

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Проектування та дослідження багатоланкової конструкції промислового
маніпулятора

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВм-23-1
Іванов Владислав Сергійович

(прізвище, ініціали)

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

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Новоселов С. П.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

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

« 14 » січня 2025р.

_____ Іванов В. С.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Іванову Владиславу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування та дослідження багатоланкової конструкції промислового маніпулятора

затверджена наказом по університету від _____ 22.11. 2024 р. № 1231 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 22.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Апаратна платформа – Arduino

3.2 Середовище розробки – MS Visual Studio

3.3 Макет промислового маніпулятора

3.4 Функції програми – побудова кінематичної схеми маніпулятора

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Аналіз предметної області

4.2 Розроблення структурної схеми автоматизованої системи

4.3 Моделювання конструкції багатоланкового маніпулятора

4.4 Розробка структури та алгоритму роботи програми

4.5 Експериментальні дослідження

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint.

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою роботи	10.10.24 – 17.10.24	Виконав
2	Аналіз предметної області	18.10.24 – 30.10.24	Виконав
3	Моделювання конструкції багатоланкового маніпулятора	01.11.24 – 26.11.24	Виконав
4	Розробка структури та алгоритму роботи програми	27.11.24 – 20.12.24	Виконав
5	Експериментальні дослідження	21.12.24 – 02.01.25	Виконав
6	Оформлення пояснювальної записки	02.01.25 – 21.01.25	Виконав
7	Подання роботи на рецензію		
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри		

Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Іванов В. С.

(прізвище, ініціали)

проф. Новоселов С.П.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 73 с., 45 рис., 1 табл., 14 джерел.

БАГАТОЛАНКОВИЙ МАНІПУЛЯТОР, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, АЛГОРИТМ, ПРОГРАМА.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес управління багатоланковим промисловим маніпулятором.

Предмет дослідження – автоматизована система управління багатоланковим маніпулятором.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності методу управління багатоланковим маніпулятором за рахунок розробки програмного забезпечення, що дозволяє автоматизувати цей процес.

Проведено аналіз сфер застосування багатоланкових маніпуляторів.

Проведений аналіз завдання і кінематичних схем маніпуляторів показав переваги та недоліки існуючих конструкцій. Багатоланкові маніпулятори мають низку переваг перед традиційними маніпуляторами, які роблять їх більш ефективними та універсальними у використанні.

Наведено кінематичну схему маніпулятора, що використовується для дослідження. Розроблено структурну схему модуля керування багатоланковим маніпулятором.

Для проведення експериментальних досліджень була розроблена програма засобами Visual Studio від фірми Microsoft. Розроблена програма дозволяє пришвидшити процес моделювання положення ланок маніпулятора в просторі та прискорити виконання задачі розрахунку кутів повороту кожної рухомої ланки для будь якого їх положення.

ABSTRACT

Explanatory note: 73 p., 45 fig., 1 table., 14 sources.

MULTILINK MANIPULATOR, AUTOMATED CONTROL SYSTEM,
ALGORITHM, PROGRAM.

The object of research in this work is the process of controlling a multilink industrial manipulator.

The subject of research is an automated control system for a multilink manipulator.

The purpose of this work is to increase the efficiency of the method of controlling a multilink manipulator by developing software that allows automating this process.

An analysis of the areas of application of multilink manipulators has been conducted.

The analysis of the task and kinematic schemes of manipulators has shown the advantages and disadvantages of existing designs. Multilink manipulators have a number of advantages over traditional manipulators, which make them more efficient and versatile in use.

A kinematic scheme of the manipulator used for the study is presented. A structural diagram of the control module for a multilink manipulator has been developed.

To conduct experimental research, a program was developed using Microsoft Visual Studio. The developed program allows you to speed up the process of modeling the position of the manipulator links in space and accelerate the task of calculating the angles of rotation of each moving link for any of their positions.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	10
1 Аналіз предметної області	12
1.1 Аналіз завдання на проектування багатоланкової конструкції промислового маніпулятора	12
1.2 Класифікація і функції маніпуляторів і промислових роботів	16
1.3 Аналіз особливостей конструкцій багатоланкових маніпуляторів	22
1.4 Висновки по першому розділу	27
2 Розроблення структурної схеми автоматизованої системи	29
2.1 Розроблення структурної схеми системи управління багатоланковим маніпулятором	29
2.2 Синтез системи автоматичного управління маніпулятором	31
2.3 Висновки по другому розділу роботи	36
3 Моделювання конструкції багатоланкового маніпулятора	37
3.1 Аналіз конструкції макету промислового маніпулятора	37
3.2 Синтез кінематичної схеми багатоланкового маніпулятора	43
3.3 Висновки по третьому розділу	49
4 Експериментальні дослідження	51
4.1 Розробка структури та алгоритму роботи програми	51
4.2 Розробка структури бази даних	54
4.3 Опис розробленої програми	59
4.4 Експериментальні дослідження	65
4.5 Висновки по четвертому розділу	68
Висновки	69

Перелік джерел посилань.....	72
Додаток А Вихідний код програми.....	73
Додаток Б Апробація результатів наукових досліджень	89
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	95

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БД – база даних;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп'ютер.

FPGA – field-Programmable Gate Array;

GPU – graphics processing unit;

SCARA – Selective Compliance Articulated Robot Arm;

ВСТУП

Сучасні тенденції автоматизації виробництва вимагають створення високотехнологічних роботизованих систем, які здатні ефективно вирішувати складні завдання у різних галузях промисловості. Особливе місце в цій сфері займають багатоланкові промислові маніпулятори, які завдяки своїй конструктивній гнучкості та високій точності виконання операцій можуть задовольняти потреби машинобудування, електронної, харчової промисловостей та багатьох інших.

Основною проблемою, що стоїть перед розробниками таких систем, є забезпечення їх високої енергоефективності, безпечної експлуатації та інтеграції з автоматизованими системами управління. Важливим етапом у цьому процесі є проектування, моделювання та дослідження конструкцій маніпуляторів з метою підвищення їхньої ефективності та розширення функціональних можливостей.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності методу управління багатоланковим маніпулятором за рахунок розробки програмного забезпечення, що дозволяє автоматизувати цей процес.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз завдання на проектування багатоланкової конструкції промислового маніпулятора;
- навести основні кінематики промислових маніпуляторів та провести огляд компонентів системи управління роботою маніпулятора;
- подобувати структурну схему та алгоритм роботи системи управління багатоланковим роботизованим маніпулятором;
- виконати побудову алгоритму та розробити програму для проведення експериментальних досліджень;
- розробити програму для проведення експериментальних досліджень;
- виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень.

Оформити пояснювальну записку згідно [1-6].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз завдання на проектування багатоланкової конструкції промислового маніпулятора

Проектування багатоланкових маніпуляторів передбачає врахування багатьох факторів, таких як механічні навантаження, кінематика, динаміка, енергоспоживання та точність виконання рухів (рис. 1.1).

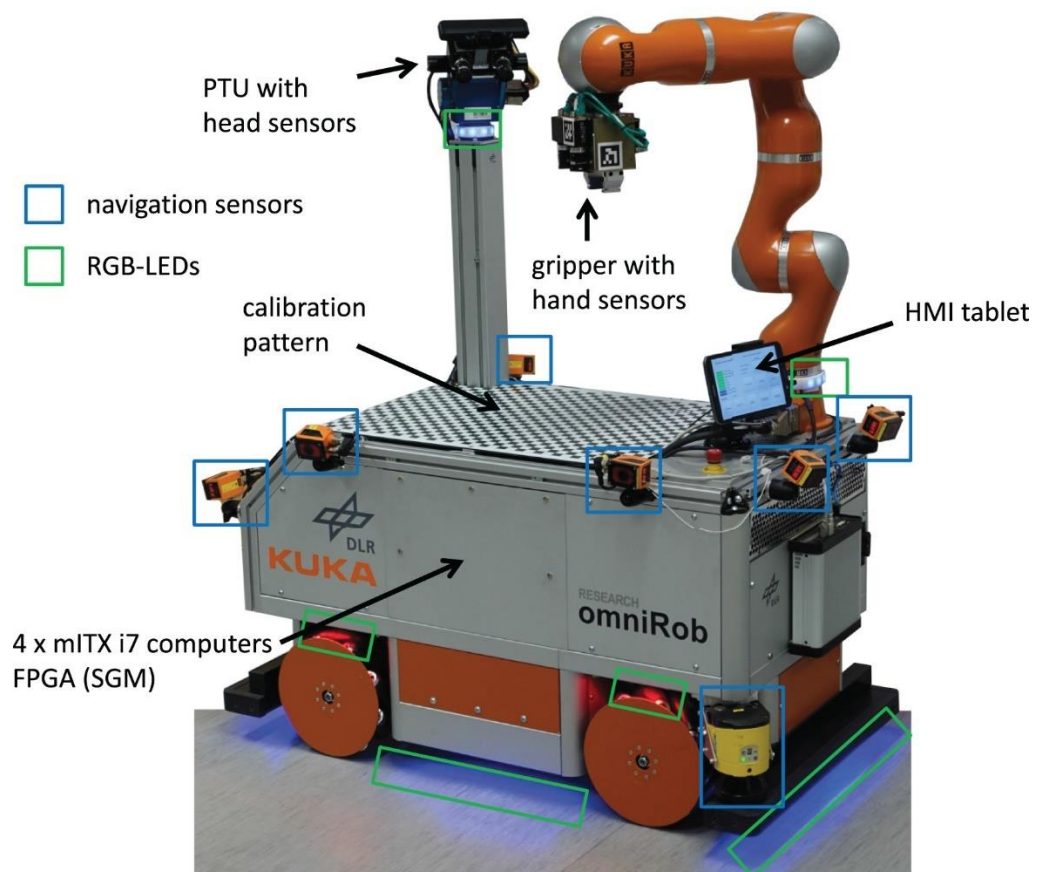


Рисунок 1.1 – Приклад промислового багатоланкового маніпулятора

Щоб здійснювати маніпуляції в різних місцях без огорожі навколо робота, а також поблизу людей, потрібна мобільна платформа, яка забезпечує безпечну навігацію [7]. Крім того, маніпулятор з керуванням крутним

моментом необхідний для операцій із закріпленням шпuru та для подолання невизначеності у сприйнятті. В роботі [7] мобільна платформа, яка використовується для даної роботи, це KUKA omniRob.

Поверх KUKA omniRob встановлено легкий робот KUKA (LWR) 4+. Ця рука є роботом із 7 ступенями свободи (DoF) і керованим крутним моментом із корисним навантаженням 7 кг на повній швидкості. Для маніпуляцій на фланці LWR був встановлений двопальцевий паралельний захват від Schunk (PG70).

Платформа має висоту 0,65 м, і її поверхню можна використовувати як робочий простір або вантажну зону для транспортних завдань. Ширина і довжина робота приблизно такі ж, як у європіддонів. Таким чином, розміри робота дозволяють отримати доступ до більшості промислових виробничих майданчиків. Колеса Mecanum робота забезпечують високоточні всеспрямовані рухи. Живлення здійснюється від свинцевих акумуляторів, що дозволяє працювати до 8 годин без підзарядки.

На початковому етапі проектування визначаються технічні вимоги, які маніпулятор повинен виконувати. Це може бути маса об'єктів, які потрібно маніпулювати, швидкість виконання операцій, необхідна точність та інші параметри.

Кінематика багатоланкових маніпуляторів включає розрахунок руху всіх ланок відносно одна одної. Важливо забезпечити правильну взаємодію між ланками, щоб маніпулятор міг досягати необхідних положень у просторі. Також аналізуються ступені свободи та їхня оптимальна кількість для конкретних завдань (рис. 1.2).

Динаміка системи вивчає сили та моменти, які діють на ланки маніпулятора під час руху. Це важливо для забезпечення стабільності конструкції та зменшення вібрацій, що можуть впливати на точність операцій.

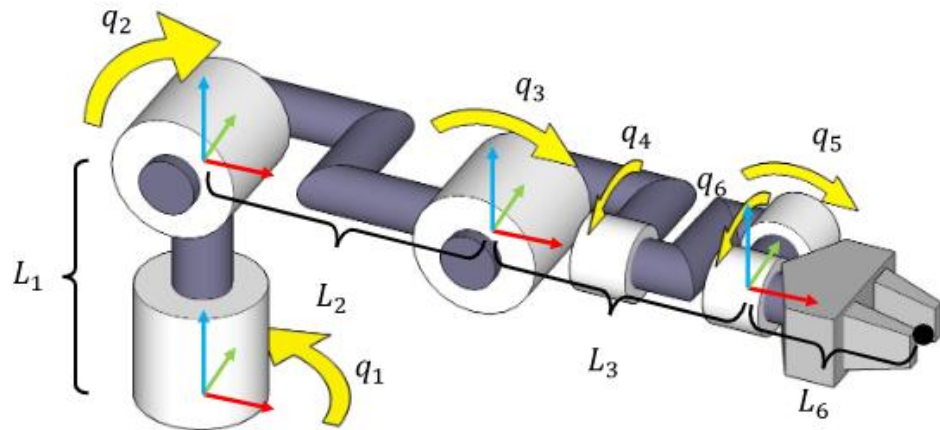


Рисунок 1.2 – Кінематика багатоланкових маніпуляторів

На етапі проектування привідної системи вибираються типи приводів та їх характеристики. Важливо підібрати приводи, які забезпечать достатню потужність і швидкість, але при цьому будуть енергоефективними.

Система керування повинна бути інтегрована з механічною частиною маніпулятора для координації його рухів. Це включає розробку програмного забезпечення для керування рухами маніпулятора та зворотного зв'язку від сенсорів. Показано приклад структурної схеми системи керування багатоланковим маніпулятором на рухомій платформі [7]. (рис. 1.3)

ІТ-обладнання має забезпечити достатню пропускну здатність мережі та обчислювальні ресурси для обробки доступних даних усіх датчиків. Крім того, щоб уникнути проблем із ненадійною бездротовою мережею, у системі мають бути запущені всі програмні модулі. Таким чином, на додаток до контролера робота та навігаційного комп'ютера, які постачаються з базовою системою від KUKA, обчислювальна потужність платформи збільшується за рахунок додавання чотирьох комп'ютерів (mITX, i7, Linux) та необхідних мережевих засобів.

Схематично зображено основні компоненти та мережеве з'єднання між ними. (рис. 1.3) Один із комп'ютерів діє як сервер для підтримки комп'ютерів

на одному рівні програмного забезпечення. Використовуються дві паралельні мережі: одна для віддаленого доступу до сервера і інша для іншого зв'язку.

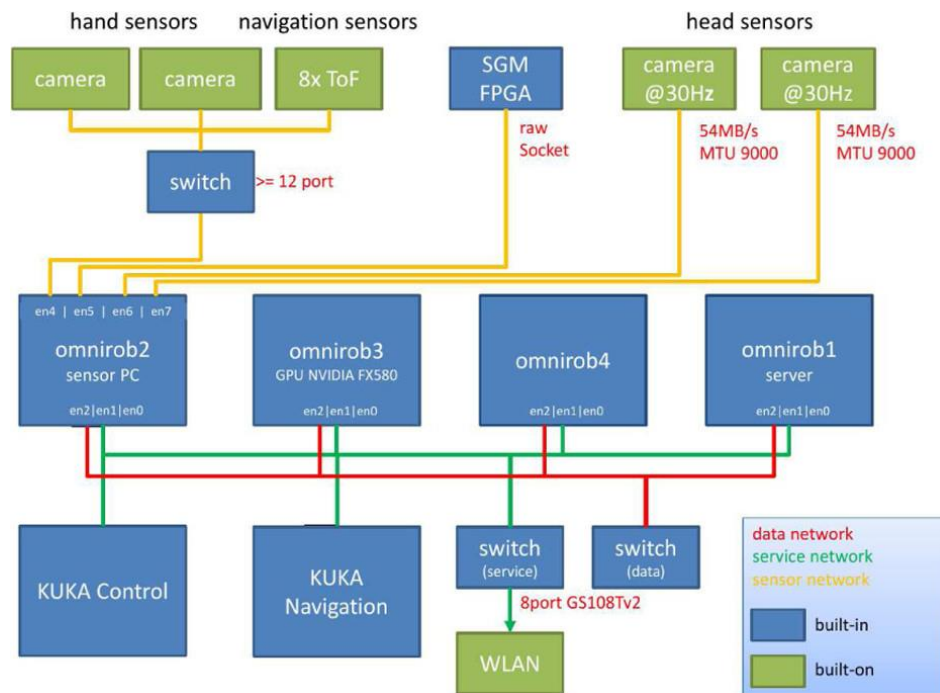


Рисунок 1.3 – Приклад структурної схеми системи керування багатоланковим маніпулятором на рухомій платформі

Другий комп'ютер оснащений чотирма додатковими мережевими портами, підключеними до датчиків системи. Забезпечивши кілька портів для датчиків, можна досягти вищої пропускної здатності даних. Збір усіх даних датчиків і приводів на одному комп'ютері спрощує відмітку часу.

