, ліктем та зап'ястям. Вони зазвичай мають 6 DOF, що дозволяє їм виконувати складні маніпуляції. Використовуються для зварювання, фарбування, монтажу та інших завдань [4]. SCARA маніпулятори мають селективну комплансну конструкцію з кількома обертальними і лінійними ступенями свободи. Ідеальні для завдань, які вимагають точного переміщення по горизонтальній площині, таких як складання та пакування. Дельта маніпулятори складаються з паралельних ланок, що забезпечує високу швидкість і точність. Застосовуються у швидкісному збиранні та пакуванні легких предметів [4].

Мобільні маніпулятори поєднують маніпулятор з мобільною платформою, що дозволяє їм переміщатися в просторі. Автономні роботизовані платформи використовуються в логістиці для транспортування вантажів всередині складів та заводів, а роботи для роботи в небезпечних

умовах застосовуються в зонах з високим рівнем радіації, в хімічно небезпечних середовищах, або в місцях аварій, де присутність людини небезпечна [4].

Наступними, є медичні маніпулятори, розроблені для проведення точних і делікатних медичних процедур. Прикладом є система Da Vinci, яка дозволяє хірургу проводити операції з мінімальною інвазивністю, забезпечуючи високу точність рухів і знижуючи ризики для пацієнта. Також використовуються реабілітаційні роботи для допомоги пацієнтам у відновленні рухових функцій після травм або операцій [4].

Наукові маніпулятори застосовуються в дослідженнях та експериментах, де потрібна висока точність і повторюваність. Прикладами таких маніпуляторів є маніпулятори для роботи в умовах мікрогравітації, які використовуються на космічних станціях для проведення експериментів і виконання технічних робіт чи маніпулятори для роботи з небезпечними речовинами, які застосовуються в лабораторіях для маніпуляцій з радіоактивними або токсичними матеріалами [5].

Маніпулятори є ключовими компонентами сучасних автоматизованих систем. Їх різноманітність і спеціалізація дозволяє виконувати широкий спектр завдань у різних галузях, підвищуючи продуктивність і безпеку. Розуміння різних типів маніпуляторів та їх застосування є важливим для вибору відповідної системи для конкретних завдань, що стоять перед інженерами та технологами [5].

1.2 Аналіз типових модульних конструкцій маніпуляторів

Модульність у конструкції маніпуляторів дозволяє значно спростити процес розробки, налаштування та обслуговування робототехнічних систем. Модульна конструкція полягає в тому, що маніпулятор складається з окремих, взаємозамінних модулів, кожен з яких виконує певну функцію. Цей

підхід дозволяє легко адаптувати маніпулятор під конкретні завдання, змінюючи лише окремі модулі, а не всю систему в цілому. До основних переваг модульності відносяться гнучкість, масштабованість та зручність технічного обслуговування [6].

Типова модульна конструкція маніпулятора складається з базового блоку, сегментів ланок, шарнірних з'єднань і робочих інструментів. Базовий блок є основою системи і може включати в себе двигуни, контролери та інші елементи управління. Сегменти ланок з'єднуються між собою через шарніри, які можуть бути обертальними або лінійними. Кінцеві ефектори, або робочі інструменти, встановлюються на кінцевій ланці і можуть бути легко замінені для виконання різних завдань, таких як зварювання, складання або маніпуляція об'єктами [6].

Важливим аспектом при проектуванні модульних маніпуляторів є вибір матеріалів та конструкційних елементів. Сучасні маніпулятори виготовляються з легких і міцних матеріалів, таких як алюмінієві сплави, композити та спеціальні сталі. Використання високоякісних матеріалів забезпечує високу міцність і довговічність конструкції, а також зменшує вагу системи, що є критичним для мобільних маніпуляторів та роботів, що працюють у просторі або в умовах мікрогравітації [7].

Модульні маніпулятори оснащені електричними та механічними компонентами, які забезпечують їхню функціональність. Сюди входять електродвигуни, редуктори, датчики положення і сили, а також системи управління. Електродвигуни можуть бути різних типів, включаючи крокові двигуни, серводвигуни та безщіткові двигуни постійного струму, які забезпечують високу точність і контроль руху. Системи управління використовують алгоритми зворотного зв'язку для забезпечення точності та стабільності роботи маніпулятора [7].

Програмне забезпечення відіграє ключову роль у роботі модульних маніпуляторів. Воно включає в себе системи управління рухом, інтерфейси

для взаємодії з користувачем, а також алгоритми планування та оптимізації траєкторій. Сучасні системи управління використовують передові методи, такі як штучний інтелект і машинне навчання, для покращення продуктивності та адаптивності маніпуляторів. Програмне забезпечення також дозволяє легко налаштовувати та оновлювати систему, додаючи нові функції та вдосконалюючи існуючі [8].

Розвиток модульних маніпуляторів продовжується з акцентом на підвищення їхньої продуктивності, гнучкості та інтеграції з іншими технологіями. Однією з перспективних напрямків є створення автономних маніпуляторів, здатних самостійно адаптуватися до змінних умов і виконувати складні завдання без участі людини. Іншим напрямком є інтеграція маніпуляторів з мережевими та хмарними технологіями для забезпечення дистанційного управління і моніторингу. Важливою областю є також розробка нових матеріалів та компонентів, які підвищують ефективність і надійність маніпуляторів [8].

1.3 Аналіз конструкції та принцип роботи механічних шарнірів

Механічні шарніри є ключовими компонентами в конструкції маніпуляторів, забезпечуючи рухливість і гнучкість системи. Вони дозволяють окремим частинам маніпулятора повертатися або згинатися відносно одна одної, забезпечуючи необхідні ступені свободи для виконання різноманітних завдань. Шарніри можуть бути різних типів, залежно від їхньої конструкції та функціонального призначення [9].

Існує кілька основних типів механічних шарнірів, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування, порівняльний аналіз яких, представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз основних типів механічних шарнірів

Тип шарніра	DOF	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Циліндричний	1	Обертання навколо однієї осі	Проста конструкція, низька вартість	Обмежена гнучкість руху
Сферичний	3	Обертання навколо трьох взаємно перпендикулярних осей	Висока гнучкість, можливість комплексних маніпуляцій	Складніша конструкція, вища вартість
Плоский	1	Ковзання по площині	Простота виготовлення, висока стабільність	Обмежений тип руху
Поворотний	2	Обертання навколо двох осей	Забезпечує обертання та нахил, середня складність	Обмежена гнучкість порівняно зі сферичним
Шарнір з кульковими підшипниками	1-2	Обертання з використанням кулькових підшипників	Низьке тертя, висока точність	Висока вартість, потребує регулярного обслуговування
Лінійний	1	Прямолінійне переміщення	Висока точність і стабільність лінійного руху	Не підходить для обертальних рухів

Конструкція механічного шарніра зазвичай складається з двох основних частин: вала та підшипника. Вал може обертатися всередині підшипника, забезпечуючи обертальний рух. Підшипники можуть бути ковзаючими або коченнями, залежно від вимог до навантаження та тертя. Кочення підшипники (наприклад, кулькові або роликові) використовуються для зменшення тертя і забезпечення більш плавного руху [9].

Принцип роботи механічних шарнірів базується на перетворенні руху. Коли до валу прикладається момент сили, він починає обертатися всередині підшипника. Цей обертальний рух передається до ланок маніпулятора, забезпечуючи необхідне переміщення. У випадку сферичних шарнірів, обертання може відбуватися одночасно навколо декількох осей, що дозволяє виконувати складні маніпуляції [10].

Механічні шарніри повинні бути здатні витримувати значні навантаження, які можуть виникати під час роботи маніпулятора. Це можуть бути як статичні навантаження від ваги ланок і об'єктів, так і динамічні навантаження, що виникають при прискореннях і гальмуваннях. Тому при їхньому проектуванні враховуються матеріали високої міцності, а також проводиться детальний аналіз можливих навантажень.

Для забезпечення тривалої та надійної роботи механічні шарніри потребують регулярного технічного обслуговування. Це включає в себе змазування підшипників для зменшення тертя, перевірку зношеності компонентів та їх своєчасну заміну. Також важливою є захист шарнірів від потрапляння пилу, бруду та інших забруднень, що може призвести до їхнього швидкого зношування [10].

Сучасні дослідження в галузі механічних шарнірів спрямовані на підвищення їхньої ефективності та надійності. Нові матеріали, такі як композити та сплави з пам'яттю форми, дозволяють створювати більш легкі та міцні конструкції. Крім того, розвиток технологій 3D-друку відкриває нові можливості для виготовлення складних форм шарнірів з високою точністю.

Іншим перспективним напрямком є інтеграція сенсорних систем, які дозволяють відстежувати стан шарнірів у реальному часі і попереджати про можливі проблеми [11].

1.4 Аналіз кінематики та динаміки маніпуляторів

Кінематика маніпуляторів стосується вивчення руху без урахування сил, що його викликають. Вона зосереджена на визначенні позиції, швидкості та прискорення ланок маніпулятора в різних точках часу. Основними завданнями кінематики є пряма та зворотна кінематика [12]. Пряма кінематика визначає положення та орієнтацію кінцевого ефектора маніпулятора на основі відомих значень кутів обертання шарнірів. Це дозволяє дізнатися, де саме в просторі знаходиться робочий інструмент при заданих положеннях ланок. Зворотна кінематика вирішує зворотну задачу – знаходить необхідні кути обертання шарнірів для досягнення бажаного положення та орієнтації кінцевого ефектора. Ця задача зазвичай складніша, оскільки може мати кілька рішень або не мати їх взагалі, залежно від конфігурації маніпулятора [12].

