

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Модель триланкового міні робота-маніпулятора

Назва теми

КвРАКІТР.2024088.01.10.ПЗ

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Шифр, назва

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

Шифр, назва

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

Назва

Виконав:

студент II курсу, група АКІТРм-24-1



Підпис

Назарій ПИТЛИК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник



Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер



Підпис

Галина РАДЕЛЬЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри АКІТтаР



Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 16 » грудня 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інформаційних технологій*

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

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань *17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*

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

Освітня програма *Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТгаР

Людмила КОРЕЦЬКА

01 вересня 2025р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Питлику Назарію Аркадійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Модель триланкового міні робота-маніпулятора

Керівник роботи Корецька Людмила Олександрівна, канд. техн. наук, доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25.08.2025 р. № 65

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 06.12.2025 р.


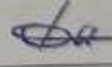

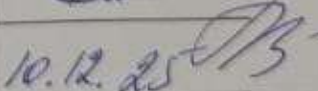
3 Вихідні дані до роботи: умови та галузі застосування робота-маніпулятора, що моделюється, характеристики об'єктів, з якими буде працювати робот-маніпулятор, обмеження в габаритних розмірах робота-маніпулятора

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Проблематика застосування роботів-маніпуляторів. Математичне моделювання кінематичних та динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора. Моделювання конструкції та підбір обладнання для триланкового міні робота-маніпулятора. Моделювання роботи триланкового міні робота-маніпулятора

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКИТгаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г.І., доцент кафедри АКИТгаР	 9.12.25	 10.12.25

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вступ	15.09.2025 р.	Виконано
2 Проблематика застосування роботів-маніпуляторів	30.09.2025 р.	Виконано
3 Математичне моделювання роботи триланкового міні робота-маніпулятора	16.10.2025 р.	Виконано
4 Моделювання конструкції та підбір обладнання для триланкового міні робота-маніпулятора	1.11.2025 р.	Виконано
5 Моделювання роботи триланкового міні робота-маніпулятора	12.11.2025 р.	Виконано
6 Висновки	14.11.2025 р.	Виконано
7 Написання тез доповідей	25.11.2025р.	Виконано
8 Оформлення пояснювальної записки до КРМ	01.12.2025р.	Виконано
9 Оформлення презентаційних матеріалів	01.12.2025р.	виконано

Студент


Підпис

Назарій ПИТЛИК
І.С.Я. ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
І.С.Я. ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Модель триланкового міні робота-маніпулятора».

Автор роботи: Питлик Назарій Аркадійович

Керівник роботи: Корецька Людмила Олександрівна, канд. техн. наук,
доцент

Пояснювальна записка: 85 с., 61 рис., 6 табл., 4 дод., 70 джерел.

Графічна частина: 16 презентаційних слайдів.

РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ, ДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ, САД-МОДЕЛЬ, МІКРОКОНТРОЛЕР, СЕРВОПРИВІД, ІЧ ДАТЧИК, BLUETOOTH МОДУЛЬ, МОБІЛЬНИЙ ДОДАТОК, АЛГОРИТМ РОБОТИ, ПІДЙОМ ОБ'ЄКТІВ

Об'єкт дослідження – роботизовані маніпуляційні системи, зокрема міні роботи-маніпулятори, які мають в своїй конструкції три ланки.

Мета роботи: розробка моделі триланкового міні робота-маніпулятора, розрахунок його кінематичних та динамічних параметрів та моделювання його роботи. В роботі виконано математичне моделювання кінематичних та динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора. Також розроблено САД-модель робота-маніпулятора, виконано підбір обладнання, розроблено алгоритми роботи у різних режимах, розроблено мобільний додаток для керування роботом-маніпулятором з телефону через Bluetooth, а також зібрано робот-маніпулятор та перевірено його експлуатаційні характеристики.



Підпис студента

05.12.2025

Дата

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	4
1 ПРОБЛЕМАТИКА ЗАСТОСУВАННЯ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ	9
1.1 Класифікація роботів.....	9
1.2 Огляд та аналіз існуючих конструкцій роботів-маніпуляторів.....	13
1.3 Методологія проведення дослідження та постановка задач.....	18
1.4 Висновки до першого розділу.....	19
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРИЛАНКОВОГО МІНІ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	21
2.1 Кінематичні параметри конструкції міні робота-маніпулятора.....	21
2.2 Динамічні параметри конструкції міні робота-маніпулятора	25
2.3 Результати математичного моделювання роботи триланкового міні робота- маніпулятора.....	37
2.4 Висновки до другого розділу	39
3 МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТРИЛАНКОВОГО МІНІ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	40
3.1 Побудова моделі	40
3.2 Мікроконтролер	42
3.3 Сервопривід.....	46
3.4 Датчики та модулі.....	51
3.5 Розробка схеми підключення.....	56
3.6 Висновки до третього розділу.....	61
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРИЛАНКОВОГО МІНІ РОБОТА- МАНІПУЛЯТОРА	63
4.1 Розробка алгоритму роботи триланкового міні робота-маніпулятора.....	63