Два інших комп'ютери використовуються для обчислювально дорогих алгоритмів. Одна з цих плат оснащена додатковою графічною картою, яка використовується для реалізації алгоритмів GPU. Для стереообробки зображення встановлено спеціальну програмовану вентиляну матрицю (FPGA), яка забезпечує реалізацію алгоритму напівглобального узгодження від фірми Hirschmüller [7].

Після завершення проектування маніпулятор піддається серії тестувань для перевірки його характеристик. Дослідження проводяться з метою оптимізації конструкції для підвищення її ефективності.

Важливо дослідити, наскільки точно маніпулятор виконує запрограмовані завдання та чи здатен він повторювати рухи з високою точністю.

Аналіз навантажень дозволяє оцінити стійкість конструкції до механічних впливів під час роботи. Це включає тестування на максимальні сили, які може витримати кожна ланка без деформації або руйнування.

Важливо дослідити, наскільки енергоефективна система в різних режимах роботи, і знайти можливості для оптимізації енергоспоживання.

Необхідно дослідити, як зовнішні фактори (температура, вологість, пил та ін.) впливають на роботу маніпулятора та його елементів. Це важливо для промислового використання у складних умовах.

1.2 Класифікація і функції маніпуляторів і промислових роботів

1.2.1 Класифікація за типом конструкції

Промислові маніпулятори – це багатофункціональні роботизовані пристрої, призначені для виконання різних виробничих завдань, таких як зварювання, збирання, упаковка, переміщення матеріалів та інші операції [11, 12]. Ці пристрої відіграють ключову роль автоматизації виробничих процесів. Класифікація промислових маніпуляторів ґрунтується на ряді критеріїв, таких як їх конструкція, кількість ступенів волі, типи приводів, функціональні можливості та інші параметри.

Маніпулятори можуть відрізнятися за своєю механічною структурою, що впливає на їхню рухливість, робочу зону та функціональні можливості. Основні типи конструкцій включають:

– ортогональні маніпулятори;

- циліндричні маніпулятори;
- сферичні маніпулятори;
- верстатні маніпулятори;
- SCARA маніпулятори;
- шестиступні шарнірні маніпулятори.

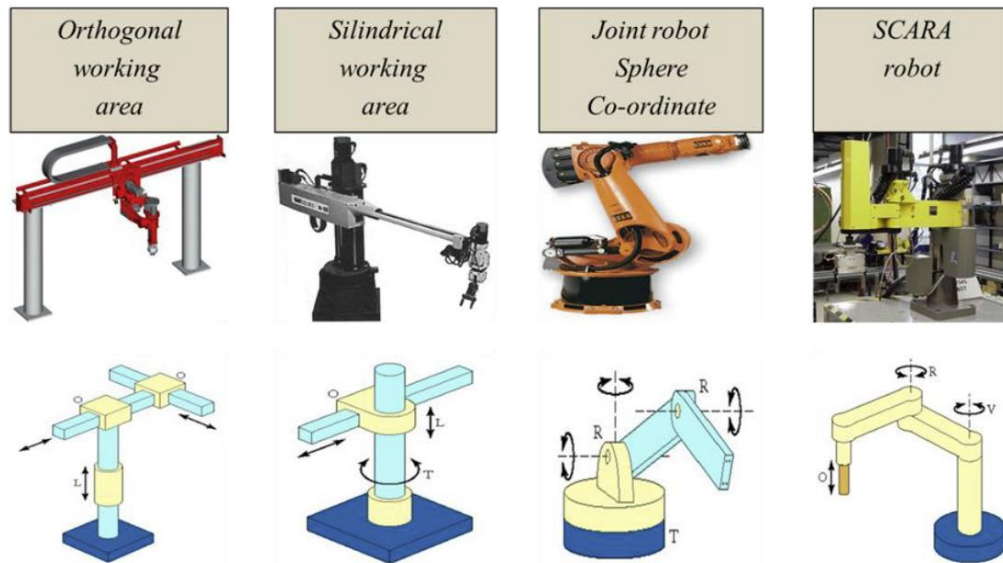


Рисунок 1.4 – Основні типи кінематичних сем маніпуляторів, що застосовуються на виробництві

1.2.2 Ортогональні маніпулятори

Ортогональні маніпулятори (рис. 1.5) працюють у трьох взаємно перпендикулярних площинах (X, Y, Z) і рухаються прямим осям. Така структура проста і надійна, забезпечує високу точність, але обмежена гнучкістю.

Однією з головних переваг декартових роботів-маніпуляторів є їх висока точність і повторюваність. Завдяки своїй лінійній конструкції ці роботи можуть досягати точності позиціонування до 0,001 мм. Крім того, декартові роботи відомі своєю масштабованістю, оскільки їх можна легко налаштувати

відповідно до розмірів робочого простору та можливостей корисного навантаження [12, 13].



Рисунок 1.5 – Кінематика ортогонального робота маніпулятора

Однак ортогональні роботи-маніпулятори мають деякі обмеження. Їх рух обмежено лінійними траєкторіями, які можуть бути непридатними для додатків, які вимагають складних або криволінійних траєкторій. Крім того, розмір і вага декартових роботів можуть бути значними, особливо для великомасштабних застосувань, що може призвести до збільшення споживання енергії та зниження загальної ефективності.

Ортогональні роботи-маніпулятори зазвичай використовуються в таких галузях, як виробництво та автоматизація. Їхні можливості точного позиціонування роблять їх ідеальними для виконання таких завдань, як підбір і розміщення, складання та перевірка. Наприклад, декартові роботи часто використовуються в електронній промисловості для складання друкованих плат (PCB), де висока точність і повторюваність є вирішальними для точного розміщення невеликих компонентів.

1.2.3 Циліндричні маніпулятори

Циліндричні маніпулятори мають циліндричну робочу область (рис. 1.6). Один із їх компонентів обертається навколо вертикальної осі, а рух здійснюється по радіальній та вертикальній осях.



Рисунок 1.6 – Циліндричні маніпулятори

Однією з головних переваг циліндричних роботів-маніпуляторів є їхня здатність обходити перешкоди в циліндричному робочому просторі [13]. Це робить їх придатними для програм, де доступ до цільового об'єкта може бути обмеженим. Крім того, циліндричні роботи можуть займати компакту площу, оскільки їх вертикальна колона та радіальна конструкція руки дозволяють їм займати менше місця порівняно з іншими типами роботів.

Однак циліндричні роботи-маніпулятори також мають деякі обмеження. Їхня робоча зона обмежена циліндричною формою, яка може не підходити для додатків, які потребують більшого робочого простору або робочого простору іншої форми. Крім того, точність і повторюваність циліндричних роботів можуть бути нижчими, ніж у декартових роботів, оскільки поєднання лінійних і обертальних рухів може створити додаткові джерела помилок.

1.2.4 Сферичні маніпулятори

Сферичні маніпулятори можуть повертатися навколо горизонтальної та вертикальної осей, а також рухатися вздовж радіальної осі, формуючи сферичну робочу область (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Кінематика сферичних маніпуляторів

Сферичні роботи-маніпулятори, також відомі як полярні роботи, мають сферичний робочий простір і складаються з комбінації лінійних і обертальних рухів [13]. Ці руки робота, як і рука людини, демонструють гнучкий діапазон рухів, що дозволяє їм орієнтуватися та виконувати завдання в тривимірному робочому просторі. Ці роботи зазвичай мають лінійну радіальну вісь (вісь ρ), вісь полярного обертання (вісь θ) і вісь азимутального обертання (вісь ϕ).

Сферичні роботи поставляються з двома поворотними і призматичними шарнірами. У структуру сферичних роботів часто входить встановлена на основі «рука», яка може витягуватися радіально та обертатися навколо двох перпендикулярних осей.

Однією з головних переваг сферичних роботів-маніпуляторів є їх здатність охоплювати великий робочий простір з відносно невеликою площею. Їхня унікальна комбінація лінійних і обертальних рухів дозволяє їм мати доступ до широкого діапазону позицій у своєму сферичному робочому

просторі. Крім того, сферичні роботи можуть забезпечувати високий ступінь спритності, що робить їх придатними для завдань, які вимагають складних і точних рухів.

Однак сферичні роботи-маніпулятори також мають деякі обмеження. Їхня точність і повторюваність можуть бути нижчими, ніж у декартових роботів, оскільки комбінація лінійних і обертальних рухів може викликати додаткові джерела помилок. Крім того, складність їхніх рухів може зробити програмування та керування більш складним порівняно з іншими типами роботів.

Сферичні роботи-маніпулятори зазвичай використовуються в таких галузях, як транспортування матеріалів і зварювання. Завдяки здатності охоплювати великий робочий простір і виконувати складні рухи вони добре підходять для таких завдань, як перенесення об'єктів між різними місцями або виконання складних зварювальних операцій. Наприклад, сферичні роботи можуть бути використані в автомобільній промисловості для таких завдань, як точкове зварювання, де їх спритність і велике покриття робочого простору є цінними активами.

1.2.5 SCARA маніпулятори

SCARA маніпулятори мають вибіркочувальну податливість по осі Z, забезпечуючи високу швидкість і точність в горизонтальній площині (рис. 1.8).

SCARA широко використовуються для складальних операцій. Обертальні вали в таких роботах розташовані вертикально, а кінцевий ефектор, прикріплений до плеча, що рухається горизонтально. Роботи SCARA можуть рухатися швидше та мають легшу інтеграцію в існуючий технологічний процес, ніж циліндричні та декартові роботи.



Рисунок 1.8 – Кінематика SCARA маніпулятора

Роботи SCARA, були вперше створені в Японії в 1980-х роках. Основною особливістю робота SCARA є шарнірна 2-ланкова рука, яка, хоча й працює в одній площині, певним чином імітує людську руку, дозволяючи руці витягувати та втягувати (згортати) у обмежених місцях, що робить її зручною для досягнення всередині корпусів або переміщати з одного місця на інше.

Роботи SCARA зазвичай мають до чотирьох осей (3 обертання та одну лінійну Z). Роботи SCARA найчастіше використовуються для роботи з підбору та монтажу, що вимагає високої точності та швидкості. З точки зору відтворюваності, доступні на даний момент роботи SCARA можуть навіть досягати допусків менше 10 мікрон, особливо в порівнянні з допуском шестиосьового робота 20 мікрон.

1.3 Аналіз особливостей конструкцій багатоланкових маніпуляторів

Роботизовані маніпулятори характеризуються ступенем свободи (DoF), який визначає діапазон рухів і спритність, якими вони володіють. Термін «ступені свободи» стосується незалежних рухів або осей, уздовж яких може рухатися суглоби робота [14]. Роботизований маніпулятор з шістьма

струменями свободи здатен рухатися в шести незалежних напрямках, що забезпечує широкий спектр можливостей позиціонування та орієнтації.

Для роботизованого маніпулятора з шістьма струменями свободи його рухи можна розбити на дві різні категорії в декартовій системі координат (рис. 1.9):

а) позиціонування (3 DoF):

- 1) лінійний рух вздовж осі X (ліворуч/праворуч);
- 2) лінійний рух по осі Y (вперед/назад);
- 3) лінійний рух по осі Z (вгору/вниз).

б) орієнтація (3 DoF):

- 1) обертання навколо осі X;
- 2) обертання навколо осі Y;
- 3) обертання навколо осі Z.

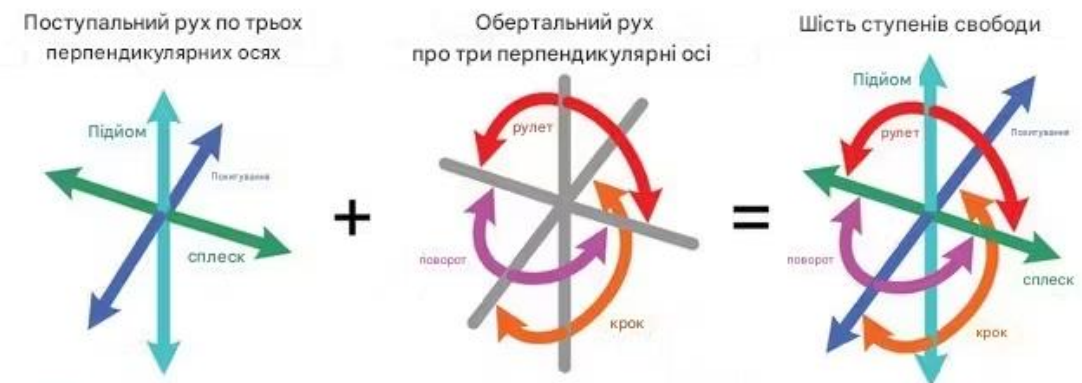


Рисунок 1.9 – Ступені свободи багатоланкового маніпулятора

За допомогою цих шести незалежних рухів робототехнічний маніпулятор з 6 DoF може досягати практично будь-якої точки свого робочого простору та орієнтуватися в будь-якому бажаному напрямку. Це імітує спритність людських рук, дозволяючи їм виконувати завдання, які раніше були складними для традиційних роботів з меншими ступенями свободи.

Загальна кінематична схема маніпулятора з шістьма ступенями свободи (рис. 1.10).

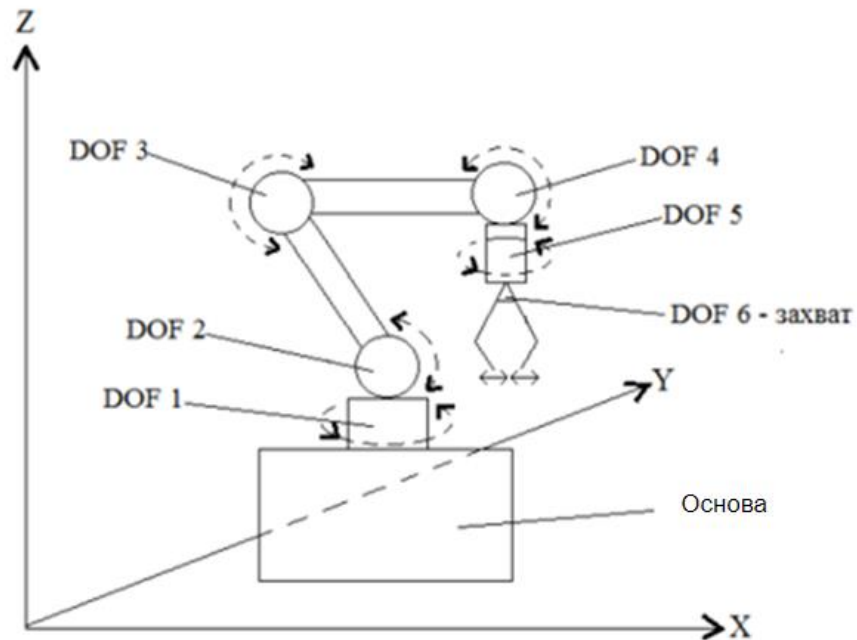


Рисунок 1.10 – Загальна кінематична схема маніпулятора з шістьма ступенями свободи

Покажемо кінематику багатоланкового робота маніпулятора Kawasaki (рис. 1.11).

Роботи Kawasaki серії R застосовуються для широкого спектру завдань, від збирання електронних пристроїв до дугового зварювання. У роботів цієї серії передбачено розміщення кабелів та пневмотрубок усередині корпусу, завдяки чому вдалося уникнути можливих перешкод при роботі додаткового обладнання. Але, незважаючи на це, роботи цієї серії відрізняються компактністю та високою швидкістю рухів усіх ланок. Цей робот незамінний там, де потрібний короткий цикл операцій, у чому можна переконатися, симулювавши роботу робота у віртуальній середовищі, при офф-лайн програмуванні.