Для аналізу кінематики маніпуляторів використовуються різні математичні методи, включаючи матриці трансформацій та методи чисельного аналізу. Матриці трансформацій використовуються для опису відносних положень і орієнтацій ланок маніпулятора. За допомогою матриць гомогенних перетворень можна компактно представляти складні комбінації обертань і трансляцій. Денавіта-Хартенберга параметри є ще одним популярним методом для систематичного опису ланок і шарнірів маніпулятора [12]. ДН параметри включають довжину ланки, кут повороту, зсув і кут нахилу, що дозволяє створювати модель кінематики маніпулятора у вигляді набору матриць [12].

Динаміка маніпуляторів досліджує сили та моменти, які впливають на рух маніпулятора, а також результативний рух під їхнім впливом. Ця область механіки розглядає як внутрішні сили, що виникають у зв'язках і шарнірах маніпулятора, так і зовнішні сили, включаючи гравітацію, тертя та інерційні ефекти. Основними задачами динаміки є визначення необхідних сил і моментів для здійснення заданого руху (зворотна динаміка) та прогнозування руху маніпулятора під впливом відомих сил (пряма динаміка). Для цього використовуються рівняння руху, які базуються на законах Ньютона або методах Лагранжа [12].

Рівняння Ейлера-Лагранжа є одним з основних інструментів у динаміці маніпуляторів. Вони дозволяють формулювати рівняння руху, враховуючи кінетичну та потенційну енергію системи. Цей підхід особливо корисний для складних багатоланкових систем, оскільки дозволяє зручно враховувати взаємодію між різними частинами маніпулятора. Рівняння Лагранжа забезпечують компактну форму представлення динамічних властивостей маніпулятора та допомагають у розробці систем управління, які забезпечують точність і стабільність руху [12].

Практичне застосування динаміки маніпуляторів включає моделювання та симуляцію, які дозволяють інженерам перевіряти поведінку маніпулятора в різних умовах. Це включає розрахунок навантажень на кожен ланку, оптимізацію конструкції для зниження ваги та підвищення міцності, а також розробку алгоритмів управління для забезпечення точного виконання завдань. Аналіз динаміки є критичним для створення ефективних робототехнічних систем, здатних виконувати складні операції в промисловості, медицині, космічних дослідженнях та інших галузях [13].

Математичні методи динаміки маніпуляторів зосереджуються на формулюванні та вирішенні рівнянь, що описують рух під впливом сил та моментів. Одним із найпоширеніших підходів є використання рівнянь Ейлера-Лагранжа, які базуються на принципі найменшої дії. Цей метод

дозволяє визначити рівняння руху через кінетичну та потенційну енергію системи. Рівняння Лагранжа забезпечують зручний спосіб врахування складних взаємодій між ланками маніпулятора, дозволяючи легко враховувати різні типи руху та зовнішніх сил [13].

Метод Ньютона-Ейлера є ще одним важливим підходом до аналізу динаміки маніпуляторів. Цей метод базується на другому законі Ньютона і дозволяє окремо розглядати трансляційні та обертальні рухи кожної ланки маніпулятора. Він використовує векторну алгебру для формулювання рівнянь руху і є особливо корисним для систем з великою кількістю ланок, де кожна ланка може розглядатися як окрема механічна система. Метод Ньютона-Ейлера дозволяє точно обчислити сили та моменти, що діють на кожну ланку, що важливо для забезпечення стійкості та точності маніпулятора.

Чисельні методи, такі як методи скінченних різниць та скінченних елементів, також широко використовуються в динаміці маніпуляторів. Вони дозволяють проводити детальні симуляції поведінки маніпулятора під впливом різних сил і моментів. Ці методи особливо корисні для аналізу складних систем, де аналітичні розв'язки можуть бути неможливими або надто складними. Чисельні симуляції допомагають інженерам перевіряти різні сценарії та оптимізувати конструкцію маніпулятора для підвищення його продуктивності та надійності [14].

Аналіз кінематики та динаміки маніпуляторів є ключовим етапом у розробці та оптимізації робототехнічних систем. Практичне застосування цього аналізу починається з моделювання кінематики, де інженери визначають положення та орієнтацію кожної ланки маніпулятора відносно його базової точки. Це дозволяє створити точну математичну модель, яка описує всі можливі рухи системи. Моделювання кінематики включає використання матриць трансформацій та параметрів Денавіта-Хартенберга для опису геометричних взаємозв'язків між ланками.

Для подальшого аналізу та симуляції використовується динаміка маніпуляторів, яка дозволяє враховувати сили та моменти, що діють на систему. Це особливо важливо для забезпечення точності та стабільності роботи маніпулятора під час виконання складних завдань. Вивчення динамічних властивостей маніпулятора допомагає визначити необхідні потужності приводів, оптимізувати масо-інерційні характеристики ланок та забезпечити безпечну експлуатацію. Практичний аналіз динаміки часто включає використання рівнянь Ейлера-Лагранжа або методу Ньютона-Ейлера для формулювання рівнянь руху [14].

Моделювання та симуляція кінематики і динаміки дозволяють інженерам проводити віртуальні експерименти, оцінювати продуктивність та виявляти потенційні проблеми на ранніх етапах розробки. Це значно знижує витрати на прототипування та випробування, оскільки більшість проблем можна виявити і усунути ще до виготовлення фізичного прототипу. Симуляції дозволяють тестувати маніпулятор у різних умовах і сценаріях, що допомагає визначити його поведінку під впливом різних навантажень та зовнішніх факторів [15].

Інтеграція кінематичного та динамічного аналізу з системами управління є ще одним важливим практичним аспектом. Результати аналізу використовуються для розробки алгоритмів управління, які забезпечують точне виконання завдань маніпулятором. Це включає адаптивні та прогнозовані системи управління, що враховують динамічні властивості системи і можуть автоматично коригувати рухи для досягнення максимальної точності і стабільності. Таким чином, практичний аналіз кінематики та динаміки є основою для створення ефективних, надійних і високопродуктивних робототехнічних систем [15].

2 РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ МАНІПУЛЯТОРА ТА РОЗРАХУНКИ МОДЕЛІ ПЕРЕМІЩЕННЯ

2.1 Розробка кінематичної схеми маніпулятора

Розробка кінематичної схеми маніпулятора є важливим етапом у вирішенні задачі моделювання триланкового маніпулятора типової модульної конструкції з механічними шарнірами, оскільки вона забезпечує основну структурну основу для аналізу і синтезу руху маніпулятора. Кінематична схема дозволяє визначити відносні положення та орієнтації всіх ланок маніпулятора, а також їх взаємодію через шарніри. Це є критично важливим для розробки математичної моделі, яка описує рухові властивості системи.

Кінематична схема допомагає зрозуміти, як переміщення однієї ланки впливає на загальну конфігурацію маніпулятора, що є основою для розв'язання прямої та оберненої кінематичних задач. Без правильної кінематичної схеми неможливо точно розрахувати положення та орієнтацію кінцевого ефектора маніпулятора у просторі, що є необхідним для виконання його основних функцій, таких як захоплення і переміщення об'єктів. Крім того, кінематична схема дозволяє ідентифікувати можливі кінематичні обмеження та особливості механічних шарнірів, що важливо для оптимізації конструкції та забезпечення стабільної та ефективної роботи маніпулятора. Таким чином, кінематична схема є фундаментальним елементом при моделюванні та проектуванні триланкового маніпулятора, забезпечуючи основу для подальших етапів розробки, включаючи динамічний аналіз і реалізацію управління. Відповідно до вимог технічного завдання з моделювання триланкового маніпулятора типової модульної конструкції, для встановлення його на мобільний робот. Виходячи з цього пропонується

представити триланковий маніпулятор у вигляді плоскої кінематичної схеми у Декартових координатах (x_0, y_0) , як показано на рисунку 2.1.

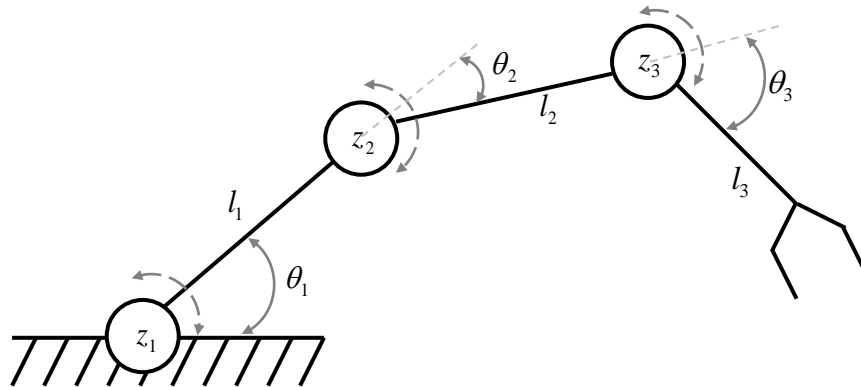


Рисунок 2.1 – Кінематика триланкового маніпулятора в системі Декартових координат (x_0, y_0)

Опишемо розроблену кінематичну схему триланкового маніпулятора в системі Декартових координат (x_0, y_0) . z_1, \dots, z_3 – ланка маніпулятора, l_1, l_2, l_3 – довжина плеча, відповідно до ланки, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – кут нахилу ланки (q_{\min}, q_{\max}) . Як можна бачити з розробленої кінематичної схеми триланкового маніпулятора в системі Декартових координат (x_0, y_0) для подальших розрахунків положення та орієнтації ланок маніпулятора, пропонується використовувати параметри Денавіта-Хартенберга (ДН-параметри) [12].