4.2 Розробка програмного забезпечення для триланкового міні робота-маніпулятора.....	65
4.3 Дослідження роботи триланкового міні робота-маніпулятора	71
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	78
ВИСНОВКИ	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	82
Додаток А. Програмний код керування положенням сервоприводу робота-маніпулятора за допомогою потенціометрів	89
Додаток Б. Програмний код керування захватом за допомогою ІЧ-датчику.....	91
Додаток В. Програмний код автоматичного керування роботом-маніпулятором	92
Додаток Г. Програмний код керування роботом-маніпулятором через Bluetooth модуль.....	93
Додаток Д. Тези в збірнику наукових праць «Технічна творчість»	95

ВСТУП

У сучасному світі стрімкий розвиток технологій спричиняє значні зміни в промисловості, медицині, логістиці та побуті, де все ширше застосовуються автоматизовані системи та роботи. Однією з ключових ланок у сфері автоматизації є роботи-маніпулятори – механізми, здатні виконувати точні, повторювані дії з високою швидкістю та мінімальним впливом людського фактора. Їхнє використання дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити якість виконання технологічних операцій і зменшити ризики для людини в небезпечних умовах.

Розвиток роботів-маніпуляторів вимагає постійного вдосконалення як апаратної частини (кінематики, приводів, сенсорики), так і програмного забезпечення, яке забезпечує адаптивність і точність рухів. Особливу увагу приділяють компактним і високоточним моделям, які можуть працювати у обмежених просторах або виконувати делікатні завдання, наприклад, в мікрохірургії чи прецизійній збірці. У цьому контексті дослідження моделей роботів-маніпуляторів є важливим етапом для розуміння особливостей їхньої роботи, оптимізації траєкторій руху та забезпечення стабільності під час виконання завдань.

Доцільність удосконалення роботів-маніпуляторів зумовлена потребою у малогабаритних, економічно ефективних і енергоощадних рішеннях, які можна адаптувати до різноманітних галузей. Побудова математичних моделей, аналіз їхньої кінематики та розробка відповідного керування відкривають можливості для створення універсальних платформ, що легко масштабуються та інтегруються в існуючі системи. Саме тому розробка моделі триланкового міні робота-маніпулятора є актуальною задачею та має практичну значущість у контексті подальшого розвитку робототехнічних систем.

Міні роботи-маніпулятори знаходять широке застосування у багатьох галузях завдяки своїм компактним розмірам, високій точності та можливості працювати у важкодоступних або обмежених просторах. Основними сферами

застосування є: біотехнології та медицина при виконанні ендоскопічних процедур та у випадках лабораторної автоматизації; виробництво та промисловість при виконанні прецизійного складання в електроніці, а також при обслуговуванні мікромеханізмів та контролю якості деталей; в науці та при проведенні досліджень в сферах мікроскопії та нанотехнологій, тощо.

Враховуючи вищезазначене, актуальною стає задача розробки моделі триланкового міні робота-маніпулятора.

Метою роботи є розробка моделі триланкового міні робота-маніпулятора, розрахунок його кінематичних та динамічних параметрів та моделювання його роботи.

Досягнення поставленої мети можна досягнути розв'язавши наступні задачі:

- визначення довжини ланки;
- проектування ланки, основи та захвату руки робота-маніпулятора;
- друк деталей на 3D-принтері;
- підбір обладнання для робота-маніпулятора;
- програмування обладнання;
- розробка додатку для керування роботом-маніпулятором через Bluetooth;
- проектування блок-схеми та схеми підключення;
- створення структурної моделі триланкового міні робота-маніпулятора.

Методи досліджень.

Використовувались основні положення загальної теорії систем, системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), теорії моделювання процесів. Внаслідок проведення моделювання процесу рухом триланкового міні роботу-маніпулятор із об'єктом; використано теоретико-множинні підходи, алгебру систем, апарат модельно-орієнтованих підходів, методи концептуального та віртуального моделювання, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку, евристичні оцінки.