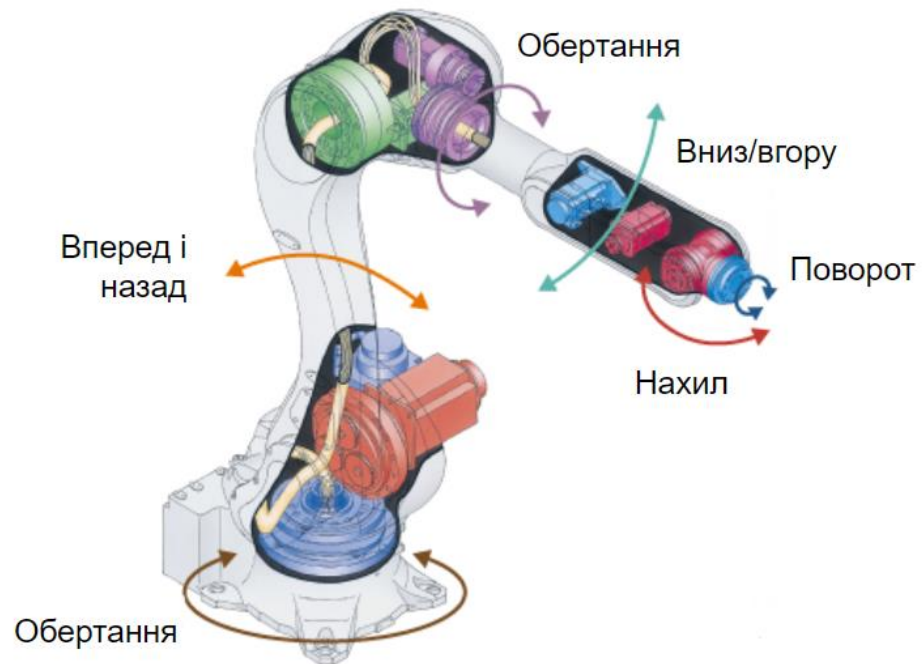


Рисунок 1.11 – Кінематика багатоланкового робота маніпулятора
Kawasaki

Корпус промислового робота – складається з окремих ланок. Найнижча, нульова ланка – це основа робота. До нього через редуктор першої осі кріпиться корпус першої ланки, а до корпусу першої ланки через редуктор другої осі корпус другої ланки. Третя ланка за допомогою редуктора третьої осі, що кріпиться до корпусу другої ланки. Четверте, п'яте та шосте ланки утворюють модуль званий зап'ястя. Зап'ястя кріпиться до корпусу третьої ланки через редуктор четвертої осі.

Кожен суглоб (або вісь) робота складається з мотора та редуктора. Цей вузол прийнято називати приводом. Фізично функцію суглоба (зчленування), що з'єднує дві сусідні ланки робота, несуть редуктори. Вони є, як правило, закінченим механічним пристроєм, з корпусом у вигляді складеного циліндра.

З одного боку, редуктор кріпиться до ланки N, де встановлений мотор, з іншого боку до редуктора кріпиться корпус ланки N+1.

Редуктори нижніх осей (з першою по третю) зазвичай мають порожнисту середину для того щоб крізь них можна було провести електричні дроти та пневматичні трубки для наступних осей та виконавчого органу (інструменту) робота. Однак, основним завданням редуктора є збільшення сили обертання двигуна, за рахунок зниження швидкості обертання. Усередині редуктора знаходиться безліч механічних передач різного роду, влаштованих таким чином, щоб обертання валу двигуна перетворювалося більш потужне обертання на виході з редуктора, але з меншою швидкістю. Таким чином, зменшуючи обертання двигуна в 10 разів, можна досягти десятикратного збільшення потужності приводу.

Ланки зчленовані за допомогою редукторів рухаються, і утримуються в певному положенні за допомогою сервомоторів (серводвигунів)

Привід, що функціонує в суглобі робота, дозволяє переміщати руку вгору, вниз або обертати нею, перетворюючи електроенергію на механічний рух. Найчастіше у приводах роботів використовуються сервомотори.

Для визначення позиції кожної ланки використовується датчик, що має назву Енкодер. Енкодер – це пристрій, який вказує положення (кут) валу обертання двигуна. За наявності енкодера можна отримати чіткі дані про те, як і в якому напрямку рухається робот. Покажемо принцип дії енкодера.

(рис. 1.12)

Найпростіший – оптичний енкодер, який представляє собою диск з отворами, розташованими по колу на однаковій відстані один від одного, і прикріплений до валу двигуна, що обертається. Перпендикулярно до двигуна розташовані з одного боку два світлодіоди, а зі зворотного боку – фотодіод для зчитування інтенсивності світла від світлодіодів.

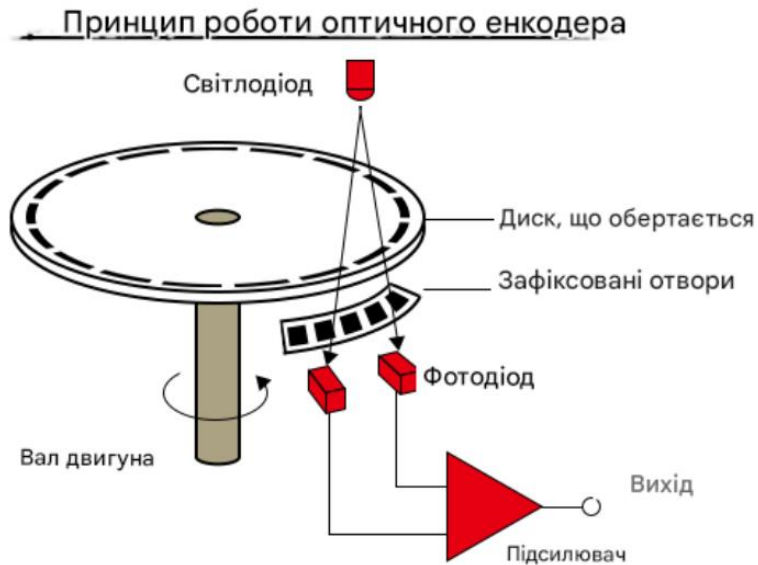


Рисунок 1.12 – Принцип дії енкодера.

Коли двигун обертається разом з диском енкодера, світло від діодів проходить через щілини або блокується, тому кут та швидкість обертання можна визначити шляхом зчитування сигналів з фотодіода. Це дозволяє сервомоторам точно контролювати положення та швидкість.

У роботах Kawasaki встановлені високоточні багатооборотні абсолютні енкодери з 32 бітним дозволам кодових дисків. Навіть при вимкненому живленні від контролера, такий енкодер завжди фіксуватиме поворот у тому числі більше 360° так, як житиметься від батарейки в руці робота. Тому при випадковому зрушенні, при транспортуванні або монтажі не потрібно додатково налаштовувати початкове положення ланок робота.

1.4 Висновки по першому розділу

В результаті виконання першого розділу кваліфікаційної роботи виконано аналіз предметної області та принципів застосування промислових роботів маніпуляторів.

Виконано аналіз завдання на проектування багатоланкової конструкції промислового маніпулятора. Наведені приклади промислових багатоланкового маніпуляторів та приклад кінематики багатоланкових маніпуляторів. Розглянуто приклад структурної схеми системи керування багатоланковим маніпулятором на рухомій платформі.

Виконана класифікація за типом конструкції і функції маніпуляторів та промислових роботів. Розглянуті основні типи кінематичних сем маніпуляторів, що застосовуються на виробництві. Також проведено аналіз особливостей конструкцій багатоланкових маніпуляторів на прикладі промислової роботи фірми Kawasaki.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розроблення структурної схеми системи управління багатоланковим маніпулятором

Структурна схема модуля керування багатоланковим маніпулятором (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Структурна схема модуля керування багатоланковим маніпулятором

До складу автоматизованої системи управління багатоланковим маніпулятором входить:

- пульт або зовнішня програма керування;
- мікроконтролер або контролер Arduino;
- джерело живлення 12В;
- блок комутації;
- драйвери для управління кроковими двигунами;
- крокові двигуни, що встановлюються на кожен суглоб;

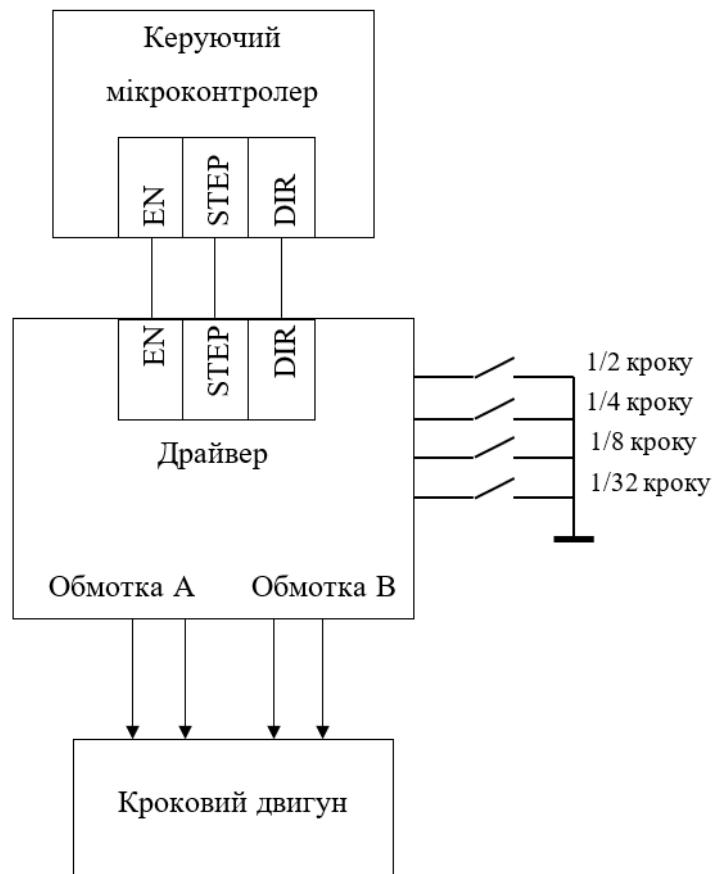


Рисунок 2.2 – Схема застосування драйверів

Модуль керування отримує команди управління від оператора через дистанційний пульт керування (рис. 2.1). Пристрій передає команди на вхід мікроконтролера, те відбувається їх первинна обробка. Далі, на основі

визначених координат, формуються внутрішні команди до кожного крокового двигуна.

Задача програми, що закладена в роботу мікроконтролера – визначити кути оберту кожної ланки маніпулятора в залежності від конкретної точки в просторі, до якої прагне дістати робочий орган.

Кожен кроковий двигун підключається до блоку комутації за допомогою драйверів. Драйвери виконують функцію підсилення току від блоку комутації та додають додаткові можливості управління.

2.2 Синтез системи автоматичного управління маніпулятором

Багатоланковий маніпулятор є багатовимірною системою, оскільки містить n керуючих і n регульованих змінних, що відповідають його зчленуванням. Управління такою системою в цілому є нетривіальним завданням, тому розглянемо спочатку керування одним зчленуванням.

Кожне зчленування маніпулятора відчуває момент навантаження, обумовлений гравітаційними силами, які діють наступні ланки і об'єкт, що маніпулюється, а в процесі руху ще й моментами сил, що виробляються іншими зчленуваннями, тобто наявністю перехресних зв'язків між ланками, що впливають один на одного при переміщенні траєкторією.

У разі одномірного керування момент навантаження розглядається як зовнішнє обурення. Таким чином, складається два завдання. По-перше, забезпечення стеження регульованої змінної за вхідним сигналом, що визначає траєкторію руху. По-друге, компенсація зовнішнього обурення, обумовленого впливом гравітаційних сил та перехресних зв'язків ланок.

Функціональна схема управління суглобом маніпулятора. (рис. 2.3)

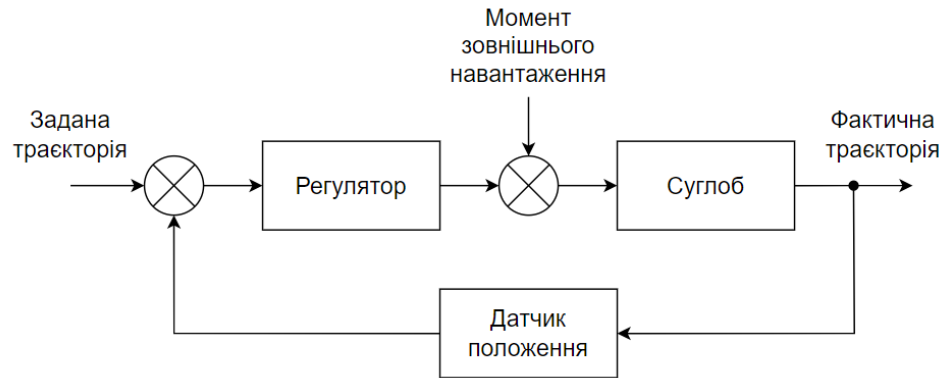


Рисунок 2.3 – Функціональна схема управління суглобом маніпулятора

Одномірне керування обертальним зчленуванням фактично зводиться до керування електроприводом із зубчастою передачею, динамічна модель якого містить дві складові: електричну та механічну.

Електрична компонента, обумовлена електричним ланцюгом з індуктивності, резистора та двигуна, визначається виразом:

$$Li(t) + Ri(t) = u(t) - K_\varepsilon \omega(t) = u(t) - K_\varepsilon \dot{\theta}(t), \quad (2.1)$$

де L – індуктивність;
 R – опір;
 $i(t)$ – сила струму;
 $u(t)$ – напруга якоря;
 K – коефіцієнт проти-ЕРС;
 $\omega(t)$ – кутова швидкість;
 $\dot{\theta}(t)$ – кут повороту ротора.

Механічна компонента, обумовлена зубчастою передачею, визначається виразом:

$$J\ddot{\theta}(t) = K_f \dot{\theta}(t) = K_\mu i(t) - \mu_l(t), \quad (2.2)$$

де J – сумарний момент інерції двигуна та зубчастої передачі,
 K_f – коефіцієнт тертя;
 K_μ – коефіцієнт моменту сили;
 $\mu_l(t)$ – момент навантаження,
 j – передатне число зубчастої передачі.

Здійснимо перетворення Лапласа функцій (2.1) та (2.2):

$$(Ls + R)I(s) = U(s) - K_\varepsilon s\theta(s), \quad (2.3)$$

$$(Js + K_f)s\theta(s) = K_\mu I(s) - M_l(s). \quad (2.4)$$

З (2.3) і (2.4) запишемо передатну функцію від входу $U(s)$ до виходу $\theta(s)$ при $M_l(s) = 0$:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_\mu}{s((Ls+R)(Js+K_f)+K_\varepsilon K_\mu)}. \quad (2.5)$$

Функціональна схема моделювання системи управління суглобом маніпулятора. (рис. 2.4)

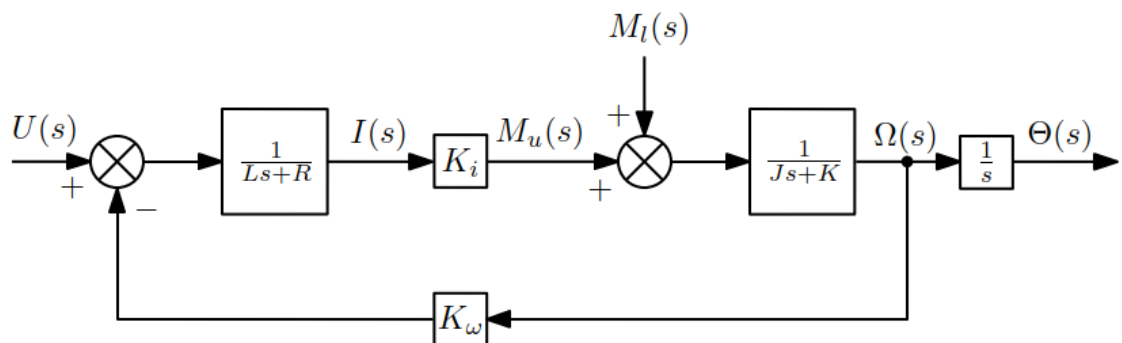


Рисунок 2.4 – Функціональна схема моделювання системи управління суглобом маніпулятора.