Параметри Денавіта-Хартенберга (ДН-параметри) використовуються для математичного опису положення та орієнтації ланок маніпулятора в робототехніці. Цей метод дозволяє визначити положення кінцевого ефектора (кінцевої точки маніпулятора) в просторі відносно базової координатної системи робота.

Основні параметри Денавіта-Хартенберга включають чотири параметри для кожної ланки маніпулятора:

l_i – довжина ланки: відстань між осями Z_{i-1} та Z_i вздовж осі X_i ;

α_i – кут скручування: кут між осями Z_{i-1} та Z_i , виміряний навколо осі X_i ;

d_i – зсув: відстань між осями X_{i-1} та X_i вздовж осі Z_{i-1} ;

θ_i – кут повороту: кут між осями X_{i-1} та X_i , виміряний навколо осі Z_{i-1} .

Відповідно до технічного завдання для триланкового маніпулятора з заданими довжинами ланок, параметри Денавіта-Хартенберга (ДН-параметри) можна визначити наступним чином. Припустимо, що всі ланки є обертальними (революційними суглобами), тобто маніпулятор складається з обертальних з'єднань. Згідно з ДН-нотацією, для кожної ланки визначаємо чотири параметри, які представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Опис ДН-параметри для триланкового маніпулятора

Ланка	Параметри
1	2
Перша ланка	$l_1 = 0$ (довжина ланки між осями Z_0 та Z_1 вздовж осі X_1); $\alpha_1 = 0$ (кут між осями Z_0 та Z_1 навколо осі X_1); $d_1 = 0$ (зсув вздовж осі Z_0 між осями X_0 та X_1); $\theta_1 = [\theta_{\min} = -170^\circ; \theta_{\max} = 170^\circ;]$ (змінний кут повороту)
Друга ланка	$l_2 = 30$ см (довжина першої ланки); $\alpha_2 = 0$ (кут між осями Z_1 та Z_2 навколо осі X_2); $d_2 = 0$ (зсув вздовж осі Z_1 між осями X_1 та X_2); $\theta_2 = [\theta_{\min} = -170^\circ; \theta_{\max} = 170^\circ;]$ (змінний кут повороту)
Третя ланка	$l_3 = 25$ (довжина другої ланки); $\alpha_3 = 0$ (кут між осями Z_2 та Z_3 навколо осі X_3); $d_1 = 0$ (зсув вздовж осі Z_2 між осями X_2 та X_3); $\theta_3 = [\theta_{\min} = -170^\circ; \theta_{\max} = 170^\circ;]$ (змінний кут повороту)

Продовження таблиці 2.1

1	2
Четверта ланка (кінцевий ефектор)	$l_4 = 25$ (довжина третьої ланки); $\alpha_4 = 0$ (кут між осями Z_3 та Z_4 навколо осі X_4); $d_4 = 0$ (зсув вздовж осі Z_3 між осями X_3 та X_4); θ_4 (змінний кут повороту)

2.2 Розрахунок динамічної моделі маніпулятора

Розрахунок динамічної моделі триланкового маніпулятора включає визначення рівнянь руху, які описують взаємодію між силами, моментами, положенням і швидкістю ланок маніпулятора. Найчастіше для цього використовується метод Лагранжа, який базується на кінетичній та потенціальній енергіях системи. Відповідно до технічного завдання маса кожної ланки ($m = 0.5$ кг), а довжина (l) кожної ланки приведена в таблиці 2.1.

Кінетична енергія кожної ланки включає в себе лінійну та обертальну кінетичну енергію, для ланок можна обчислити лінійну кінетичну енергію як:

$$T_{linear} = \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2), \quad (2.1)$$

де m_i – маса i -ї ланки;

$\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i$ – швидкість центру мас i – ланки.

Для обчислення швидкостей центрів мас кожної ланки, нам потрібні положення центрів мас, яку потрібно розрахувати для кожної ланки:

– для першої ланки, центр мас знаходиться на відстані $\frac{l_1}{2}$ від початку:

$$x_1 = \frac{l_1}{2} \cos(\theta_1), \quad (2.2)$$

$$y_1 = \frac{l_1}{2} \sin(\theta_1). \quad (2.3)$$

Швидкість центру мас першої ланки:

$$\dot{x}_1 = -\frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1), \quad (2.4)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1). \quad (2.5)$$

Кінетична енергія першої ланки розраховується з наступної формулою на базі (2.1):

$$T_1 = \frac{1}{2} m \left[\left(-\frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \right)^2 + \left(\frac{l_1}{2} \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \right)^2 \right]. \quad (2.6)$$

Проведемо перетворення (2.6) за рахунок відкриття дужок:

$$T_1 = \frac{1}{2} m \left(\frac{l_1^2}{2} \dot{\theta}_1^2 \sin^2(\theta_1) + \cos^2(\theta_1) \right) = \frac{1}{2} m \left(\frac{l_1^2}{4} \dot{\theta}_1^2 \right) = \frac{1}{8} m l_1^2 \dot{\theta}_1^2. \quad (2.7)$$

Для другої ланки положення центру мас, розраховується з наступної формулою:

$$x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + \frac{l_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2), \quad (2.8)$$

$$y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + \frac{l_2}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2).$$

Швидкість центру мас другої ланки:

$$\begin{aligned}\dot{x}_2 &= -l_1\dot{\theta}_1\sin(\theta_1) - \frac{l_2}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\sin(\theta_1 + \theta_2), \\ \dot{y}_2 &= -l_1\dot{\theta}_1\cos(\theta_1) + \frac{l_2}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\cos(\theta_1 + \theta_2).\end{aligned}\tag{2.9}$$

Кінетична енергія для другої ланки розраховується за (2.10):

$$T_2 = \frac{1}{2}m(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2).\tag{2.10}$$

– для другої ланки положення центру мас, розраховується за (2.11):

$$\begin{aligned}x_3 &= l_1\cos(\theta_1) + l_2\cos(\theta_1 + \theta_2) + \frac{l_3}{2}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), \\ y_3 &= l_1\sin(\theta_1) + l_2\sin(\theta_1 + \theta_2) + \frac{l_3}{2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3).\end{aligned}\tag{2.11}$$

Швидкість центру мас третьої ланки, буде розраховуватися за (2.12):

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= -l_1\dot{\theta}_1\sin(\theta_1) - l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\sin(\theta_1 + \theta_2) - \frac{l_3}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), \\ \dot{y}_3 &= l_1\dot{\theta}_1\cos(\theta_1) - l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\cos(\theta_1 + \theta_2) - \frac{l_3}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3).\end{aligned}\tag{2.12}$$

Кінетична енергія для третьої ланки розраховується за (2.13):

$$T_3 = \frac{1}{2}m(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2).\tag{2.13}$$

Повна кінетична енергія маніпулятора, дорівнює сумі кінетичних енергій усіх ланок:

$$T_{linear} = T_1 + T_2 + T_3, \quad (2.14)$$

Внаслідок чого формулі для розрахунку кінетичну енергію для кожної ланки буде наступні:

$$T_1 = \frac{1}{8} \cdot 1 \cdot (0.3)^2 \dot{\theta}_1^2 = \frac{1}{8} \cdot 0.09 \dot{\theta}_1^2 = 0.01125 \dot{\theta}_1^2,$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \left[(-0.3\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - 0.125(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2))^2 + (0.30\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + 0.125(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2))^2 \right],$$

$$T_3 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \left[(-0.3\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - 0.25(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) - 0.125(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))^2 \right].$$

Щоб виконати розрахунок кінетичної енергії для кожної ланки маніпулятора при заданих значеннях кутів θ_1 і θ_2 потрібно підставити ці значення у формули для швидкостей центрів мас ланок, а потім обчислити кінетичну енергію.

Оскільки у формулі кінетичної енергії ми також маємо кутові швидкості $\dot{\theta}_i$, припустимо, що $\dot{\theta}_1 = 1 \text{ рад/с}$, $\dot{\theta}_2 = 1 \text{ рад/с}$ та $\dot{\theta}_3 = 1 \text{ рад/с}$.