Об'єкт дослідження – роботизовані маніпуляційні системи, зокрема міні роботи-маніпулятори, які мають в своїй конструкції три ланки.

Предмет дослідження – математична модель кінематичних та динамічних характеристик триланкового міні робота-маніпулятора, включаючи методи його моделювання, аналіз траєкторій руху та керування.

Наукова новизна отриманих результатів: розроблено модуль триланкового міні робота-маніпулятора для переміщення дрібних об'єктів у трьох варіантах керування.

Практична значимість отриманих результатів: запропоновані підходи можуть використовуватись на виробництвах та промисловостях, в яких технологічний процес передбачає використання роботів-маніпуляторів невеликого розміру або ж робить неможливим впровадження роботизованого обладнання ієликих розмірів.

Апробація результатів дослідження: опубліковано тези доповіді «Розробка моделі триланкового міні робота-маніпулятора» у збірнику наукових праць «Технічна творчість».

Дипломна робота складається із наступних елементів: вступ, чотири розділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних джерел, додатки. Загальний обсяг роботи складає 85 сторінок, у тому числі: 61 рисунок, 6 таблиць, 4 додатки, список використаних джерел містить 70 найменувань.

В першому розділі було наведено класифікацію роботів-маніпуляторів за такими ознаками, як: за вантажопідйомністю, за видом технологічних операцій, за спеціалізацією, за видом системи координат, за числом рухомості, тощо. Також наведено види роботів-маніпуляторів, до яких відносяться декартовий, полярний, колаборативний, дельта робот, робот-маніпулятор SCARA, паралельний робот, циліндричний.

Окрім того було виконано розподіл дослідження та моделювання процесу роботи триланкового міні робота-маніпулятора на етапі та постановка задач кваліфікаційної роботи магістра.

В другому розділі наведено розроблену математичну модель для кінетичних та динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора. Визначено ДН параметри робота-маніпулятора та визначник матриці Якобіан.

Після проведення математичного моделювання динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора встановлено, що йому характерний слабкий динамічний вплив зв'язків шарніра із інерцією систем привода. Завдяки незначному впливу кожному із систем привода можна розглядати окремо, тобто вважати, що вона виконує рух із постійним навантаженням.

Також у розділі було проведено розрахунок параметрів на основі розробленої математичної моделі для триланкового міні робота-маніпулятора.

В третьому розділі було виконано підбір обладнання для керування триланковим міні роботом-маніпулятором. Це обладнання включає в себе мікроконтролер Arduino Leonardo, сервоприводи MG996R та Tower Pro SG90, модуль Bluetooth HM-10, інфрачервоний датчик, потенціометр на 10 кОм, а також обладнання для з'єднання, яке включає в себе кабелі та макетну плату.

Створено модель конструктивних елементів триланкового робота-маніпулятор в програмі Autodesk Inventor. Для створення роботу передбачається використання технології 3D друку.

Також було виконано розрахунок ваги, яку здатен піднімати такий маніпулятор. Максимальна вага становить 69,5 г. Крім того, була розроблена схема підключення системи керування триланковим міні-роботом маніпулятором та три варіанти схем керування роботом-маніпулятором – для ручного керування через потенціометри, для автоматичного керування через спрацювання ІЧ датчику та для керування через модуль Bluetooth за допомогою мобільного додатку.

В четвертому розділі було розроблено алгоритми керування роботом-маніпулятором при різних варіантах керування – для ручного керування за допомогою потенціометрів, для керування через мобільний додаток шляхом з'єднання по модулю Bluetooth та керування за допомогою ІЧ датчику.

Також було розроблено мобільний додаток керування роботом-маніпулятором, програмний код якого наведений в додатках. Після цього було виконано дослідження роботи робота-маніпулятора, яке показало здатність виконувати тестового завдання щодо переміщення об'єкту з однієї точки в іншу.

1 ПРОБЛЕМАТИКА ЗАСТОСУВАННЯ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ

1.1 Класифікація роботів

Структура робота, що виконує взаємодію із людиною-оператором та навколишнім середовищем показана на схемі 1.1. Як видно, така структура має чотири системи, а саме [1]:

- систему зв'язку;
- сенсорна система або інформаційно-вимірювальна;
- інтелектуальна або керувальна;
- рухома або виконавча.