Передатна функція від $M_l(s)$ до $\Theta(s)$ при $U(s) = 0$ можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{\Theta(s)}{M_l(s)} = - \frac{Ls+R}{s((Ls+R)(Js+K_f)+K_\varepsilon K_\mu)}. \quad (2.6)$$

Далі поділимо чисельник на знаменник в передатних функціях 2.5 і 2.6 на R :

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{\frac{K_\mu}{R}}{s\left(\left(\frac{L}{R}s+R\right)(Js+K_f)+\frac{K_\varepsilon K_\mu}{R}\right)}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\Theta(s)}{M_l(s)} = - \frac{\frac{L}{R}s+1}{s\left(\left(\frac{L}{R}s+R\right)(Js+K_f)+\frac{K_\varepsilon K_\mu}{R}\right)}. \quad (2.8)$$

Припустимо, що постійна часу електричної частини суттєво менше постійної часу механічної частини:

$$\frac{L}{R} \ll \frac{J}{K_f}, \quad (2.9)$$

що є типовим допущенням для електромеханічних систем. З врахуванням цього перепишемо передатні функції 2.7 та 2.8:

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} \approx \frac{\frac{K_\mu}{R}}{s\left(Js+K_f+\frac{K_\varepsilon K_\mu}{R}\right)}, \quad (2.10)$$

$$\frac{\Theta(s)}{M_l(s)} \approx - \frac{1}{s\left(Js+K_f+\frac{K_\varepsilon K_\mu}{R}\right)}. \quad (2.11)$$

Додамо нові позначення для спрощення передатних функцій 2.10 та 2.11:

$$\frac{\Theta(s)}{M_u(s)} \approx \frac{1}{s(Js+K)}, \quad (2.12)$$

$$\frac{\Theta(s)}{M_l(s)} \approx -\frac{1}{s(Js+K)}, \quad (2.13)$$

де

$$M_u(s) = \frac{K_\mu}{R} U(s),$$

$$K = K_f + \frac{K_\varepsilon K_\mu}{R}.$$

Спрощена схема моделювання системи управління суглобом багатоланкового маніпулятора (рис. 2.5).

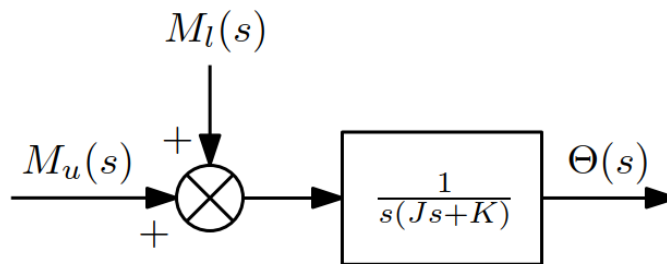


Рисунок 2.5 – Схема моделювання системи управління суглобом багатоланкового маніпулятора

Комбінуючи передатні функції 2.12 та 2.13 отримаємо:

$$\theta(s) = \frac{1}{s(Js+K)} (M_u(s) - M_l(s)) = P(s)(M_u(s) - M_l(s)). \quad (3.14)$$

Таким чином, ми отримали математичну модель обертового зчленування у вигляді передавальної функції $\theta(s)$.

2.3 Висновки по другому розділу роботи

В результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи розроблення структурної схеми системи управління багатоланковим маніпулятором. Описано процес синтезу системи автоматичного управління суглобами маніпулятора. Наведена функціональна схема управління мехатронними пристроями.

Записані необхідні передатні функції для побудови функціональної схеми моделювання системи управління суглобами маніпулятора. Отримано математичну модель обертового зчленування у вигляді передавальної функції $\theta(s)$.

3 МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ БАГАТОЛАНКОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

3.1 Аналіз конструкції макету промислового маніпулятора

Зовнішній вигляд макету багатоланкового промислового маніпулятора (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд макету багатоланкового промислового маніпулятора

Дана конструкція має три рухомі ланки, обертальну основу та обертальну площадку для встановлення робочого інструменту.

Структурна схема макету багатоланкового маніпулятора, що використовується для проведення дослідження в даній кваліфікаційні роботі (рис. 3.2).

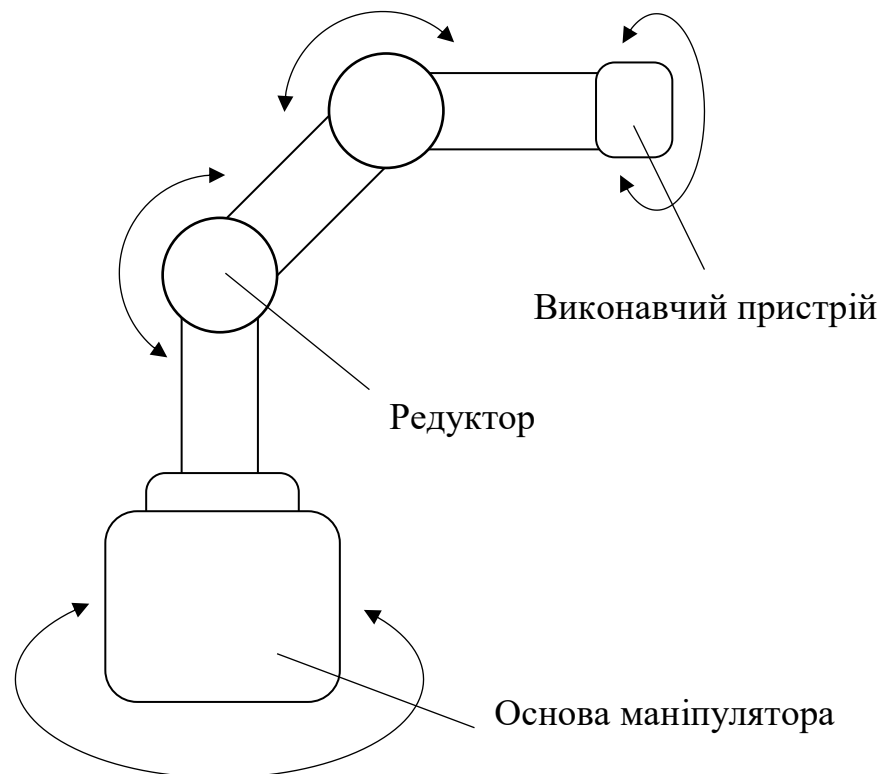


Рисунок 3.2 – Структурна схема макету багатоланкового маніпулятора, що використовується для проведення дослідження в даній кваліфікаційні роботі

Як можна бачити конструкція багатоланкового маніпулятора, пристрій може обертатись на масивній основі (рис. 3.2). Основа може бути закріплена на столі або робочій зоні. В конструкції основи для цього передбачені отвори діаметром 5 мм.

Для обертання маніпулятора на основі, в неї встановлено пластикову шестерню з опорними підшипниками. Кількість опорних підшипників становить 6 шт. Зовнішній вигляд опорних підшипників (рис. 3.3).

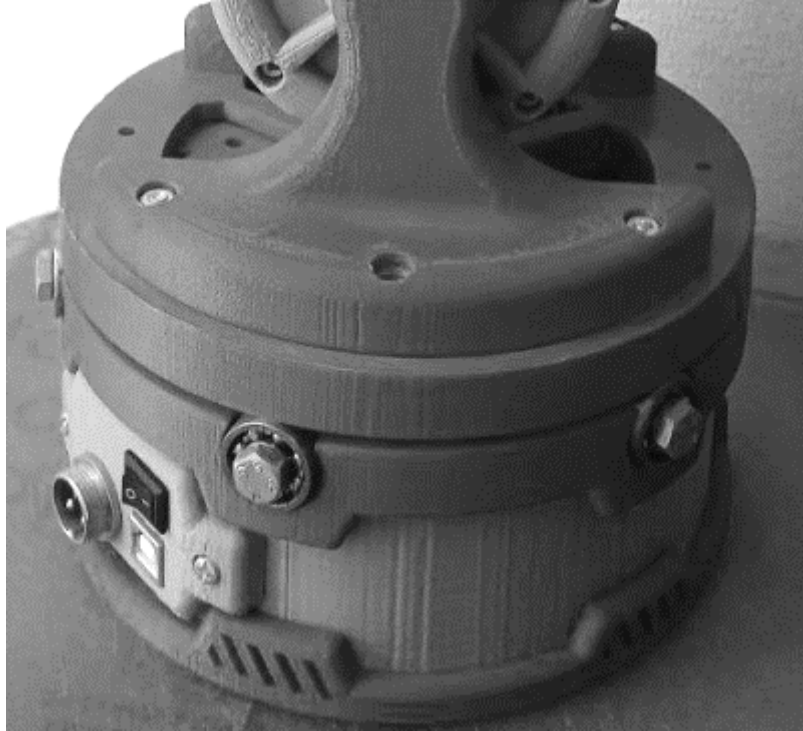


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд опорних підшипників

Внутрі корпусу знаходиться зубчасте колесо та кроковий двигун для передачі обертального моменту верхній частині конструкції.

Зовнішній вигляд конструкції основи маніпулятора з кроковим двигуном (рис. 3.4).

Для приводу в рух суглобів маніпулятора використовуються планетарні редуктори. Дані редуктори використовуються для збільшення навантажеспособності конструкції. Такі редуктори поєднують у собі компактні розміри та велике значення передавального числа.

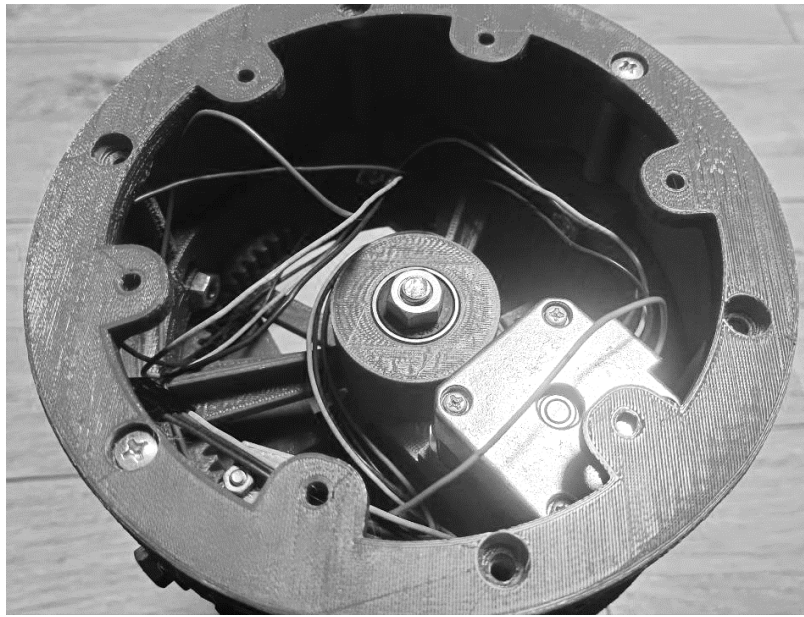


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд конструкції основи маніпулятора з кроковим двигуном

Для приводу нижньої ланки використовується планетарний редуктор з передавальним числом 1:64. Зовнішній вигляд даного редуктора (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд планетарного редуктора з передавальним числом 1:64

Конструкція даного редуктора передбачає високу навантажеспроможність завдяки високому передавальному числу.

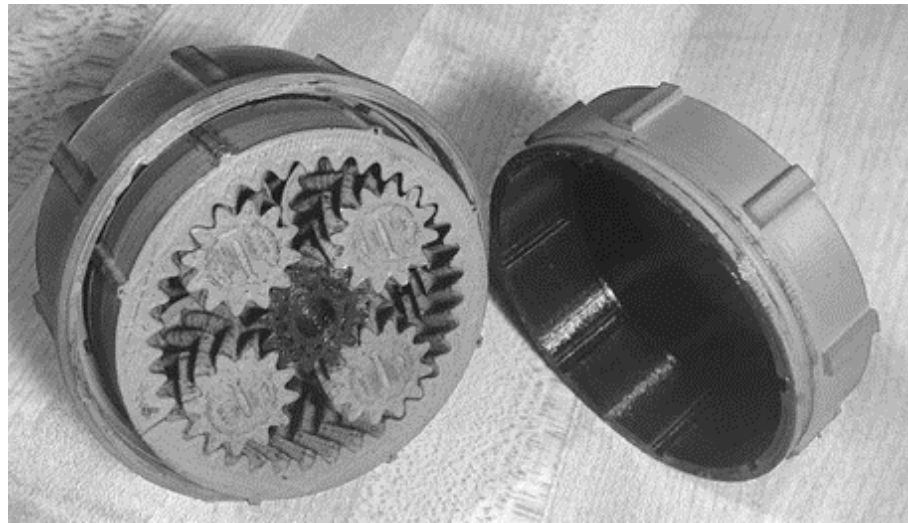


Рисунок 3.6 – Внутрішня конструкція планетарного редуктора нижнього суглоба

Наступні два суглоби мають редуктори менших розмірів. Особливістю їх конструкцій є те, що вони вбудовуються в саму ланку та стають їх частиною після закінчення збірки.

Приклад того, як стикаються два плеча пристрою – верхнє та нижнє (рис 3.6). Враховуючи те, що редуктор складається з чотирьох секцій, кожна ланка має два кріплення з обох сторін. Передавальне число даного редуктора становить 43:1.

Кроковий двигун поєднується з редуктором за допомогою вісі діаметром 5 мм.



Рисунок 3.7 – Конструкція суглоба маніпулятора з вбудованим редуктором

Для того, щоб кроковий двигун кріпився на основу однієї з ланок, розроблена конструкція спеціального тримача. На даний тримач закріплюється кроковий двигун, а далі, сам тримач кріпиться до зовнішньої сторони плеча маніпулятора (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Кріплення нижнього суглоба маніпулятора

3.2 Синтез кінематичної схеми багатоланкового маніпулятора

Для синтезу кінематичної схеми багатоланкового маніпулятора будемо використовувати алгоритм присвоєння систем координат, представлений в роботі [10]. Даний алгоритм не має єдиного способу рішення, хоча підсумковий результат повинен бути завжди однаковий зважаючи на однозначність рішення задачі позиціонування робочого органу.

Виходячи з даного алгоритму, кожне i -те зчленування маніпулятора з'єднує дві ланки $i - 1$ та i . Таким чином, наприклад, маніпулятор із шістьма ступенями свободи має сім ланок, пронумерованих від нуля до шести, де нульова ланка відповідає «землі». Оскільки останнє не відноситься безпосередньо до конструкції самого робота, незважаючи на формальну наявність семи ланок, таких роботів у російськомовній літературі називають шестиланковими.

Для розуміння логіки роботи з системами координат, прив'язаним до ланок робота, підкреслимо, що i -ая система координат жорстко пов'язується з i -й ланкою. Коли ця ланка приводиться в рух за рахунок i -го зчленування, система координат i змінює своє положення щодо попередньої системи $i - 1$.

Алгоритм складається з чотирьох кроків [10, 11]:

- вибір осей z_i ;
- вибір осей x_i ;
- вибір осей y_i ;
- вибір системи координат n .

При виборі вісі z_i , її обирають так, щоб вона збіглася з віссю обертання чи поступального руху наступного зчленування $i + 1$ залежно від його типу. Це означає, що відносне розташування суміжних ланок (систем координат) визначатиметься саме змінною навколо (або вздовж) цієї осі.

Кінематична схема маніпулятора, що моделюється складається з п'яти обертальних зчленувань. Тому, дотримуючись інструкцій, виберемо осі Z_i , що збігаються з осями обертання, як показано на рис. 3.9.

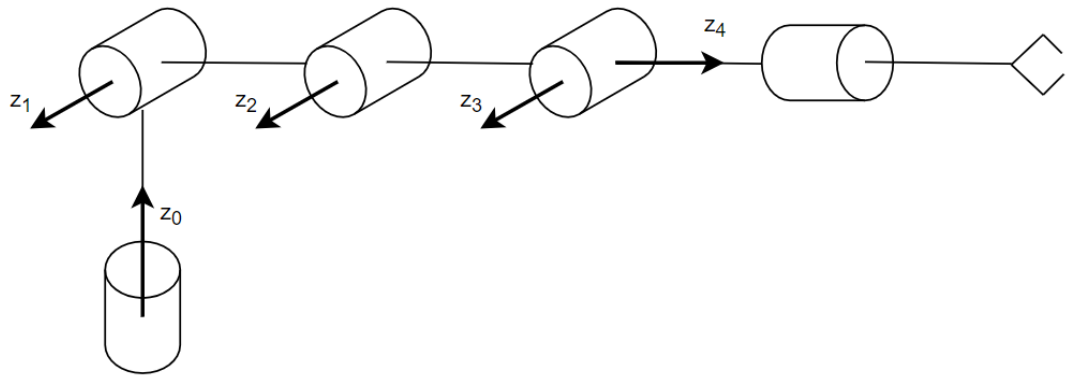


Рисунок 3.9 – Розташування осей Z відповідно ланок маніпулятора

Виберемо вісь x_i , $i = \{1, 2, \dots, n - 1\}$ так, щоб виконувались дві наступні умови:

- ось x_i перпендикулярна до осі x_{i-1} ;
- ось x_i перетинає ось z_{i-1} .