Відповідно до технічного завдання $l_1 = 0.3 \text{ м}$, $l_2 = 0.25 \text{ м}$, $l_3 = 0.25 \text{ м}$, $\theta_1 = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ рад}$, $\theta_2 = 60^\circ = \frac{\pi}{3} \text{ рад}$. Проведемо розрахунки відповідно (2.1)–(2.14), результати розрахунку представлені таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку центра мас, швидкість центру мас та кінетичну енергію

№ ланки	Тип розрахунку	Отриманні результати
Перша ланка	Центр мас першої ланки	$x_1 = 0.106м$ $y_1 = 0.106м$
	Швидкість центру мас	$\dot{x}_1 = -0.106м/с$ $\dot{y}_1 = 0.106м/с$
	Кінетична енергія	0,011236Дж
Друга ланка	Центр мас першої ланки	$x_2 = 0.07365м$ $y_2 = 0.22674м$
	Швидкість центру мас	$\dot{x}_2 = -0.3475м/с$ $\dot{y}_2 = 0.0413м/с$
	Кінетична енергія	0,06125Дж
Третя ланка	Центр мас першої ланки	$x_3 = 0.009м$ $y_3 = 0.46824м$
	Швидкість центру мас	$\dot{x}_3 = -0.9515м/с$ $\dot{y}_3 = -0.12м/с$
	Кінетична енергія	0,4599Дж

Сумарна кінетична енергія маніпулятора при $\theta_1 = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ рад}$,
 $\theta_2 = 60^\circ = \frac{\pi}{3} \text{ рад}$ складає:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = 0.011236 + 0.06125 + 0.4599 = 0.532386 \text{ Дж}$$

Під час розрахунку кінетичної енергії триланкового маніпулятора було враховано параметри його ланок та кутові швидкості руху. Для спрощення обчислень використано значення кутів θ_1 та θ_2 у градусах, а швидкості $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$ та $\dot{\theta}_3$ у радіанах за секунду були встановлені на 1. Результати показали, що кінетична енергія першої ланки складає близько 0,011236 Дж, другої ланки –

0,06125 Дж, а третьої ланки – 0,4599 Дж. Загальна кінетична енергія маніпулятора становить близько 0,532386 Дж. Ці результати вказують на те, що найбільший внесок у кінетичну енергію має третя ланка, оскільки вона має найбільшу масу та швидкість. Друга ланка також вносить значний внесок через свою швидкість, в той час як перша ланка має менший вплив через свої невеликі розміри. Такі результати є важливими для розрахунків динамічної моделі маніпулятора, адже вони дозволяють оцінити енергетичні витрати на його рух та визначити необхідні параметри для ефективного управління. Динамічна модель дозволить прогнозувати реакцію маніпулятора на зовнішні впливи та визначати оптимальні траєкторії руху з урахуванням енергетичних витрат.

Отже, розрахунки кінетичної енергії маніпулятора є важливим етапом у розробці його динамічної моделі та визначенні оптимального управління. Вони допомагають зрозуміти, як різні параметри впливають на енергетичні характеристики системи та дозволяють планувати оптимальні стратегії управління для досягнення бажаних результатів.

2.3 Розрахунок кінематики прямого завдання

Використання формул Денавіта-Хартенберга для розрахунку кінематики прямого завдання триланкового маніпулятора має кілька переваг. По-перше, ці формули дозволяють описати кінематику маніпулятора за допомогою простих математичних операцій, що спрощує розрахунки. Вони також є однозначними і зручними у використанні, дозволяючи точно визначити положення та орієнтацію кожної ланки маніпулятора в просторі. Крім того, формули Денавіта-Хартенберга універсальні і можуть бути використані для розрахунку кінематики різноманітних маніпуляторів, включаючи механізми з різним числом ланок та складною конфігурацією. Вони також дозволяють легко враховувати різні параметри маніпулятора,

такі як довжини ланок, кути нахилу тощо. Ще одна перевага цих формул – ефективність обчислень. Використання їх дозволяє швидко та ефективно обчислити положення кінця маніпулятора в просторі, що є важливим для реального часу управління робототехнічними системами.

Для розрахунку кінематики прямого завдання триланкового маніпулятора за допомогою параметрів Денавіта-Хартенберга використовуються наступні формули, матриця перетворення від $i-1$ -ої координатної системи до i -ої координатної системи:

$$A_i = R_{z_{i-1}}(\theta_i) \cdot T_{z_{i-1}}(d_i) \cdot T_{x_i}(a_i) \cdot R_{x_i}(\alpha_i), \quad (2.15)$$

де $R_{z_{i-1}}(\theta_i)$ – матриця повороту навколо вісі z_{i-1} на кут θ_i ;

$T_{z_{i-1}}(d_i)$ – матриця зсуву по вісі z_{i-1} на відстань d_i ;

$T_{x_i}(a_i)$ – матриця зсуву по вісі x_i на відстань a_i ;

$R_{x_i}(\alpha_i)$ – матриця повороту навколо вісі x_i на кут α_i .

Координати кінця маніпулятора в глобальній координатній системі обчислюються як добуток всіх матриць перетворення:

$$T = A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n, \quad (2.16)$$

де A_0 – це початкова позиція базової координатної системи;

A_n – кінцева координатна система останньої ланки.

Для розрахунку кінематики прямого завдання триланкового маніпулятора з використанням параметрів Денавіта-Хартенберга використаємо вже відомі значення довжин ланок і кутів нахилу, та отримаємо наступні матриці трансформації:

$$A_1 = R_z(\theta_1) \cdot T_z(l_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) - \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 10.3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = R_z(\theta_2) \cdot T_z(l_2) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) - \sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 10.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = R_z(\theta_3) \cdot T_z(l_3) = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \\ 0 & 0 & 10.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для знаходження кінцевої матриці A_3 , яка визначає положення кінця маніпулятора необхідно перемножимо матриці A_1, A_2, A_3 . Результати розрахунків для кінематики прямого завдання триланкового маніпулятора з використанням формул Денавіта-Хартенберга були отримані наступні:

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.3536 - 0.3536 & 0 \\ 0.3536 & 0.3536 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10.5528 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Отже, положення кінця маніпулятора в глобальній координатній системі отримані на базі розрахунків, має наступні координати $x = 0$, $y = 0$, $z = 0,5528$ метра.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРУВАННЯМ МАНІПУЛЯТОРОМ

3.1 Вибір середовища програмування та інструментів

Вибір середовища програмування та інструментів для розробки програми моделювання триланкового маніпулятора типового модульного конструкцій є важливим етапом, який визначає ефективність та зручність роботи розробника. Розглянемо кілька популярних середовищ розробки, таких як Python, C++ та MATLAB, і порівняємо їхні можливості.

Python є одним із найпоширеніших мов програмування для наукових досліджень та інженерії. Його основні переваги включають високу читабельність коду, велику кількість бібліотек для наукових розрахунків та візуалізації, таких як NumPy, SciPy та Matplotlib, а також інтеграцію з середовищами для моделювання та симуляції, такими як ROS (Robot Operating System). Завдяки цьому, Python дозволяє швидко розробляти прототипи та проводити експерименти з мінімальними витратами часу на написання коду. Крім того, Python має багатий набір інструментів для створення графічних інтерфейсів користувача, таких як Tkinter, PyQt або Kivy, що дозволяє розробляти зручні та інтуїтивно зрозумілі програми.

C++ є потужною мовою програмування, яка забезпечує високу продуктивність та ефективність коду. Вона широко використовується в робототехніці завдяки своїм можливостям роботи з апаратним забезпеченням та реального часу. Однак, складність синтаксису та потреба в ручному управлінні пам'яттю можуть ускладнити розробку та підтримку програм. Крім того, для роботи з графічними інтерфейсами та візуалізацією в C++ необхідно використовувати додаткові бібліотеки, такі як OpenGL або Qt, що може вимагати значних зусиль для інтеграції.

MATLAB є потужним інструментом для наукових розрахунків та моделювання, особливо популярним у академічних колах. Він має вбудовані функції для роботи з матрицями, графіками та симуляціями, що робить його зручним для швидкого прототипування та аналізу складних систем. Однак, MATLAB є комерційним програмним забезпеченням, що може бути дорогим для індивідуальних розробників або малих команд. Крім того, його продуктивність може поступатися C++ у випадках, коли потрібна висока швидкодія.

У підсумку, вибір мови програмування Python для моделювання триланкового маніпулятора є обґрунтованим завдяки його простоті у використанні, багатому набору бібліотек для наукових розрахунків та візуалізації, а також широким можливостям для створення графічних інтерфейсів. Python дозволяє розробникам зосередитися на алгоритмах та моделюванні, а не на низькорівневих деталях реалізації. Крім того, Python активно підтримується спільнотою розробників та науковців, що забезпечує постійний розвиток та оновлення інструментів. Таким чином, Python є оптимальним вибором для розробки програм моделювання маніпуляторів з точки зору простоти, функціональності та доступності.

3.2 Розробка алгоритмів управління маніпулятором

При розробці алгоритму моделювання триланкового маніпулятора необхідно враховувати кілька важливих особливостей. Перш за все, точність обчислення кутів і координат є критичною, оскільки навіть незначні помилки можуть призвести до значних відхилень у положенні захватного пристрою. Важливо також врахувати обмеження на кути повороту, щоб уникнути нереалістичних або фізично неможливих положень ланок. Маса кожної ланки повинна бути точно визначена для коректного розрахунку кінетичної енергії. При реалізації графічного інтерфейсу слід забезпечити зручність

користування, щоб користувач міг легко змінювати кути та одразу бачити результати на графіку. Крім того, необхідно враховувати обчислювальні ресурси, оскільки часте оновлення графіки і перерахунок параметрів може вимагати значної обчислювальної потужності. Важливо також передбачити можливість обробки помилок і аномалій, наприклад, при введенні некоректних даних або перевищенні допустимих меж кутів повороту. Розроблений алгоритм програми для моделювання роботи триланкового маніпулятора типової модульної конструкції, представлено на рис. 3.1.