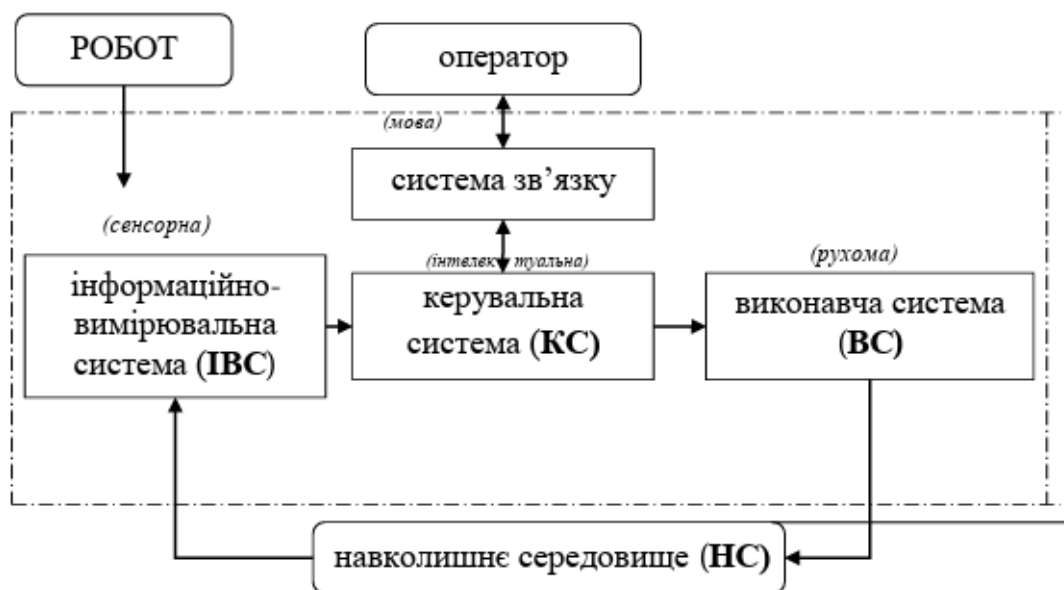


Рисунок 1.1 – Структура робота

Найбільшого поширення отримали саме промислові роботи, які представляють собою автоматичні машини, що складаються із маніпулятора, який виступає в ролі виконавчого пристрою та пристрою програмного керування. Складові елементи промислових роботів наведені на рисунку 1.2.

Класифікація промислових роботів є дуже широкою та виконується за рядом факторів. В загальному класифікація наведена на рисунку 1.3.