Ось x_0 можна вибрати довільно, хоча бажано, щоб у нульовій конфігурації суміжні осі x_{i-1} та x_i були спрямовані однаково, оскільки вони будуть задавати значення узагальнених координат (вздовж осей z_i), які у початковій конфігурації передбачаються нульовими. В іншому випадку необхідно буде задавати початковий поворот, щоб нівелювати до нуля.

Точка відліку систем координат визначається перетином осей z_i та x_i . У випадках, коли x_i має безліч варіантів розташування (наприклад, якщо z_i паралельні), то, відповідно, i початок координат може розташовуватися в будь-якій точці, що належить осі z_i .

Потрібно зверніть увагу на розташування осі x_3 та точки відліку третьої системи координат. Такий вибір обумовлений вказаними вище умовами, згідно з якими вісь x_3 повинна бути перпендикулярна осі z_2 і перетинати її.

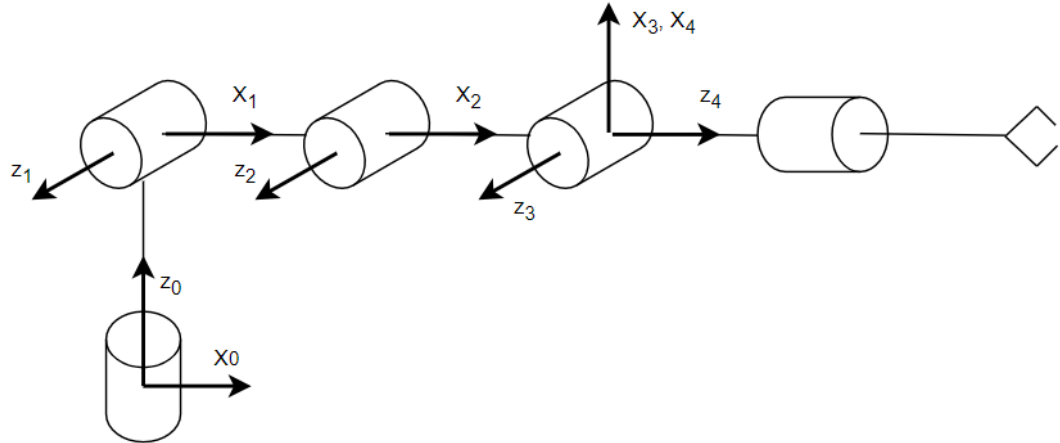


Рисунок 3.10 – Розташування осей X відповідно ланок маніпулятора

Виберемо вісь y_i так, щоб система координат, задана одиничними векторами $\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i$ була правої, тобто. у напрямку, заданому векторним добутком:

$$\vec{y}_i = \vec{z}_i \times \vec{x}_i. \quad (2.1)$$

Покажемо вибір осей y_i для аналізованого п'ятиланкового маніпулятора (рис 3.11).

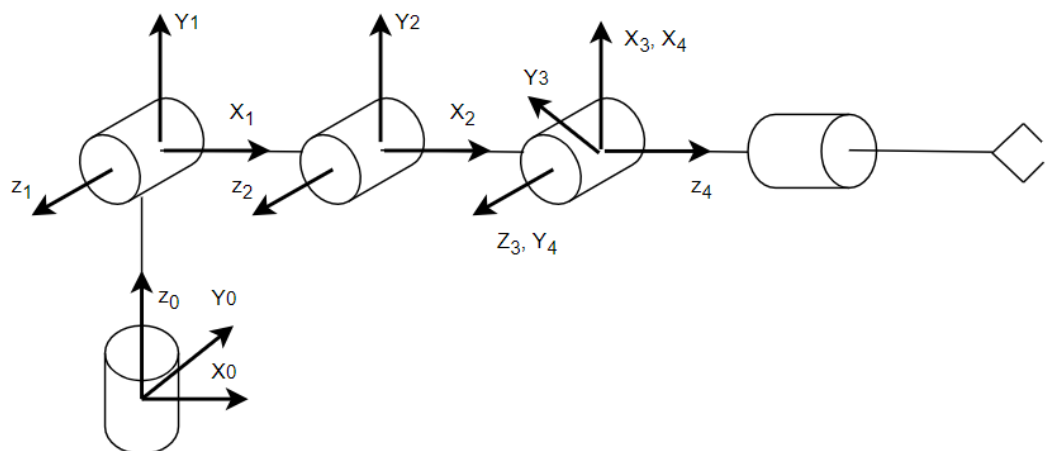


Рисунок 3.11 – Вибір осей y_i для аналізованого п'ятиланкового маніпулятора

Завершальним кроком виберемо систему координат n , пов'язану зі схватом або робочим інструментом. Для більшості сучасних роботів (у тому числі для п'ятиланкового маніпулятора, що розглядається) останнє зчленування є обертальним, через що осі z_{n-1} та z_n збігаються. В цьому випадку шукана система виходить шляхом усунення попередньої системи координат на фіксоване значення d_n вздовж осі z_{n-1} та подальшого повороту на змінний кут θ_n навколо z_{n-1} або навпаки. Покажемо вибір п'ятої системи координати маніпулятора, що розглядається (рис. 3.12).

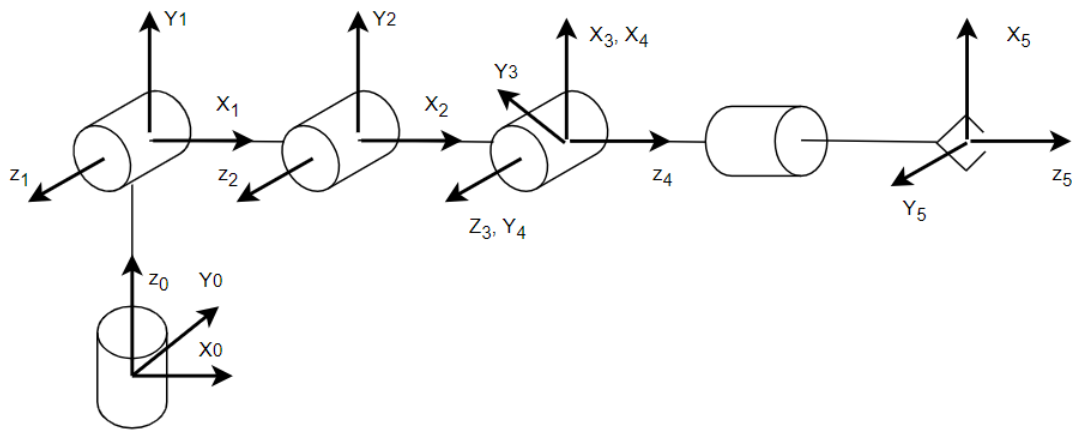


Рисунок 3.12 – Вибір п'ятої системи координати маніпулятора

Метод Денавіта-Хартенберга [10, 11] дозволяє скоротити кількість координат, однозначно визначальних тіло (систему координат) у просторі, з п'яти до чотирьох, відомих як параметри Денавіта-Хартенберга:

- a_i – відстань уздовж осі x_i від z_{i-1} до z_i ;
- α_i – кут навколо осі x_i від z_{i-1} до z_i ;
- d_i – відстань уздовж осі z_{i-1} від x_{i-1} до x_i ;
- θ_i – кут навколо осі z_{i-1} від x_{i-1} до x_i .

Параметри a_i та α_i визначаються навколо поточних осей x_i , а параметри d_i та θ_i – навколо попередніх осей z_{i-1} .

Параметри a_i та α_i завжди є константами для всіх кінематичних схем та обумовлені конструкцією маніпуляторів. Що стосується параметрів d_i та θ_i , що залишилися, серед них тільки один параметр є постійним, а інший – змінним залежно від типу зчленування: у разі обертового – кут θ_i змінний, зміщення d_i постійне, у разі поступального – навпаки.

В таблиці 3.1 наведені параметри Денавіта-Хартенберга для п'ятиланкового маніпулятора.

Таблиця 3.1 – параметри Денавіта-Хартенберга для п'ятиланкового маніпулятора

Ланка, i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\frac{\pi}{2}$	d_1	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	0	0	0	$\theta_3 + \frac{\pi}{2}$
4	0	$\frac{\pi}{2}$	d_4	θ_4
5	0	0	d_5	θ_5

Визначення параметрів a_i (рис. 3.13)

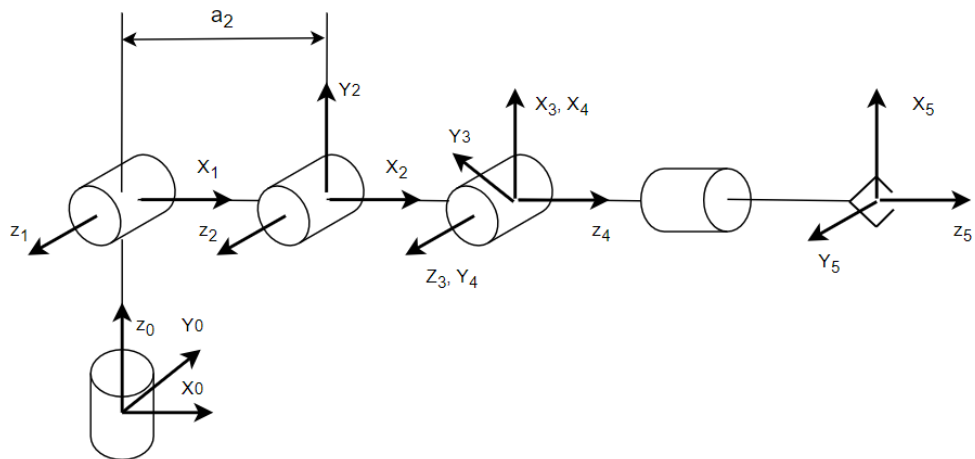


Рисунок 3.13 – Визначення кутів a_i

В аналізованому прикладі є лише один ненульовий параметр a_2 , що відповідає довжині другої ланки (рис. 3.13).

Визначення кутів α_i (рис. 3.14).

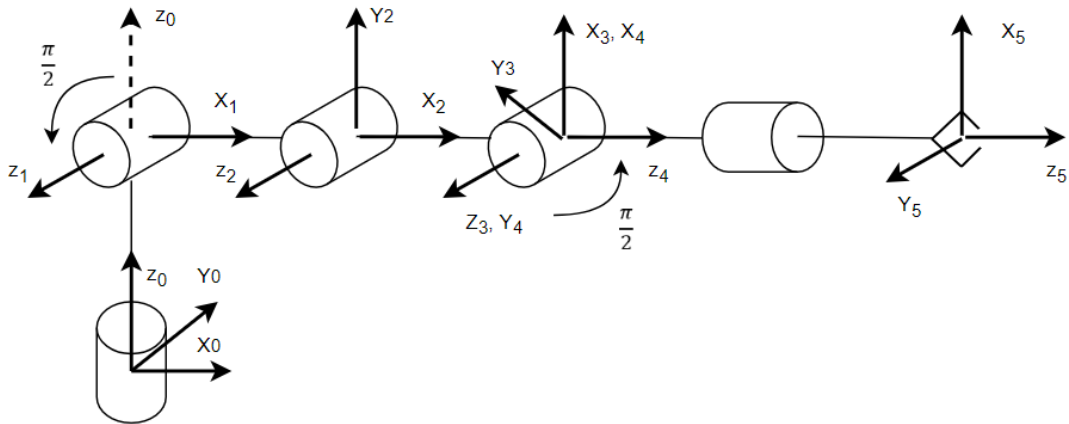


Рисунок 3.14 – Визначення кутів α_i

Ненульові кути α_1 та α_4 (рис. 3.14). При визначенні їх важливо враховувати знаки, які залежать від напрямку обертання. Позитивний напрямок легко визначається за допомогою правила правої руки.

Визначення параметрів d_i (рис. 3.15).

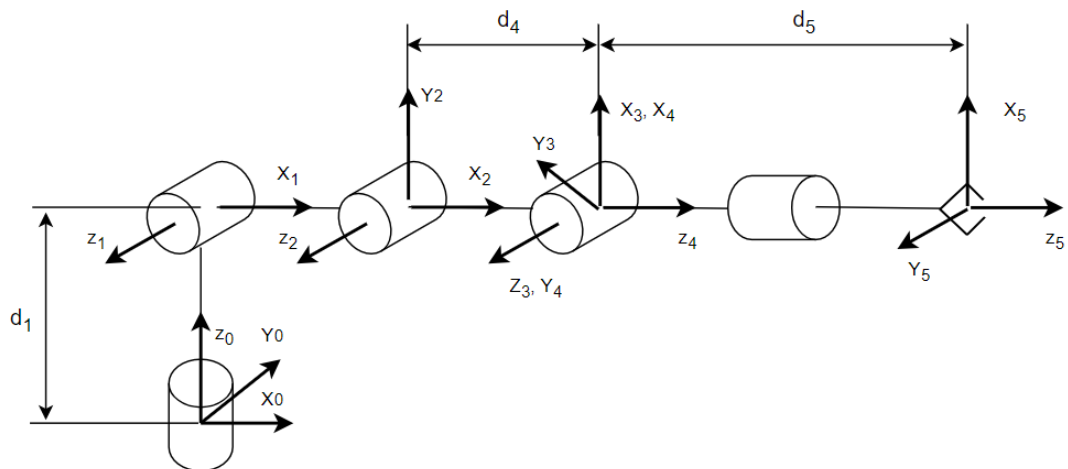


Рисунок 3.15 – Визначення параметрів d_i

Лінійні зсуви d_1, d_4, d_4 (рис. 3.15). Оскільки всі зчленування маніпулятора є обертальними, ці параметри є постійними.

Визначення параметрів θ_i (рис. 3.16).

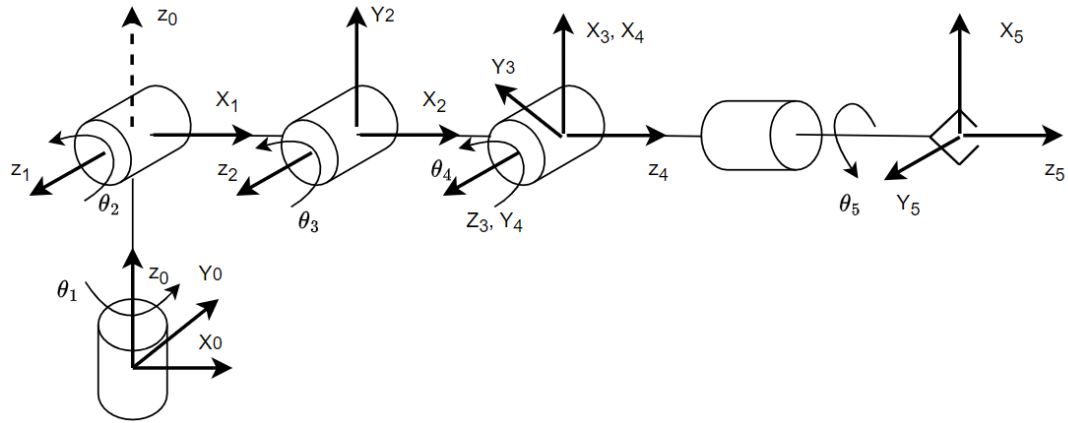


Рисунок 3.16 – Визначення параметрів θ_i

Кути $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ є узагальненими координатами, тобто. змінними величинами. Для моделювання ми прийняли зображене розташування ланок (і пов'язаних із ними систем координат) за нульову конфігурацію. Це означає, що всі узагальнені координати для такого положення маніпулятора є нульовими. Якщо звернути увагу до суміжні осі x_i , майже всі вони будуть співнаправлені, крім пари x_2 і x_3 . Між ними утворюється прямиий кут, який необхідно додати до θ_3 , щоб нівелювати це відносне розташування до нуля.