Даний алгоритм починається з визначення параметрів, таких як довжина ланок та маси кожної з них, а також початкові кути повороту і вертикального підйому. Далі програма переходить до обчислення початкових координат захватного пристрою. Функція `calculate_coordinates` визначає положення захватного пристрою за новими кутами, а `calculate_kinetic_energy` обчислює кінетичну енергію кожної ланки.

Після цього викликається функція `update_plot`, яка оновлює графік маніпулятора в тривимірному просторі, використовуючи бібліотеку `matplotlib`. Коли користувач натискає на будь-яку з кнопок управління, викликається відповідна функція, що змінює кут повороту або вертикального підйому. Потім викликається функція `change_angles`, яка оновлює координати захватного пристрою, кінетичну енергію ланок та графічне відображення маніпулятора.

Користувач взаємодіє з програмою через графічний інтерфейс, який складається з кнопок для зміни кутів і міток для відображення поточних координат та кінетичної енергії. При кожній зміні кута викликаються функції для перерахунку нових координат і кінетичної енергії, а також для оновлення графіку. Відображення тривимірної моделі маніпулятора показує реальне положення кожної ланки у просторі, а мітки на інтерфейсі дають змогу бачити числові значення координат і енергії.

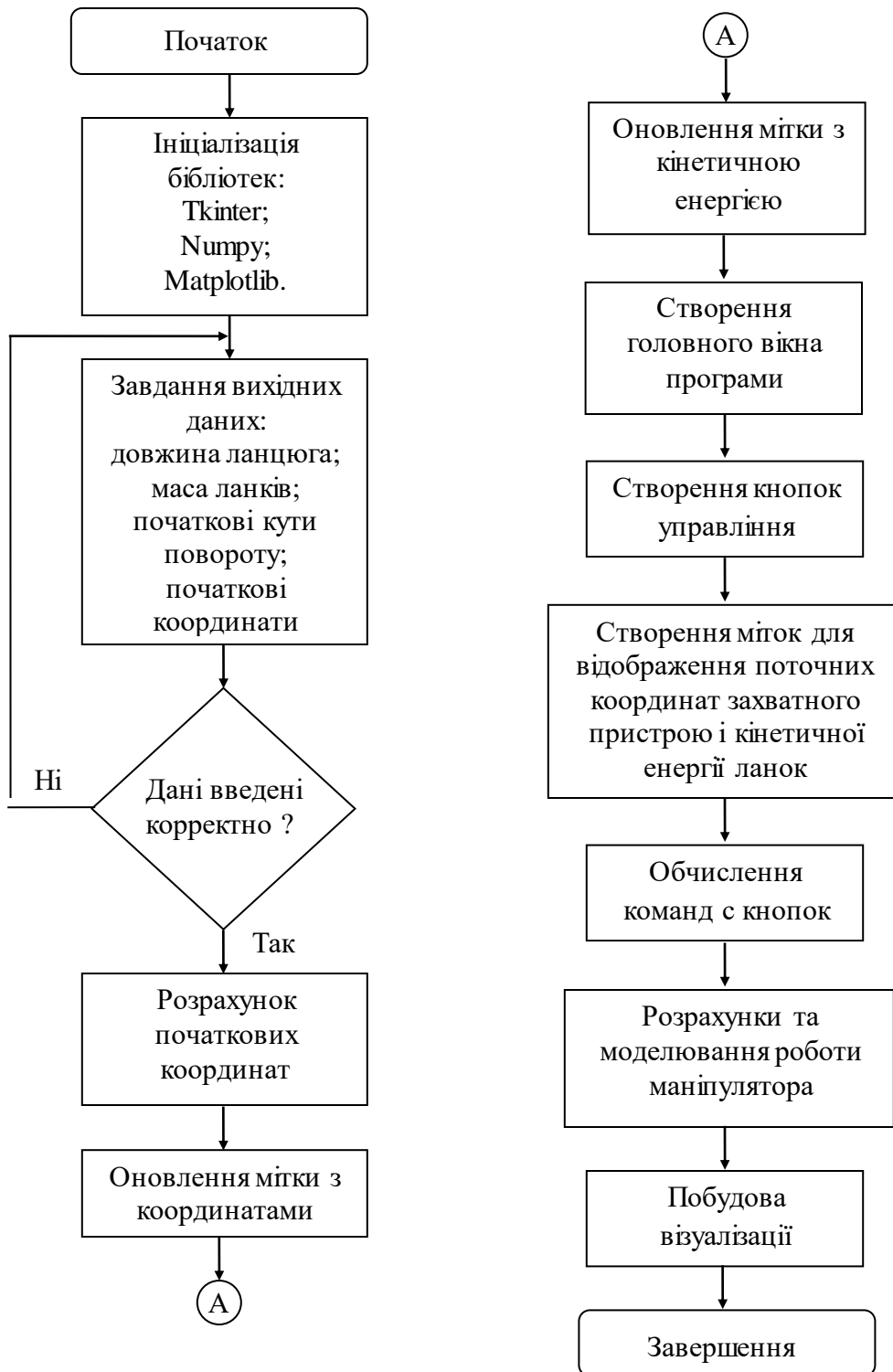


Рисунок 3.1 – Алгоритм програми для моделювання роботи триланкового маніпулятора типової модульної конструкції

Алгоритм забезпечує динамічне оновлення інформації в режимі реального часу, що дозволяє користувачеві миттєво бачити результати змін кутів повороту та вертикального підйому. Такий підхід дозволяє наочно

демонструвати роботу маніпулятора, його можливості та поведінку при різних налаштуваннях. У кінцевому рахунку, алгоритм забезпечує повну інтерактивність і гнучкість у моделюванні роботи триланкового маніпулятора з механічними шарнірами.

3.3 Розробка функцій розрахунку кінетичної енергії

Розробка функцій розрахунку кінетичної енергії для моделювання триланкового маніпулятора має свої особливості, які враховують кінематику та динаміку системи. Перше, що потрібно зробити, це визначити маси кожної ланки маніпулятора, оскільки кінетична енергія залежить від маси об'єкта. Далі, потрібно врахувати кутові швидкості обертання кожної ланки, які зазвичай задаються у градусах, але для обчислень їх необхідно перетворити в радіани. Формула для розрахунку кінетичної енергії включає лінійну швидкість, яка у випадку обертального руху ланок розраховується як добуток довжини ланки на кутову швидкість. Важливо також враховувати вплив обертання кожної ланки на кінетичну енергію всього маніпулятора, оскільки швидкість кожної наступної ланки залежить від попередньої. Використання `numpy` дозволяє спростувати обчислення завдяки вбудованим функціям для роботи з радіанами та векторними операціями. Кінетична енергія обчислюється окремо для кожної ланки та сумується для отримання повної кінетичної енергії системи. Нарешті, результати розрахунків інтегруються в графічний інтерфейс, що дозволяє користувачу бачити поточні значення кінетичної енергії в реальному часі. Це надає можливість не тільки моделювати поведінку маніпулятора, але й аналізувати його динамічні характеристики, що є ключовим для оптимізації та безпеки роботи системи.

Створімо функцію для розрахунку кінетичної енергії `def calculate_kinetic_energy()`. Спочатку функція перетворює кути повороту `theta1`, `theta2` і `theta3` з градусів в радіани, оскільки обчислення кутової

швидкості повинно бути виконано в радіанах для коректного обчислення кінетичної енергії.

```
omega1 = np.radians(theta1)
```

```
omega2 = np.radians(theta2)
```

```
omega3 = np.radians(theta3)
```

Далі функція обчислює кінетичну енергію для кожної ланки за формулою:

$$KE_i = \frac{1}{2}mv^2, \quad (3.1)$$

де m – маса ланки;

v – швидкість.

Оскільки ланки обертаються, лінійна швидкість v , обчислюється як добуток довжини ланки l на кутову швидкість ω . Для кожної ланки маніпулятора кінетична енергія обчислюється окремо. Програмна реалізацій розрахунку кінетичну енергію для кожної ланки, приведена нижче:

```
ke1 = 0.5 * m1 * (l1 * omega1)**2
```

```
ke2 = 0.5 * m2 * (l2 * omega2)**2
```

```
ke3 = 0.5 * m3 * (l3 * omega3)**2
```

Функція повертає кінетичну енергію кожної з трьох ланок у вигляді кортежу:

```
return ke1, ke2, ke3
```

Ця функція забезпечує точний розрахунок кінетичної енергії для кожної ланки маніпулятора з урахуванням їхньої маси, довжини та кутової

швидкості, що дозволяє інтегрувати ці значення в інтерфейс керування для відображення користувачеві.