3.3 Висновки по третьому розділу

В результаті виконання третього розділу кваліфікаційної роботи виконано моделювання конструкції заданого типу багатоланкового маніпулятора. Для цього виконано аналіз конструкції макету багатоланкового промислового маніпулятора, наведена його структурна схема. Описані основні

конструкційні елементи пристрою для проведення подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

Виконано синтез кінематичної схеми багатоланкового маніпулятора. Кінематична схема маніпулятора, що моделюється складається з п'яти обертальних зчленувань. Для синтезу кінематичної схеми використано алгоритм присвоєння систем координат, описаний Денавітом-Хартенбергом. В результаті моделювання отримані необхідні параметри Денавіта-Хартенберга для п'ятиланкового маніпулятора, що дає змогу реалізувати систему автоматичного регулювання для управління роботою даного пристрою.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Розробка структури та алгоритму роботи програми

Програма для моделювання кінематики багатоланкового промислового маніпулятора призначена для побудови кінематичної схеми пристрою будь-якої складності. За допомогою даного інструменту можна визначити кути оберту всіх ланок маніпулятора для подальшого програмування роботи реального пристрою. Також можна задати геометричні параметри ланок, наприклад її довжини. Програма дозволяє гнучко моделювати положення суглобів багатоланкового маніпулятора за заданим зображенням роботизованого пристрою.

Структурна схема програми (рис. 4.1).

Основою для моделювання кінематики багатоланкового промислового робота слугує кінематична пристрою або його графічне зображення. За допомогою модуля редагування кінематичної схеми оператор-дослідник може розташовувати на або на тлі зображення, або на звичайному графічному полі суглоби роботу.

Кожен суглоб можна додавати, редагувати його положення та видаляти з моделі. Всі суглоби поєднуються рухомими ланками. Оператор може самостійно задавати довжину будь якої ланки.

Після створення кінематичної схеми засовується програмний модуль для аналізу побудованої моделі для визначення кутів оберту кожної ланки відносно попередньої точки з'єднання.

Таким чином оператор отримує набір необхідних значень всіх кутів оберту ланок маніпулятора для подільного програмування реального пристрою.

Всі поточні координати розташування суглобів запам'ятовуються у відповідній таблиці для оброблення.

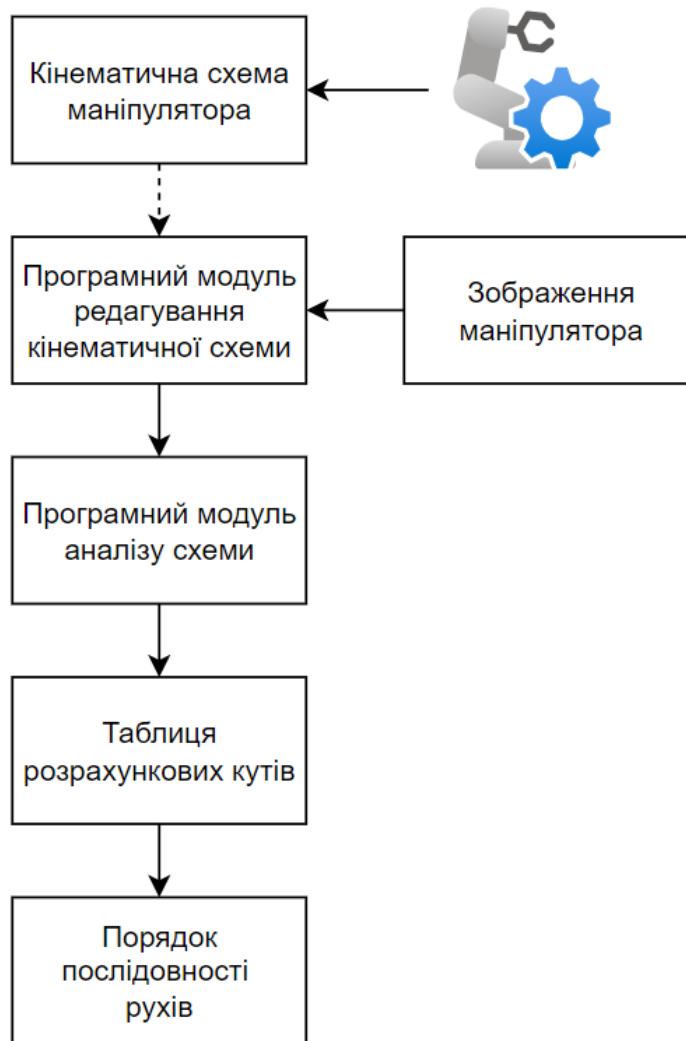


Рисунок 4.1 – Структурна схема програми для моделювання кінематики багатоланкового промислового маніпулятора

Програма розроблена таким чином, що оператор може створювати сценарії динамічної поведінки маніпулятора в часі. Таким чином, можливе створення анімації рухів ланок маніпулятора в реальному часі. Така функція може бути корисна при моделюванні послідовності переміщення робочого органу пристрою для досягнення певних точок в виробничому просторі.

Алгоритм роботи програми (рис. 4.2).

Робота програми починається з аналізу завдання у вигляді кінематичної схеми. За допомогою графічних інструментів вводиться розташування суглобів маніпулятора.

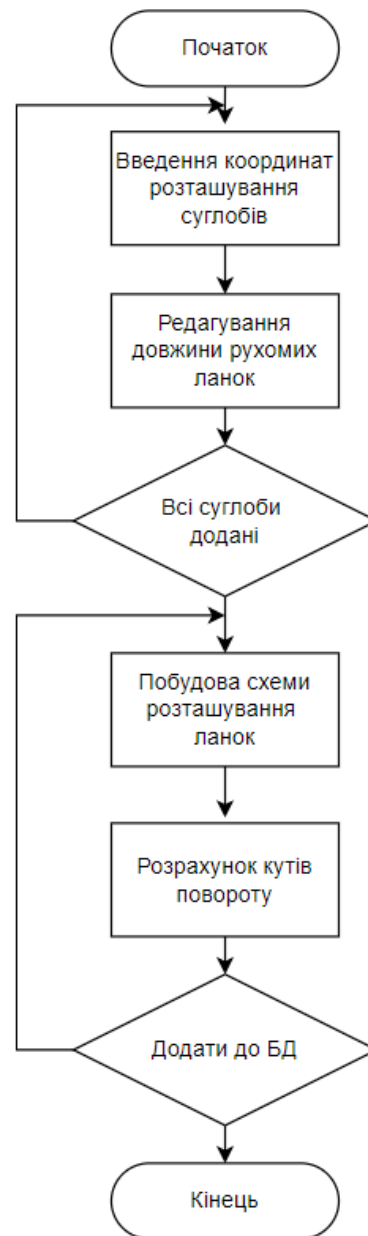


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи програми

Координати вводять за допомогою вказівника миші. В подальшому їх можна буде редагувати простим перетягуванням на інше місце розташування.

Далі відбувається редагування довжини ланок маніпулятора. Це робиться на основі даних від функції визначення дистанції між опорними точками кінематичної схеми.

На кожному кроці відбувається перевірка, чи всі суглоби розташовані в потрібних місцях. При необхідності новий суглоб може бути додано до схеми, а також згодом видалений.

Після побудови кінематичної схеми вступає в роботу програмна функція визначення кутів оберту рухомих ланок. Визначений кут може бути як позитивний, так і негативний. Це значить, що двигуну потрібно включатись або за годинниковою стрілкою, або проти неї.

Всі розраховані координати зберігаються в базі даних. Також можна зберегти повну кінематичну схему на будь якому етапі. Таким чином будується послідовність станів в яких можуть знаходитись суглоби та ланки маніпулятора.

За допомогою даного програмного засобу можливо моделювати кінематичну схему бідь якої складності, та кількості рухомих ланок.

4.2 Розробка структури бази даних

Для зберігання даних про розташування суглобів та довжини рухомих ланок розроблена відповідна структура бази даних. Схема структури бази даних (рис. 4.3).

В наведеній структурі можна виділити наступні сутності:

- набір координат розташування суглобів;
- список позицій (станів);
- список моделей;
- таблиця для зберігання точок для кожної сцени.

Набір координат розташування суглобів – це основна таблиця бази даних. В неї зберігаються поточні координати опорних точок кінематичної схеми.

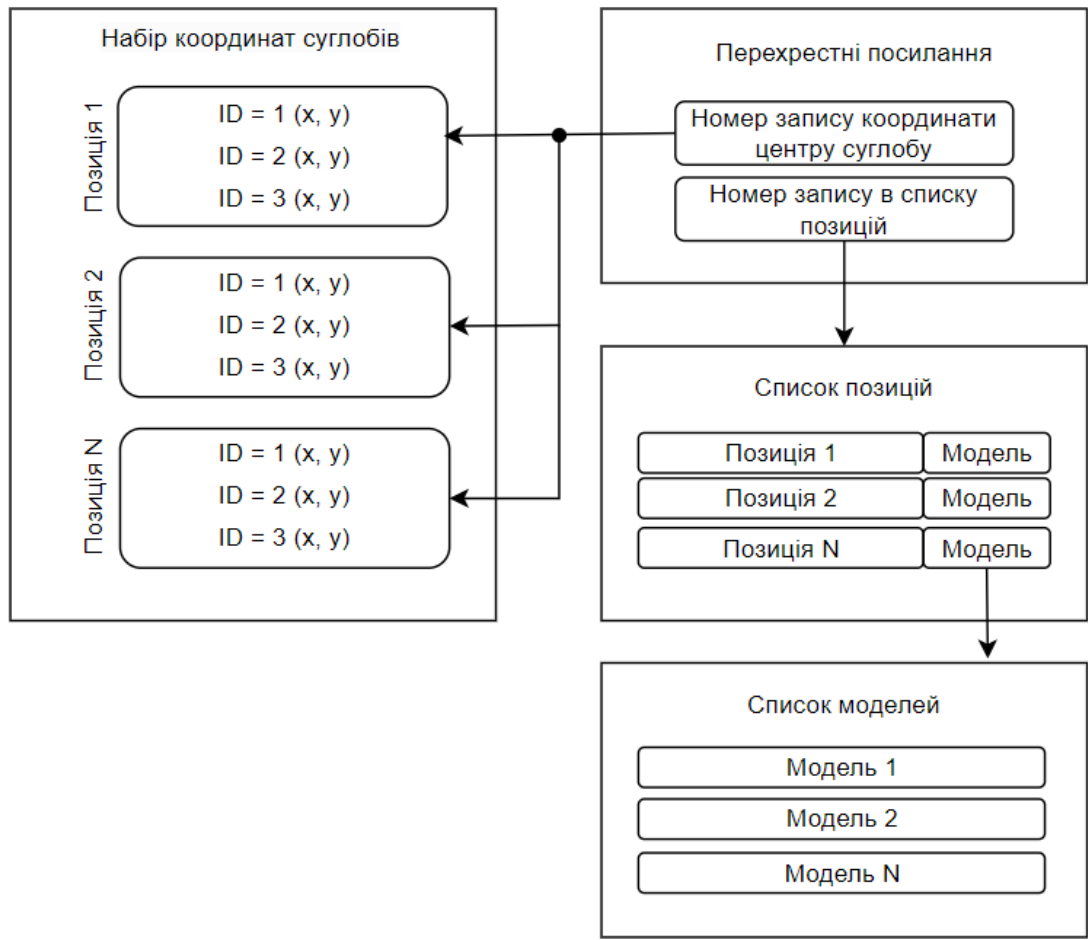


Рисунок 4.3 – Структура бази даних

Приклад структури таблиці «Набір координат розташування суглобів» (рис. 4.4).

В даній таблиці передбачені наступні поля:

- `ID_Point`, що призначено для зберігання унікального ідентифікатора запису в даній таблиці. Це поле є первинним ключем та всі записи в ньому є унікальними;

- `idPoint` – номер суглоба в кінематичній схемі. Кожен суглоб має свою унікальну позицію в схемі і потрібно зберігати порядок її розташування для правильного з'єднання суглобів рухомими ланками;

- `idPointToConnect` – номер суглоба до якого приєднується поточна ланка;

- idPointFromConnect – номер попереднього суглоба від якого йде поточна ланка;
- namePoint – робоче поле для зберігання назви суглоба в схемі, наприклад «Базовий суглоб»;
- top – координата Y розташування суглоба на схемі;
- left – координата X розташування суглоба на схемі.

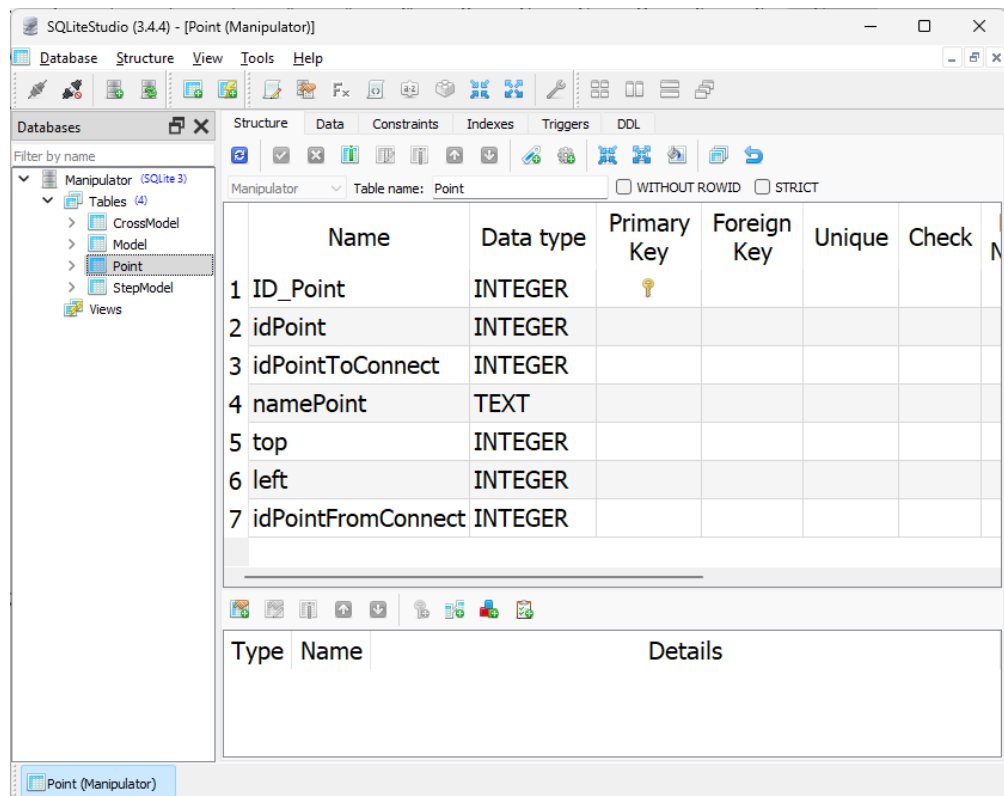


Рисунок 4.4 – Структура таблиці «Набір координат розташування суглобів»

Таблиця «список позицій» має структуру (рис. 4.5).

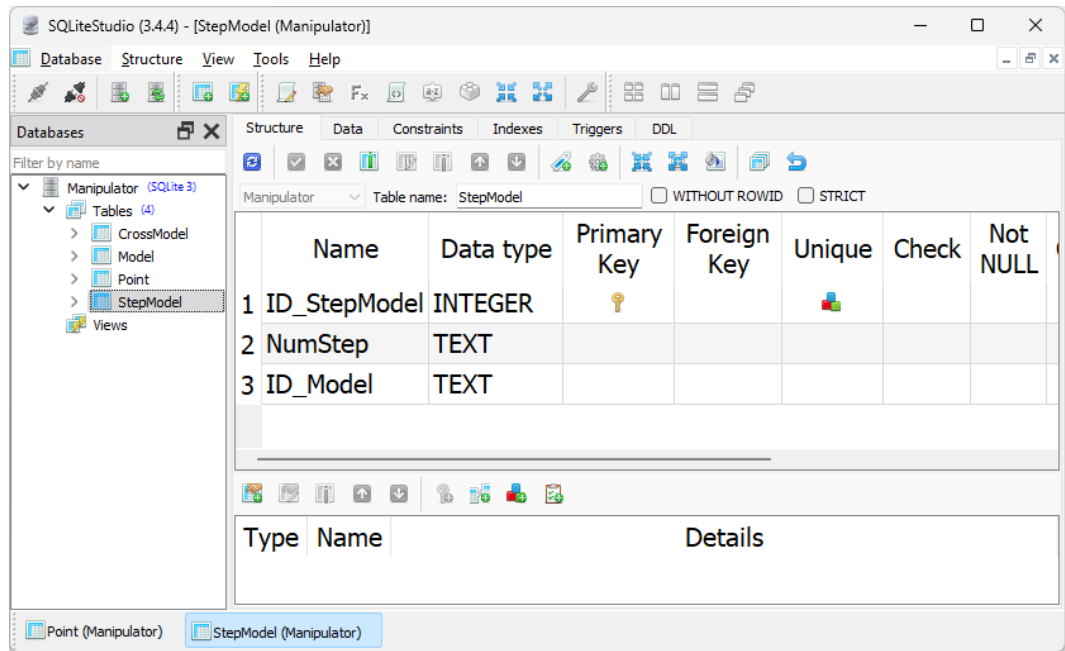


Рисунок 4.5 – Структура Таблиця «Список позицій»

В даній таблиці передбачено три поля:

- ID_StepModel – унікальний номер запису в таблиці;
- NumStep – номер позиції в динамічній послідовності станів кінематичної схеми;
- ID_Model – посилання на таблицю з певною кінематичною моделлю багатоланкового маніпулятора.

Таблиця з переліком моделей має наступну структуру (рис. 4.6).

В даній таблиці передбачено два поля:

- ID_Model – унікальне поле, що є первинним ключем. В даному полі зберігається унікальний номер запису, що характеризує певну кінематичну модель багатоланкового маніпулятора;
- NameModel – текстове поле якому зберігається назва конкретної моделі.

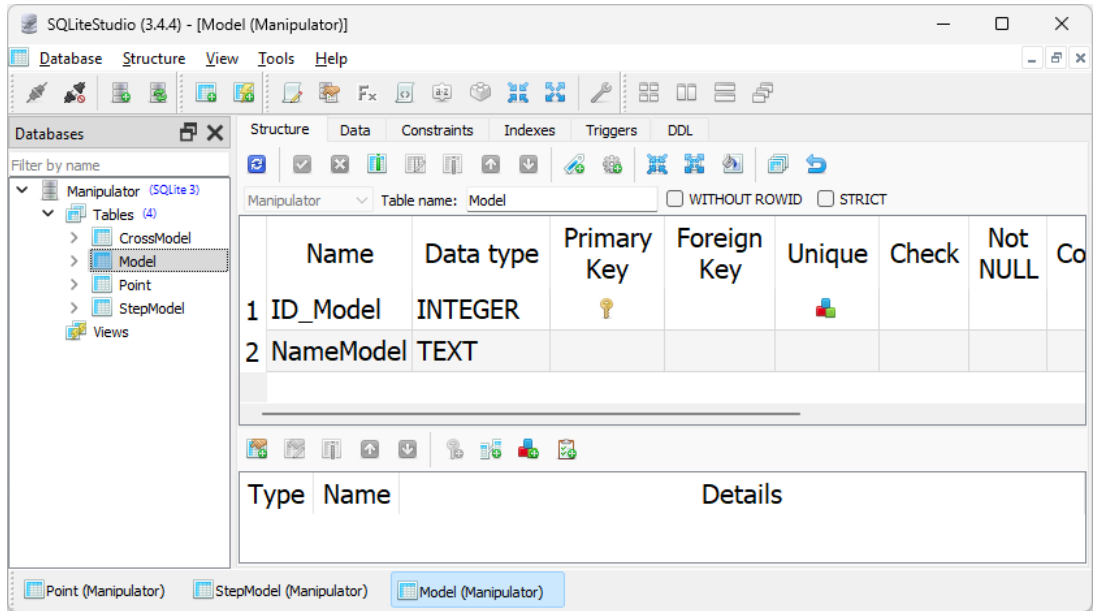


Рисунок 4.6 – Структура таблиці «Список моделей»

Структура таблиці «CrossModel» (рис. 4.7)

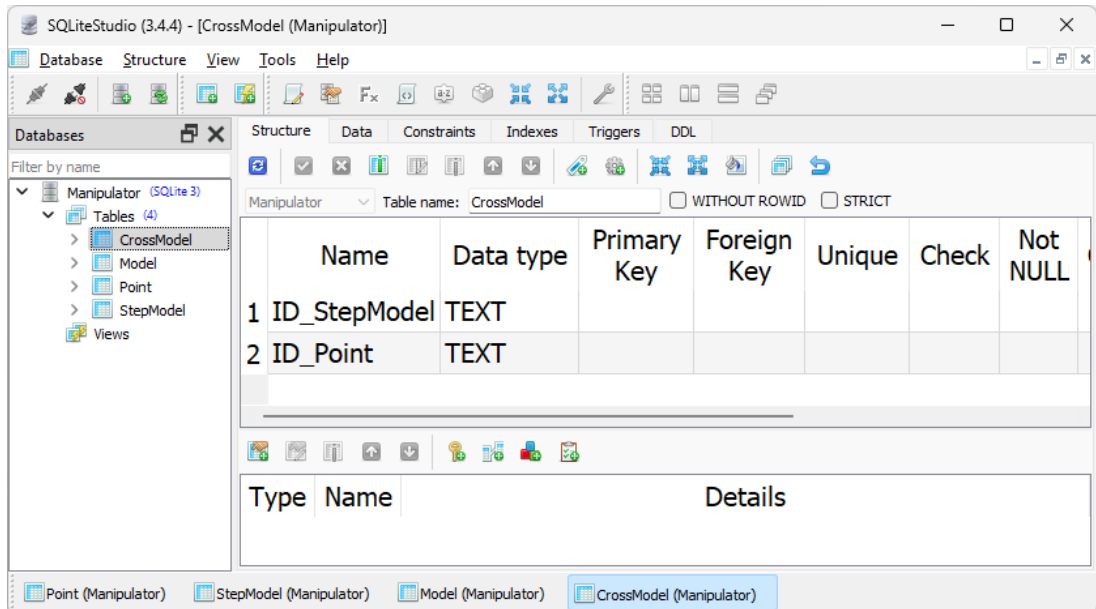


Рисунок 4.7 – Структура таблиці «CrossModel»

Дана таблиця призначена для зберігання перехресних посилань з таблиці розташування точок на кінематичній моделі маніпулятора на таблицю з описом певної моделі.

Таблиця CrossModel реалізує зв'язок багато-до-багатьох. Даний тип зв'язку не може бути реалізовано безпосередньо між двома таблицями, тому потрібно додавати до структури бази даних спеціальну таблицю з перехресними зв'язками.

Дана структура реалізована в СУБД SQLite. SQLite – це вбудована реляційна система управління базами даних, яка підходить для реалізації невеликих програм, таких як програми, що створюються за допомогою Windows Forms. Однією з основних переваг SQLite є те, що вона не вимагає окремого сервера для роботи з базою даних – всі дані зберігаються в одному файлі на диску, і база даних працює безпосередньо всередині програми. Це значно спрощує розгортання програми та скорочує витрати на налаштування та підтримку бази даних.

4.3 Опис розробленої програми

Для проведення експериментальних досліджень була розроблена програма засобами Visual Studio від фірми Microsoft. Для розробки програми використовувалась модель Windows Form.

Windows Forms (WinForms) – це платформа для створення графічних інтерфейсів в додатках мовою програмування C#. Вона дозволяє розробникам створювати настільні програми для операційної системи Windows за допомогою візуальних елементів керування, таких як вікна, кнопки, текстові поля, списки та інші компоненти.

Основний елемент моделі Windows Forms – це форма, яка є головним вікном програми та контейнером для інших елементів керування. Форма створюється як об'єкт, що наслідує клас System.Windows.Forms.Form, і на ній

розміщуються елементи інтерфейсу, такі як кнопки, мітки, поля введення та інші компоненти.

Кожен елемент управління на формі є об'єктом певного класу, який відповідає за виконання конкретної функції. Наприклад, кнопка створюється за допомогою класу `Button`, текстове поле – за допомогою класу `TextBox`, мітка – за допомогою класу `Label`. Ці елементи керування можна налаштовувати, змінюючи їх властивості, такі як розмір, колір, текст, положення форми та інші параметри.

Модель `Windows Forms` підтримує обробку подій, що дозволяє реалізовувати інтерактивність програми. Події – це дії, які відбуваються при взаємодії користувача з елементами інтерфейсу. Саме і реалізовано в даній програмі для динамічного редагування положення суглобів на схемі.

Головний інтерфейс програми (рис. 4.8).

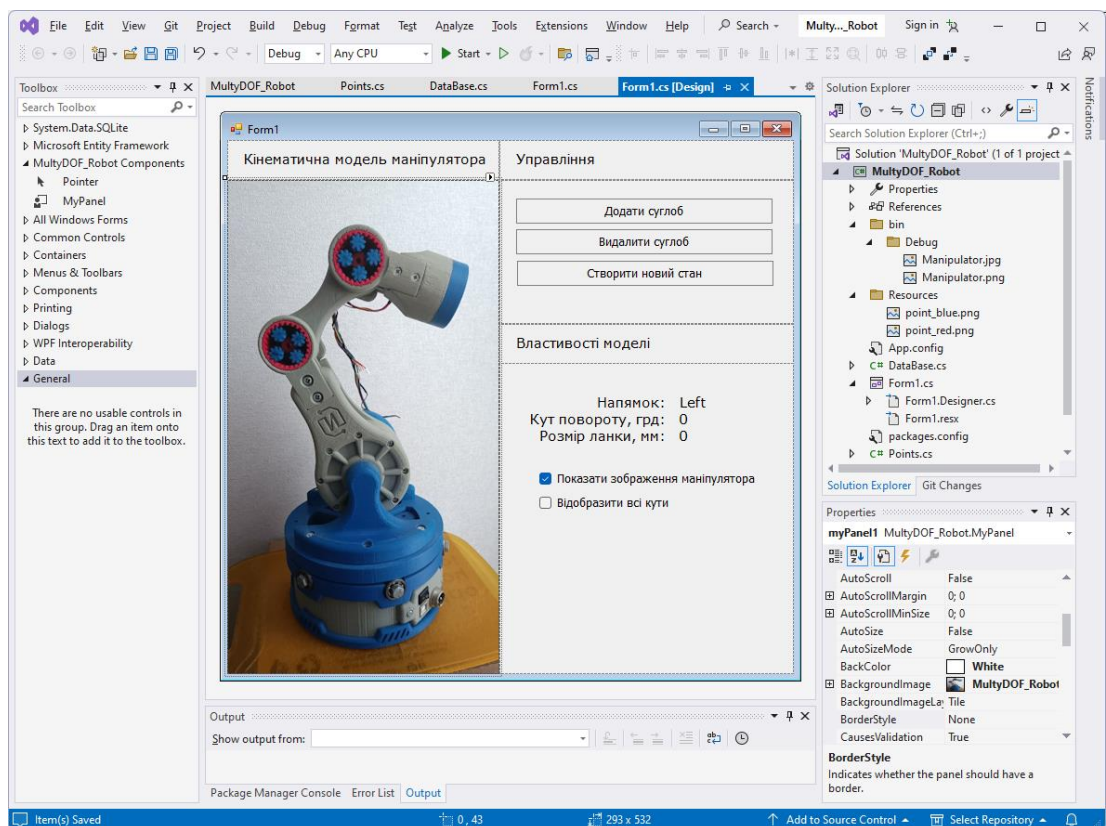


Рисунок 4.8 – Головний інтерфейс програми

Головний інтерфейс програми містить поле для введення графічного зображення маніпулятора та побудови кінематичної схеми.

Справа от вікна редагування кінематичної схеми знаходиться область управління та відображення параметрів схеми.

В області управління передбачені три кнопки:

- додавання нового суглоба;
- видалення поточного суглоба;
- створення нового стану на основі поточного розташування суглобів маніпулятора та рухомих ланок.

В області відображення параметрів схеми показуються властивості поточного елемента схеми. В даній області відображаються:

- напрямок кута повороту;
- кут повороту в градусах відносно поточного суглоба;
- розмір рухомої ланки в мм.

Також в даній області є два компонента, завдяки яким можна управляти режимом відображення кінематичної схеми:

- перемикач для включення або вимкнення зображення маніпулятора, що використовується для переходу в «чистий» режим відображення кінематичної схеми;
- перемикач відображення всіх розрахованих кутів на схемі.

Для додавання нового суглоба на кінематичну схему використовується обробник події натискання на відповідну кнопку в інтерфейсі програми. Зобразімо фрагмент даної функції (рис. 4.9).

Коли користувач натискає кнопку, створюється новий об'єкт класу `Points`, який представляє новий суглоб на кінематичній схемі. Спочатку новій точці присвоюються початкові координати (x та y), а також унікальний ідентифікатор `idPoint`, який дорівнює поточному значенню змінної `maxPointNum` плюс одиниця. Поле `idPointFromConnect` зберігає ідентифікатор попередньої точки.

Після цього нова точка додається до діаграми шляхом виклику функції `addPoint(newPoint)`. Потім формується SQL-запит для додавання нової точки до бази даних за допомогою оператора `INSERT INTO`, який додає властивості нової точки, такі у відповідну таблицю бази даних.

```
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Points newPoint = new Points();
    newPoint.left = 10;
    newPoint.top = 10;
    newPoint.idPoint = maxPointNum + 1;
    newPoint.idPointFromConnect = maxPointNum;
    addPoint(newPoint);

    String sql = String.Format("Insert Into Point (idPoint, idPointToConnect, " +
        "idPointFromConnect, namePoint, top, left) " +
        "values ('{0}', '{1}', '{2}', '{3}', '{4}', '{5}']",
        newPoint.idPoint, newPoint.idPointToConnect, newPoint.idPointFromConnect,
        newPoint.namePoint, newPoint.top, newPoint.left);
    DataBase.Exec_SQL(sql);

    //Update to point
    Points fromPoint = getPointByID(maxPointNum);
    fromPoint.idPointToConnect = maxPointNum + 1;

    String sql_toPoint = String.Format("Update Point set idPointToConnect = '{0}' " +
        "where idPoint = '{1}';", newPoint.idPoint, fromPoint.idPoint);
    DataBase.Exec_SQL(sql_toPoint);

    maxPointNum++;

    updateAnglePointFrom(fromPoint);
    drawPoint();
}
```

Рисунок 4.9 – Фрагмент функції обробки події натискання на кнопку додавання нового суглобу

Наступним кроком є отримання параметрів попереднього суглоба, до якого приєднується новий суглоб. Це робиться за допомогою функції `getPointByID(maxPointNum)`. Для цього суглобу значення поля `idPointToConnect` вказує на координати нового суглобу. Для його формується інший SQL-запит `Update`, який оновлює відповідний запис у базі даних, змінюючи поле `idPointToConnect`.

Після додавання нової точки змінна `maxPointNum` збільшується на одиницю, щоб потім можна було використовувати її для додавання наступного

суглоба. Далі викликається функція `updateAnglePointFrom`, яка поточний оновлює кут між суглобами маніпулятора.

Функція `drawPoint()` перерисовує зображення кінематичної схеми на екрані комп'ютера.

Основною функцією програми є метод відображення кінематичної схеми на основі даних, що збережені у базі даних (рис. 4.10).

```
private void myPanell_Paint(object sender, PaintEventArgs e)
{
    e.Graphics.SmoothingMode = System.Drawing.Drawing2D.SmoothingMode.AntiAlias;

    foreach (Points p in points)
    {
        if (p.idPointFromConnect > 0)
        {
            //get center point_A
            int xA = p.left + 16;
            int yA = p.top + 16;

            //get center point_B
            Points pB = getPointByID(p.idPointFromConnect);
            if (pB != null)
            {
                int xB = pB.left + 16;
                int yB = pB.top + 16;

                //draw line
                Pen connectPen = new Pen(Color.Yellow, 10);
                if (!checkBox2.Checked) connectPen = new Pen(Color.Gray, 10);
                e.Graphics.DrawLine(connectPen, xA, yA, xB, yB);
            }
        }
        if (isDrawAllAngle)
        {
            angleRotate = getAngleRotate(p);
            drawAngle(e.Graphics, p, angleRotate);
        }
        else
        {
            if (p.idPoint == selectPointID)
            {
                angleRotate = getAngleRotate(p);
                drawAngle(e.Graphics, p, angleRotate);
                label6.Text = String.Format("{0}", Math.Round(angleRotate, 2).ToString());
                if (angleRotate < 0) label5.Text = "Left";
                else label5.Text = "Right";
                //label12.Text = selectPointID.ToString();
            }
        }
    }
}
```

Рисунок 4.10 – Метод відображення кінематичної схеми на основі даних, що збережені у базі даних

Дана функція відповідає за відображення кінематичної схеми в основному вікні програми, використовуючи графічні можливості .NET. Вона виконується при викликанні події оновлення зображення панелі інтерфейсу. Основне призначення даної функції – нарисувати з'єднання між суглобами робота і відобразити розраховані кути повороту ланок. Ця інформація надалі використовується при написанні технологічної програми керування рухом маніпулятора.