3.4 Розробка функцій обчислення координат за кутами

Програмна реалізація функцій обчислення координат за новими кутами для триланкового маніпулятора вимагає врахування кінематичних рівнянь та особливостей обертального руху кожної ланки. Основною задачею є правильне обчислення позицій кінцевої точки кожної ланки відносно попередньої, використовуючи тригонометричні функції для врахування кутових змін. Кути задаються у градусах, але для обчислень їх потрібно перетворити у радіани, що спрощує роботу з тригонометричними функціями. Кожна наступна ланка додає свою довжину, обернуту на відповідний кут, до координат попередньої, що дозволяє отримати точну позицію кінцевої точки маніпулятора. Врахування вертикального підйому додатковим кутом дозволяє розраховувати координати в тривимірному просторі, що додає реалізму моделі. Використання бібліотеки `numpy` спрощує обчислення завдяки оптимізованим функціям для роботи з кутами та векторами. Інтерфейс програми динамічно оновлює координати, відображаючи поточну позицію захватного пристрою в реальному часі, що забезпечує наочність та зручність управління маніпулятором. Таким чином, правильне обчислення координат за новими кутами є ключовим для забезпечення точності та ефективності моделювання роботи маніпулятора.

Створимо функцію для обчислення координат за кутами `def calculate_coordinates()`.

Проведемо оголошення змінних `x`, `y`, `z` як глобальних у межах функції. Це дозволяє функції модифікувати ці змінні, які визначені поза межами цієї функції, тобто в глобальній області видимості програми, як переставлено нижче.

global x, y, z

Цей фрагмент коду обчислює координати кінцевої точки триланкового маніпулятора в тривимірному просторі (x, y, z) на основі довжин ланок і кутів повороту. Давайте розглянемо детальніше, як це працює:

$$\begin{aligned}
 x &= (l1 * \text{np.cos}(\text{np.radians}(\theta_1)) + \\
 &\quad l2 * \text{np.cos}(\text{np.radians}(\theta_1 + \theta_2)) + \\
 &\quad l3 * \text{np.cos}(\text{np.radians}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))) * \\
 &\quad \text{np.cos}(\text{np.radians}(\phi)) \\
 y &= (l1 * \text{np.sin}(\text{np.radians}(\theta_1)) + \\
 &\quad l2 * \text{np.sin}(\text{np.radians}(\theta_1 + \theta_2)) + \\
 &\quad l3 * \text{np.sin}(\text{np.radians}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))) * \\
 &\quad \text{np.cos}(\text{np.radians}(\phi)) \\
 z &= (l1 * \text{np.cos}(\text{np.radians}(\theta_1)) + \\
 &\quad l2 * \text{np.cos}(\text{np.radians}(\theta_1 + \theta_2)) + \\
 &\quad l3 * \text{np.cos}(\text{np.radians}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))) * \\
 &\quad \text{np.sin}(\text{np.radians}(\phi))
 \end{aligned}$$

Кожна ланка маніпулятора додає свою проекцію на вісь x, яка залежить від її довжини і кута повороту. Використовується косинус для обчислення горизонтальної проекції кожної ланки. Сумарна довжина всіх проекцій множиться на косинус кута ϕ , який визначає обертання навколо осі z. Аналогічно до обчислення x, кожна ланка додає свою вертикальну проекцію на вісь y. Використовується синус для обчислення вертикальної проекції. Сумарна довжина всіх проекцій також множиться на косинус кута ϕ . Координата z визначається як сума вертикальних проекцій ланок, помножених на синус кута ϕ . Це дозволяє врахувати підйом маніпулятора у тривимірному просторі.

Таким чином, цей фрагмент коду враховує всі необхідні компоненти для обчислення позиції кінцевої точки маніпулятора в тривимірному

просторі на основі заданих кутів повороту і довжин ланок. Це важливо для правильної візуалізації та управління маніпулятором.

3.5 Розробка інтерфейсу користувача та візуалізація моделі

Для реалізації НМІ (людино-машинного інтерфейсу) для моделювання триланкового маніпулятора на мові Python були обрані бібліотеки `matplotlib.pyplot` та `mpl_toolkits.mplot3d` через їх зручність і потужність у візуалізації даних. `matplotlib.pyplot` забезпечує широкий спектр функцій для створення 2D-графіків, що дозволяє легко створювати інтерактивні інтерфейси. Бібліотека `mpl_toolkits.mplot3d` розширює можливості `matplotlib` для роботи з тривимірними графіками, що є ключовим для моделювання руху маніпулятора в просторі. Ці бібліотеки є добре документованими, широко використовуються в наукових і інженерних колах, що забезпечує наявність великої кількості прикладів і підтримки. Вони також легко інтегруються з іншими популярними бібліотеками Python, такими як NumPy, що спрощує обробку даних та математичні обчислення. Крім того, ці бібліотеки підтримують інтерактивність, що дозволяє створювати динамічні і візуально привабливі інтерфейси для користувача, забезпечуючи зручний контроль і моніторинг роботи маніпулятора в реальному часі.

```
root = tk.Tk()
```

```
root.title("Управління триланковим маніпулятором")
```

Ці два рядки є фундаментальними для побудови GUI-додатку, оскільки створюють базове вікно та встановлюють його заголовок, після чого до цього вікна можна додавати різні елементи управління та відображення.

Ось детальніше пояснення:

`root = tk.Tk()`: цей рядок створює головне вікно додатку, яке буде контейнером для всіх інших елементів інтерфейсу (кнопок, міток, полів вводу тощо). Об'єкт `root` представляє основне вікно програми.

`root.title("Управління триланковим маніпулятором")`: цей рядок задає заголовок для головного вікна програми. Заголовок відображається у верхній частині вікна та на панелі завдань операційної системи. Він допомагає користувачам зрозуміти призначення вікна, яке вони бачать.

```
button1 = tk.Button(root, text="Збільшити кут 1",
command=button1_pressed)
```

```
button1.pack()
```

```
button2 = tk.Button(root, text="Зменшити кут 1",
command=button2_pressed)
```

```
button2.pack()
```

Даний фрагмент коду створює кнопки в графічному інтерфейсі користувача (GUI) за допомогою бібліотеки Tkinter в Python і розміщує їх у головному вікні. Ось детальніше пояснення:

```
button1 = tk.Button(root, text="Збільшити кут 1",
command=button1_pressed):
```

цей рядок створює кнопку з написом "Збільшити кут 1". При натисканні цієї кнопки викликається функція `button1_pressed`.

`button1.pack()`: цей рядок додає кнопку `button1` у головне вікно та автоматично розміщує її. Метод `pack()` використовується для розташування елементів у вікні за допомогою простого пакувального геометричного менеджера.

```
button2 = tk.Button(root, text="Зменшити кут 1",
command=button2_pressed):
```

цей рядок створює іншу кнопку з написом "Зменшити кут 1". При натисканні цієї кнопки викликається функція `button2_pressed`.

`button2.pack()`: цей рядок додає кнопку `button2` у головне вікно та автоматично розміщує її за допомогою методу `pack()`.

Ці кнопки дозволяють користувачеві взаємодіяти з програмою, змінюючи кут повороту першої ланки маніпулятора на $\pm 10^\circ$. Натискання на кожну з кнопок викликає відповідну функцію (`button1_pressed` або

button2_pressed), яка, у свою чергу, змінює кут та оновлює координати, кінетичну енергію та графічне відображення маніпулятора.

```
# Функції для зміни кутів за допомогою кнопок
```

```
def button1_pressed():
```

```
    change_angles(1, 10)
```

Даний фрагмент коду визначає функцію, яка змінює кут повороту першої ланки маніпулятора при натисканні на відповідну кнопку. Ось детальніше пояснення:

`def button1_pressed():`: цей рядок визначає нову функцію з іменем `button1_pressed`. Ця функція буде викликана, коли користувач натисне на кнопку "Збільшити кут 1".

`change_angles(1, 10)`: цей рядок викликає функцію `change_angles`, передаючи їй два аргументи: 1 і 10. Перший аргумент (1) вказує, що необхідно змінити кут першої ланки маніпулятора. Другий аргумент (10) вказує на величину зміни кута в градусах. У даному випадку кут першої ланки збільшується на 10 градусів.

Таким чином, цей фрагмент коду визначає, що при натисканні кнопки "Збільшити кут 1" кут першої ланки маніпулятора буде збільшуватися на 10 градусів. Це дозволяє інтерактивно керувати маніпулятором, змінюючи його конфігурацію та спостерігаючи за результатом у графічному інтерфейсі.

```
# Мітка для виведення координат
```

```
coordinates_label = tk.Label(root, text=f"Поточні координати захватного пристрою: x = {x:.2f}, y = {y:.2f}, z = {z:.2f}")
```

```
coordinates_label.pack()
```

Цей фрагмент коду створює мітку в графічному інтерфейсі користувача (GUI), яка відображає поточні координати захватного пристрою маніпулятора. Ось детальніше пояснення:

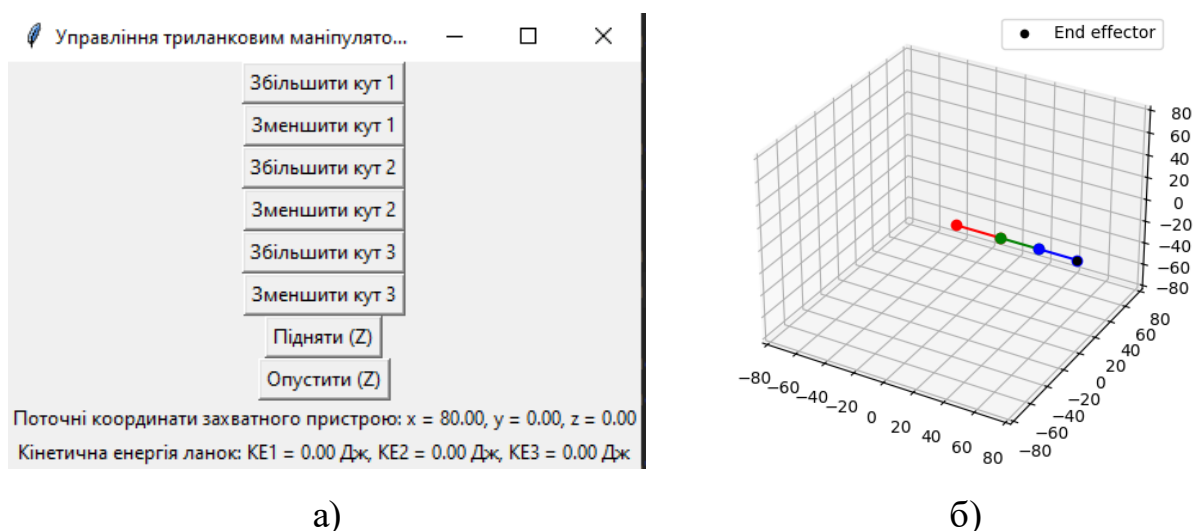
`coordinates_label = tk.Label(root, text=f"Поточні координати захватного пристрою: x = {x:.2f}, y = {y:.2f}, z = {z:.2f}")`: цей рядок створює мітку

(Label) з текстом, який відображає поточні координати захватного пристрою маніпулятора. `root` вказує на головне вікно, в якому буде розміщена ця мітка. Текст мітки форматується за допомогою f-рядка (f"..."), який включає поточні значення координат x , y та z з точністю до двох знаків після коми (`{x:.2f}`, `{y:.2f}`, `{z:.2f}`).

`coordinates_label.pack()`: цей рядок додає мітку `coordinates_label` у головне вікно і розміщує її за допомогою геометричного менеджера `pack()`. Це означає, що мітка буде автоматично розташована в інтерфейсі.

Цей фрагмент коду забезпечує відображення поточних координат захватного пристрою маніпулятора в реальному часі. Коли користувач змінює кути маніпулятора, відповідні координати оновлюються, і мітка автоматично відображає ці нові координати, допомагаючи користувачу зрозуміти, де знаходиться захватний пристрій у тривимірному просторі.

Приклад реалізованого графічного інтерфейсу користувача, розробленої програми моделювання триланкового маніпулятора типової модульної конструкції з механічними шарнірами на базі мови Python в середовищі PyCharm 2022.2.3 приведено рисунку 3.2.

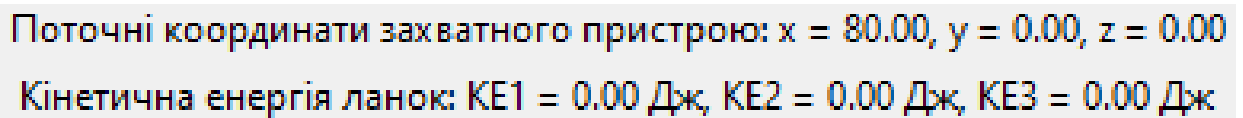


а) вікно кнопки керування та результатів розрахунків;

б) вікон моделювання переміщенням в 3D просторі ланцюгів маніпулятора.

Рисунок 3.2 – Приклад реалізованого графічного інтерфейсу

Відповідно до розробленого алгоритму та формул розрахунку поточних координат захватного пристрою та кінетичної енергії ланків (підрозділ 2.2-2.3), в результаті моделювання роботи, розраховуються та виводяться у «Вікно кнопки керування та результатів розрахунків» в залежності від положення маніпулятора в 3D просторі у даний час. Приклад виведення розрахунку поточних координат захватного пристрою та кінетичної енергії ланків в початкових умовах моделювання, приведено на рисунку 3.3.



Поточні координати захватного пристрою: $x = 80.00$, $y = 0.00$, $z = 0.00$
Кінетична енергія ланок: $KE1 = 0.00$ Дж, $KE2 = 0.00$ Дж, $KE3 = 0.00$ Дж

Рисунок 3.3 – Фрагмент вікна виведення розрахунку поточних координат захватного пристрою та кінетичної енергії ланок в початкових умовах моделювання

Розроблений інтерфейс програми для моделювання триланкового маніпулятора має кілька суттєвих переваг. По-перше, він забезпечує інтерактивне керування кутами повороту кожної ланки маніпулятора, що дозволяє користувачу легко змінювати положення захватного пристрою і спостерігати результати в реальному часі. По-друге, графічний інтерфейс надає наочне уявлення про просторову конфігурацію маніпулятора, що значно спрощує розуміння його роботи. По-третє, відображення поточних координат захватного пристрою та кінетичної енергії ланок надає корисну інформацію для аналізу руху та динаміки маніпулятора. Також, можливість швидкого оновлення графіку дозволяє ефективно оцінювати зміни параметрів і приймати необхідні коригувальні дії. Нарешті, зручність використання інтерфейсу робить його доступним навіть для користувачів з мінімальним досвідом роботи з подібними системами, що сприяє широкому

впровадженню і застосуванню програми в різних навчальних і дослідницьких проектах.

3.6 Моделювання триланкового маніпулятора

На розробленій програмі моделювання триланкового маніпулятора можна провести кілька наукових експериментів, щоб дослідити його можливості та поведінку в різних умовах. Ось деякі з них:

- дослідження робочої зони маніпулятора, змінюючи кути кожної з ланок, можна визначити максимальну робочу зону маніпулятора, тобто область, яку може досягти захватний пристрій у тривимірному просторі. Це допоможе зрозуміти обмеження маніпулятора та оптимізувати його використання;

- аналіз кінетичної енергії, вивчаючи зміни кінетичної енергії при різних кутах повороту, можна оцінити енерговитрати на рухи маніпулятора. Це важливо для оптимізації енергоефективності та планування траєкторій, які мінімізують витрати енергії;

- стабільність і стійкість, досліджуючи поведінку маніпулятора при різних комбінаціях кутів, можна оцінити його стабільність і стійкість. Наприклад, можна перевірити, чи не виникають коливання або нестабільність при певних конфігураціях;

- точність позиціонування, використовуючи програму, можна перевірити точність позиціонування захватного пристрою, задаючи певні координати і вимірюючи відхилення від цільових точок. Це допоможе виявити і скоригувати помилки в моделі або управлінні;

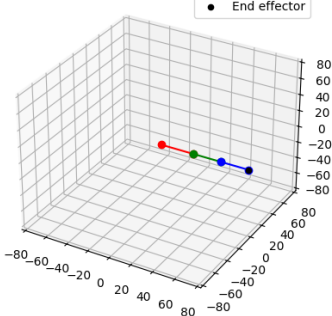
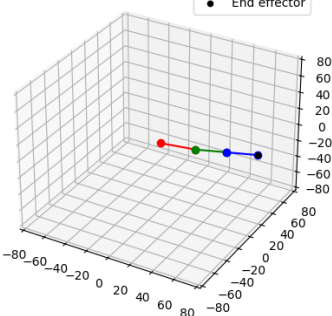
- оптимізація траєкторій, можна експериментувати з різними траєкторіями руху захватного пристрою, щоб знайти оптимальні маршрути для досягнення певних точок. Це може включати мінімізацію часу руху або енергоспоживання;

– вплив вертикального підйому, вивчаючи вплив зміни кута вертикального підйому (ϕ), можна зрозуміти, як зміни висоти впливають на положення захватного пристрою і поведінку маніпулятора в цілому.

Ці експерименти дозволять краще зрозуміти роботу триланкового маніпулятора і допоможуть удосконалити його конструкцію та алгоритми управління для різних практичних застосувань.

В рамках даної роботи проведемо аналіз кінетичної енергії, для виявлення оптимальні траєкторії і рухи, які мінімізують витрати енергії. Отримані результати моделювання роботи триланкового маніпулятора, для виявлення втрат кінетичної енергії приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Отримані результати моделювання роботи триланкового маніпулятора, для виявлення втрат кінетичної енергії

Координати захватного пристрою	3D модель	Кінетична енергія на ланках
1	2	3
$x = 80; y = 0; z = 0$		$KE1 = 0$ Дж $KE2 = 0$ Дж $KE3 = 0$ Дж
Збільшення кута 1 (+10°) та збільшення кута 2 (+10°)		
$x = 76,53; y = 22,31;$ $z = 0$		$KE1 = 13,71$ Дж $KE2 = 7,52$ Дж $KE3 = 0$ Дж
Підняття Z (+10°) та збільшення кута 3 (+10°)		

Продовження таблиці 3.1

1	2	3
$x = 73,55; y = 25,86;$ $z = 12,97$		$KE1 = 13,71 \text{ Дж}$ $KE2 = 7,62 \text{ Дж}$ $KE3 = 5,71 \text{ Дж}$
Збільшення кута 2 (+10°) та збільшення кута 2 (+10°)		
$x = 64,91; y = 41,27;$ $z = 11,45$		$KE1 = 54,83 \text{ Дж}$ $KE2 = 7,52 \text{ Дж}$ $KE3 = 22,83 \text{ Дж}$

Отримані результати експерименти з моделюванням роботи триланкового маніпулятора (табл. 3.1) дають можливість зробити наступні висновки:

- втрати кінетичної енергії, при збільшенні кутів повороту ланок маніпулятора зміни координат та кінетичної енергії на ланках можуть бути неоднаковими. Наприклад, збільшення кута 1 та кута 2 призвело до зміни координат, але не вплинуло на кінетичну енергію ланок;

- залежність кінетичної енергії від конфігурації, зміни кінетичної енергії можуть бути значними при певних конфігураціях маніпулятора. Наприклад, підняття координати Z та збільшення кута 3 призвело до збільшення кінетичної енергії на третій ланці;

– вплив кутів на координати, зміни кутів повороту можуть призводити до значних змін у координатах кінцевого захвату маніпулятора. Наприклад, збільшення кутів 2 та 3 призвело до переміщення координат захвату в іншу область;

– енергоефективність рухів, деякі рухи можуть бути більш енергоефективними, ніж інші, з точки зору мінімізації втрат кінетичної енергії. Наприклад, підняття координати Z може вимагати менше енергії, ніж зміна кутів повороту.