На початку роботи функції встановлюється режим згладжування елементів зображення за допомогою властивості `SmoothingMode`, що робить лінії та інші графічні елементи більш плавними.

Далі йде цикл для обробки колекції точок, кожна з яких є об'єктом класу `Points`. Якщо у поточної точки встановлено з'єднання з іншою точкою, то обчислюються координати центру поточного суглоба та точки центру суглоба, з яким вона з'єднана. Для визначення координат центрів використовується властивість `idPointFromConnect`, яка має бути більшою за нуль.

Для поточної точки, наприклад, точка *A*, розраховуються координати x_A та y_A . Потім для точки *B*, з якою з'єднана точка *A*, викликається функція `getPointByID`, щоб отримати її властивості. Якщо точка *B* знайдена, також обчислюються і її координати x_B та y_B .

Далі будується лінія, що з'єднує точки *A* та *B*. Колір та товщина лінії задаються об'єктом класу `Pen`. Якщо елемент інтерфейсу `checkBox2` не позначений, лінія малюється сірим кольором, інакше жовтим. Компонент `checkBox2` дає можливість оператору включати або виключати відображення зображення маніпулятора, схема якого будується.

Далі функція перевіряє умову, чи потрібно будувати кути повороту ланок маніпуляторп. Якщо змінна `isDrawAllAngle` встановлена в `true`, для кожної точки обчислюється кут повороту за допомогою функції `getAngleRotate`, а потім цей кут відображається за допомогою функції `drawAngle`.

Якщо кути повороту не потрібно показувати, то перевіряється, чи вибрано поточний суглоб. Якщо такий суглоб знайдено, то обчислюється поточний кут повороту та відображається на панелі. При цьому текстові мітки label5 та label6 на формі програми оновлюють інформацією про поточний напрямок обертунів двигунів маніпулятора та величину кута. Кут округляється до двох знаків після коми та виводиться у label6. Якщо кут негативний, напрямок повороту вважається "вліво", якщо позитивний – "вправо", і це значення виводиться в label5.

4.4 Експериментальні дослідження

Виконаємо експериментальні дослідження для обраного типу маніпулятора. Покажемо завантажене зображення багатоланкового маніпулятора, схема якого моделюється (рис. 4.11).

Можна бачити побудовані зв'язки між вказаними центрами суглобів маніпулятора (рис. 4.11). Кожен суглоб можна вільно переміщувати у вікні редактора, тим самим змінюючи довжину з'єднувальних ланок у відповідності до заданої конструкції пристрою.

На схемі, показані розраховані кути повороту кожного суглобу (рис. 4.11).

При обиранні будь якого суглобу в інформаційній панелі відображається поточне значення кута повороту із зазначенням напрямку повороту.

Також відображається виміряна довжина рухомої ланки, що може знадобитися для виконання подальших досліджен.

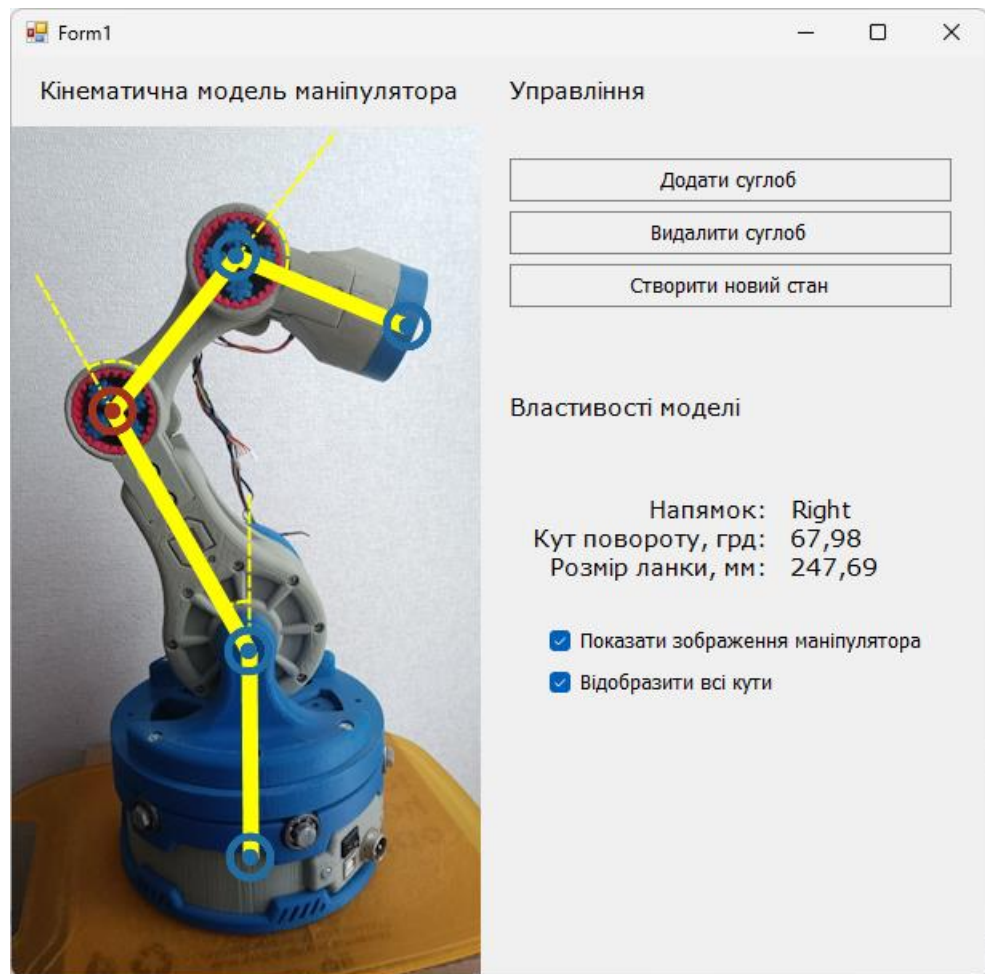
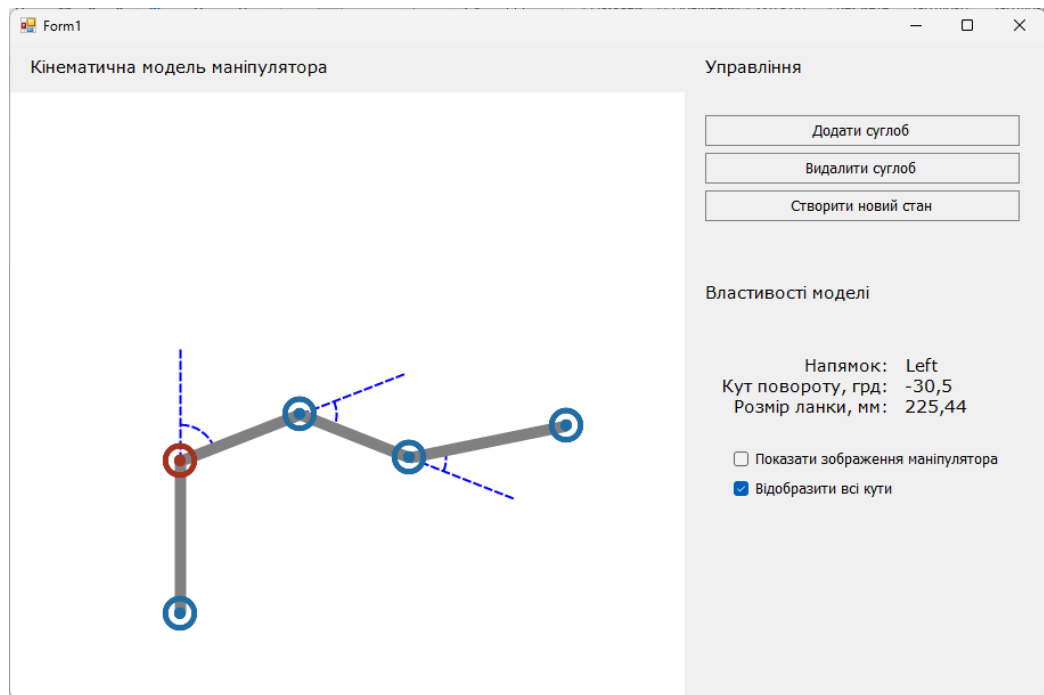
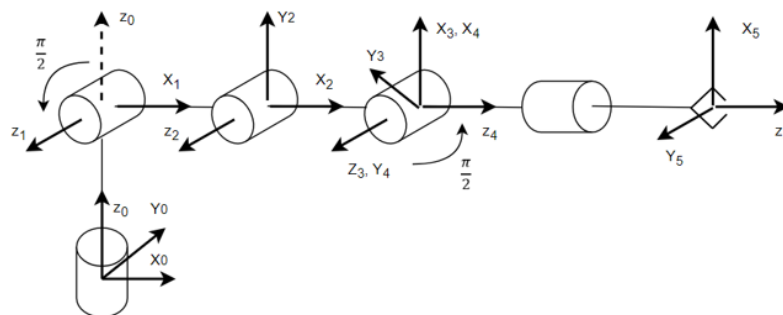


Рисунок 4.11 – Моделювання кінематичної схеми маніпулятора

Показано вигляд схеми, що дозволяє побудувати розроблена програма (рис. 4.12, а). Для порівняння, показана теоретично побудована кінематична схема для того ж самого багатоланкового маніпулятора (рис. 4.12, б).



а)



б)

Рисунок 4.12 – а) Побудована розробленою програмою кінематична схема багатоланкового маніпулятора, б) теоретично побудована кінематична схема багатоланкового маніпулятора.

Таким чином, розроблена програма дозволяє пришвидшити процес моделювання положення ланок маніпулятора в просторі та прискорити виконання задачі розрахунку кутів повороту кожної рухомої ланки для будь якого їх положення.

4.5 Висновки по четвертому розділу

В результаті виконання четвертого розділу кваліфікаційної роботи виконано розроблення структурної схеми програми для моделювання кінематики багатоланкового промислового маніпулятора. Розроблено алгоритм роботи програми та описані його основні функції.

Для зберігання даних про розташування суглобів та довжини рухомих ланко розроблена відповідна структура бази даних. Схема структури бази даних складається з чотирьох таблиць. Дана структура реалізована в СУБД SQLite.

Для проведення експериментальних досліджень була розроблена програма засобами Visual Studio від фірми Microsoft. Для розробки програми використовувалась модель Windows Form. Програма розроблена таким чином, що оператор може створювати сценарії динамічної поведінки маніпулятора в часі.

Розроблена програма дозволяє пришвидшити процес моделювання положення ланок маніпулятора в просторі та прискорити виконання задачі розрахунку кутів повороту кожної рухомої ланки для будь якого їх положення.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз завдання і кінематичних схем маніпуляторів показав переваги та недоліки існуючих конструкцій. Багатоланкові маніпулятори мають низку переваг перед традиційними маніпуляторами, які роблять їх більш ефективними та універсальними у використанні.

Виконано аналіз предметної області та принципів застосування промислових роботів маніпуляторів. Виконано аналіз завдання на проектування багатоланкової конструкції промислового маніпулятора. Наведені приклади промислових багатоланкового маніпуляторів та приклад кінематики багатоланкових маніпуляторів. Розглянуто приклад структурної схеми системи керування багатоланковим маніпулятором на рухомій платформі.

Виконана класифікація за типом конструкції і функції маніпуляторів та промислових роботів. Розглянуті основні типи кінематичних схем маніпуляторів, що застосовуються на виробництві. Також проведено аналіз особливостей конструкцій багатоланкових маніпуляторів на прикладі промислової роботи фірми Kawasaki.

В результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи розроблення структурної схеми системи управління багатоланковим маніпулятором. Описано процес синтезу системи автоматичного управління суглобами маніпулятора. Наведена функціональна схема управління мехатронними пристроями.

Записані необхідні передатні функції для побудови функціональної схеми моделювання системи управління суглобами маніпулятора. Отримано математичну модель обертового зчленування у вигляді передавальної функції $\theta(s)$.

В результаті виконання третього розділу кваліфікаційної роботи виконано моделювання конструкції заданого типу багатоланкового маніпулятора. Для цього виконано аналіз конструкції макету багатоланкового промислового маніпулятора, наведена його структурна схема. Описані основні конструкційні елементи пристрою для проведення подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

Виконано синтез кінематичної схеми багатоланкового маніпулятора. Кінематична схема маніпулятора, що моделюється складається з п'яти обертальних зчленувань. Для синтезу кінематичної схеми використано алгоритм присвоєння систем координат, описаний Денавітом-Хартенбергом. В результаті моделювання отримані необхідні параметри Денавіта-Хартенберга для п'ятиланкового маніпулятора, що дає змогу реалізувати систему автоматичного регулювання для управління роботою даного пристрою.

В результаті виконання четвертого розділу кваліфікаційної роботи виконано розроблення структурної схеми програми для моделювання кінематики багатоланкового промислового маніпулятора. Розроблено алгоритм роботи програми та описані його основні функції.

Для зберігання даних про розташування суглобів та довжини рухомих ланко розроблена відповідна структура бази даних. Схема структури бази даних складається з чотирьох таблиць. Дана структура реалізована в СУБД SQLite.

Для проведення експериментальних досліджень була розроблена програма засобами Visual Studio від фірми Microsoft. Для розробки програми використовувалась модель Windows Form. Програма розроблена таким чином, що оператор може створювати сценарії динамічної поведінки маніпулятора в часі.

Розроблена програма дозволяє пришвидшити процес моделювання положення ланок маніпулятора в просторі та прискорити виконання задачі розрахунку кутів повороту кожної рухомої ланки для будь якого їх положення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 55 с..

3. Кафедра технології та автоматизації виробництва РЕЗ та ЕОЗ [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www/](http://www.nure.ua) URL: https://tapr.nure.ua/wp-content/uploads/2020/12/buklet_17-30.pdf

4. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.

5. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf.

6. Положення про протидію академічному плагіату в Харківському національному університеті радіоелектроніки [Електронний ресурс] : наказ ректора ХНУРЕ від 28.04.2017 р. № 290 // Нормативно-правова база ХНУРЕ : офіційний веб-портал. – Режим доступу: <https://nure.ua/universytet/normativno-pravova-baza#id13>. – Станом на 18.09.2024. – Назва з екрану.

7. Toward fully autonomous mobile manipulation for industrial environments / A. Dömel et al. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017. Vol. 14, no. 4. P. 172988141771858. URL: <https://doi.org/10.1177/1729881417718588> (date of access: 29.10.2024).

8. 10 Industrial Robotic Arms Manufacturers | Blog | DIY Robotics. DIY Robotics. URL: <https://diy-robotics.com/blog/10-industrial-robotic-arms-manufacturers/> (date of access: 27.10.2024).

9. Čehovin Zajc, Luka & Rezelj, Anže & Skočaj, Danijel. (2017). Open-Source Robotic Manipulator and Sensory Platform. 10.1007/978-3-319-62875-2_22

10. Robotics Part 17 - Forward Kinematics using the Denavit-Hartenberg Convention (DH Parameters). RoboticsUnveiled. URL: <https://www.roboticsunveiled.com/robotics-forward-kinematics-denavit-hartenberg-parameters/> (date of access: 08.01.2025).

11. Application of denavit hartenberg method in service robotics / E. Prada et al. *Acta Mechatronica*. 2020. Vol. 5, no. 4. P. 47–52. URL: <https://doi.org/10.22306/am.v5i4.68> (date of access: 08.01.2025).

12. 1. Basic about Industrial Robots – Inlearc. TTHK – Tallinna Tööstushariduskeskus. URL: <https://www.tthk.ee/inlearcs/1-basic-about-industrial-robots/> (date of access: 09.01.2025).

13. Rao R. What are manipulator robots? Understanding their Design, Types, and Applications. Wevolver. URL: <https://www.wevolver.com/article/robot-manipulator> (date of access: 09.01.2025).

14. Exploring Vision-based Robotic Arm Control with 6 Degrees of Freedom. Encord | Label and curate multimodal AI data. URL: <https://encord.com/blog/robotic-arm-with-6-degrees-of-freedom-using-computer-vision/> (date of access: 09.01.2025).