Отже, експерименти демонструють, що кінетична енергія маніпулятора змінюється в залежності від його конфігурації та рухів, що може бути важливим при плануванні оптимальних траєкторій для зменшення енерговитрат.

В наслідок чого, можна зробити наступні висновки, що до переваг розробленої програми для моделювання роботи триланкового маніпулятора. По-перше, вона надає можливість візуалізувати рух маніпулятора за допомогою графічних зображень, що спрощує розуміння його роботи. Інтерактивний інтерфейс програми дозволяє користувачеві змінювати кути повороту ланок маніпулятора та спостерігати за їх впливом на роботу системи. Додатково, програма відображає поточні координати та кінетичну енергію ланок маніпулятора, що дозволяє аналізувати ефективність його роботи та витрати енергії. Модульна структура програми робить її легко змінюваною та розширюваною для введення нових функцій або параметрів маніпулятора. Програма також дозволяє проводити різні експерименти з рухом маніпулятора та аналізувати їх результати, що може бути корисним для вивчення його роботи та оптимізації траєкторій руху. В цілому, розроблена програма є потужним інструментом для дослідження та моделювання роботи триланкового маніпулятора.

3.7 Охорона праці

Аналіз потенційних ризиків в контексті даної кваліфікаційної роботи полягає в ідентифікації можливих небезпек для операторів та середовища. Основні аспекти ризику включають механічні травми, які можуть виникнути від рухомих частин маніпулятора, таких як шарніри та важелі, особливо під час їх руху. Додаткові ризики включають електричне ураження від електричних компонентів маніпулятора та можливість виникнення проблем зі здоров'ям, спричинених шумом і вібраціями, що виникають під час його роботи.

Важливо провести систематичний аналіз усіх цих аспектів, щоб розробити ефективні стратегії зменшення ризиків і забезпечити безпечну експлуатацію маніпулятора. Це включає в себе застосування захисних пристроїв, які обмежують доступ оператора до небезпечних зон, а також впровадження технологій і методів, які зменшують шум і вібрації, щоб забезпечити комфортні умови роботи [16].

Для проведення математичних розрахунків на міцність та надійність триланкового маніпулятора потрібно визначити основні параметри та провести аналіз найбільш критичних частин конструкції, наприклад, механічних шарнірів. Оцінимо максимальне навантаження, яке шарнір може витримати. Це може бути статичне навантаження (наприклад, вага, яку шарнір повинен підтримувати) або динамічне навантаження (навантаження під час руху маніпулятора). Залежно від навантаження і умов експлуатації оберімо матеріал для шарніра (наприклад, сталь, алюміній або спеціальні композитні матеріали). Для шарніра, що зазнає згину, можна застосувати формулу моменту згину:

$$M = \sigma \cdot S, \quad (3.2)$$

де M – момент згину;
 σ – напруження в матеріалі;
 S – поперечний переріз шарніра.

Якщо шарніри піддаються циклічному навантаженню, такому як повторювані рухи маніпулятора, важливо також розрахувати їхню втомну міцність. Використовуючи критерії втоми, такі як критерій Мора або інші, для оцінки тривалості роботи перед виникненням тріщин [16].

Для оцінки надійності за допомогою методу МТBF, на початку потрібно зібрати дані про надійність компонентів маніпулятора, таких як шарніри, електроніка та інші критичні елементи. Ці дані можуть включати середній час між відмовами (МТBF) для кожного компонента. Використовуючи формули теорії надійності для обчислення загального МТBF системи на основі надійності кожного компонента та їх взаємозв'язків, якщо маніпулятор складається з трьох шарнірів, кожен з них має власний МТBF, то загальний МТBF можна обчислити як:

$$MTBF = 1 / \sum (1 / MTBF_i), \quad (3.2)$$

де $MTBF_i$ – МТBF кожного окремого компонента.

Припустимо, що $MTBF_1 = 5000$ годин, $MTBF_2 = 6000$ годин, $MTBF_3 = 5500$ годин. Тоді загальний МТBF обчислюється як:

$$MTBF = 1 / (1 / 5000 + 1 / 6000 + 1 / 5500) = 1823,85 \text{ години.}$$

Отже, загальний МТBF системи триланкового маніпулятора з обчисленими значеннями МТBF шарнірів буде приблизно 1823,85 години.

ВИСНОВКИ

В ході виконання даної кваліфікаційної роботи було проведено огляд типів маніпуляторів та їх застосування. Проаналізовано типові модульні конструкції маніпуляторів, конструкції та принцип роботи механічних шарнірів та кінематику та динаміку маніпуляторів.

Наступним етапом роботи була розробка кінематичної схеми маніпулятора. Далі було проведено розрахунок динамічної моделі маніпулятора та кінематики прямого завдання.

Після проведено вибір середовища програмування та інструментів, розроблено алгоритми управління маніпулятором. Далі було розроблено функції розрахунку кінетичної енергії та обчислення координат за кутами. Заключними етапами роботи була розробка інтерфейсу користувача та візуалізація моделі. Проведено моделювання триланкового маніпулятора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2023. 65 с.
4. Фещенко А. С. Дослідження та розробка захватних пристроїв маніпуляторів: дипломна магістерська робота за спеціальністю 131 Прикладна механіка / А. С. Фещенко; наук. кер. О. П. Манойленко; рец. В. М. Дворжак. – Київ: КНУТД, 2022. – 72 с.
5. Шафоростов Д. Д. Розроблення програмного модуля маніпуляторів роботехнічних систем військового та спеціального призначення для пошуку вибухонебезпечних предметів: пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Д. Д. Шафоростов; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки – Харків, 2022. – 102 с.

6. Zalyпка, V. (2023). Analysis and synthesis of classification signs of the means of interaction with external objects and the environment of multipurpose robotic platforms for their further transformation. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 21–33. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.03>.

7. Волков В.В. Аналіз об'ємно-планувальних рішень складських приміщень харчової промисловості: робота на здобуття кваліфікації магістр зі спеціальності 192 «Будівництва та цивільної інженерії» / В.В. Волков. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 109 с.

8. Деревляний В.С. Розробка та дослідження кінематичної структури токарних верстатів з паралельною кінематикою: кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю "133 — галузеве машинобудування" / В.С. Деревляний. — Тернопіль: ТНТУ, 2022. — 97 с.

9. Степаненко О. А. Удосконалення системи технічного сервісу кульових шарнірів рульового керування автомобілів: магістер. дипломна робота: 208, Агроінженерія / Степаненко Олександр Анатолійович; наук. керівник Толстенко О. В.; Дніпровський держ. аграр.-економ. ун-т, Інж.-технол. ф-т, Каф. надійності і ремонту машин. - Дніпро, 2021. – 105 с.

10. Kotelnytskyi V. B. Structural and technological support for the manufacturing of drive chain links with oriented bushings. Thesis work for obtaining the educational qualification of Master degree of specialty 133 - Industrial machinery engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2023. - 122 p.

11. Калиновський А. Я. Розробка моделей розкриття стержневих конструкцій для аварійно-рятувальних робіт у невагомості / Куценко Л.М., Калиновський А.Я., Сухарькова О.І. // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – КНУБА, 2022. – Вип. 102. - С. 100-126. DOI: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2022.102.100-126>.

12. Даєн, І. Модель системи керування роботом-маніпулятором: дипломна робота ... бакалавра: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Даєн Ігор. – Харків : ХНАДУ, 2023. – 52 с.

13. Ащепкова, Н. & Опшитош, Н. (2023). кінематичний аналіз маніпулятопр. Сучасна інженерія та інноваційні технології , 1 (30-01), 19–29. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-30-00-039>.

14. Кошевий М. Д. Метод синтезу оптимальних траєкторій схвату маніпулятора автономного мобільного робота / М. Д. Кошевий, Н. С. Ащепкова // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Інформатика та моделювання = Bulletin of the National Technical University "KhPI" Ser.: Information and Modeling: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 86-98.

15. Перспективи використання вакуумних захватних пристроїв у легкій промисловості / Т. Романець, В. Неймак, П. Майдан, С. Смутко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2023. - № 3. - С. 87-90.

16. Охорона праці. Вимоги до робочого місця працівника // Сайт ГСС. URL: <https://gc.ua/uk/oxorona-praci-v-ofisi-vimogi-do-robochogo-miscya-ofisnogo-pracivnika/> (дата звернення: 07.06.2024).