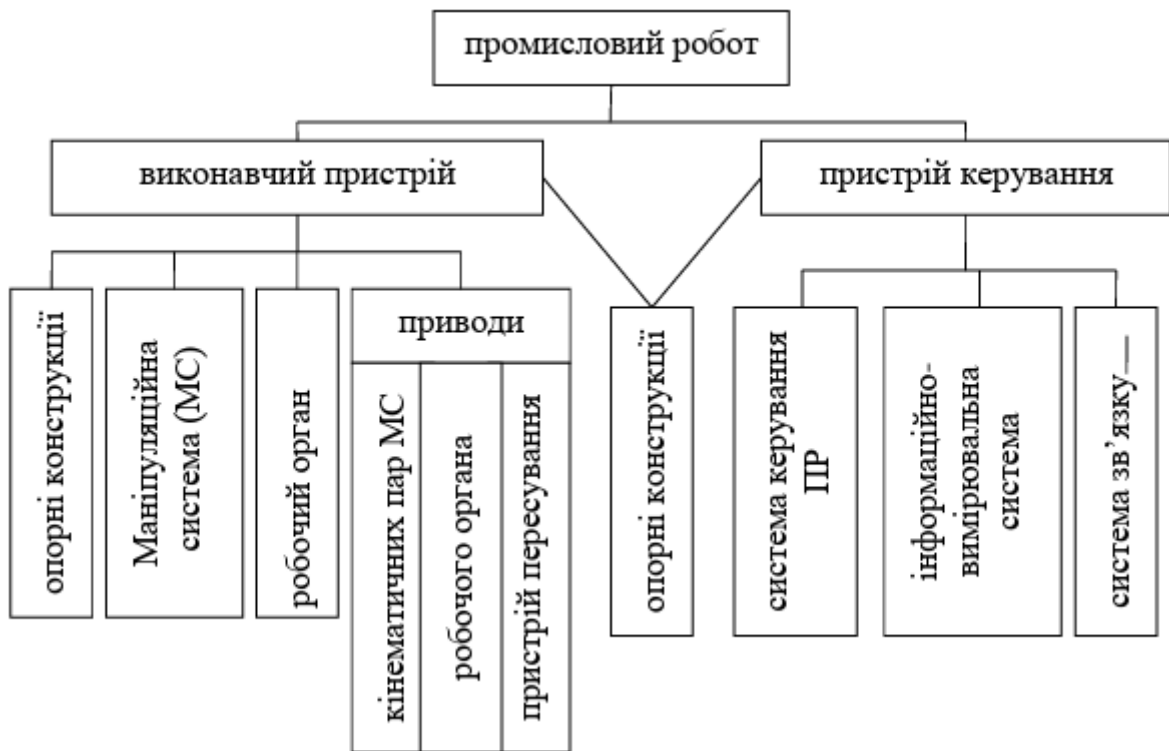


Рисунок 1.2 – Складові елементи промислових роботів

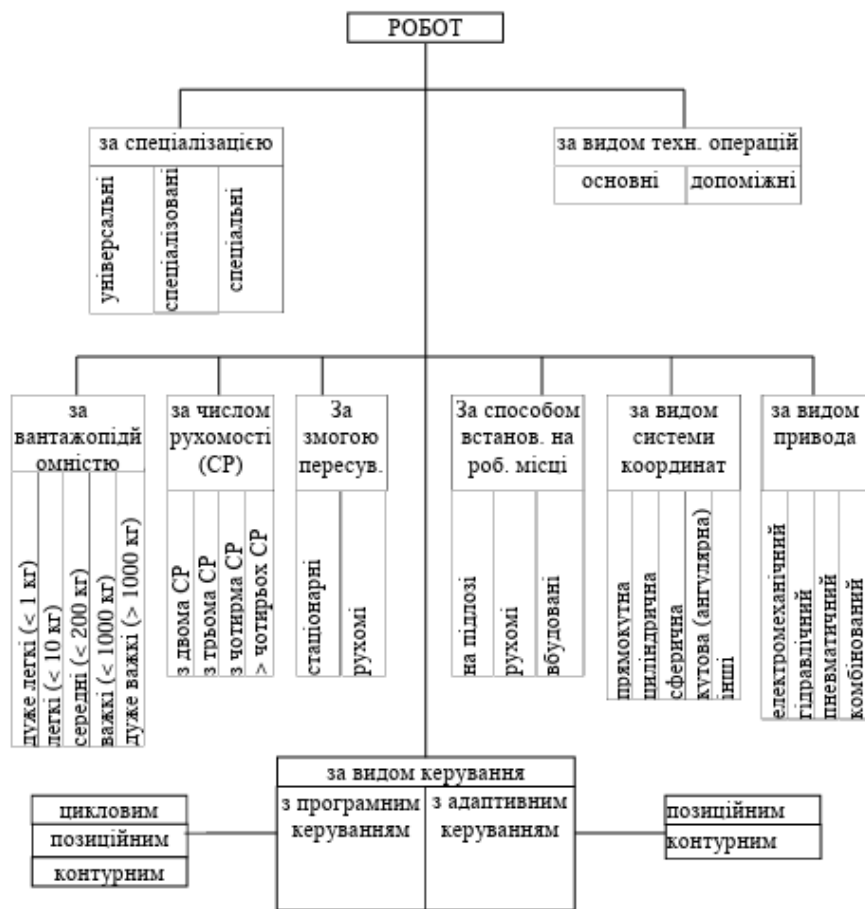


Рисунок 1.3 – Класифікація промислових роботів

В залежності від функціонального призначення виділяють [2]:

– універсальні – призначені для виконання широкого спектру технологічних операцій, здатні працювати з різними моделями обладнання в межах виконання технологічного процесу;

– спеціальні – виконують тільки одну задану конкретну операцію із певним встановленим видом обладнання;

– спеціалізовані – здатні виконувати ряд операцій певного виду із заздалегідь встановленою групою моделей обладнання в рамках технологічного процесу.

За характером виконуваних операцій роботи поділяються на [3]:

– підйомно-транспортні;

– виробничі;

– універсальні.

Вантажопідйомність робота обмежується вантажопідйомністю його окремих ланок, тобто маніпуляторів. Якщо в конструкції робота передбачено декілька маніпуляторів, то в технічних характеристиках вказується вантажопідйомність найбільш потужної із ланок робота. За вантажопідйомністю поділяються на:

– понад 1000 кг - надважкі;

– до 1000 кг - важкі;

– до 100 кг – середні;

– до 10 кг – легкі;

– до 1 кг – надлегкі.

Динамічні властивості роботи – це швидкість виконання та точність виконання рухів. Ці параметри є взаємопов'язаними та головними серед всіх характеристик роботизованого обладнання. Швидкодія робота-маніпулятора визначається на основі показників швидкості переміщення по окремим ступеням свободи, тобто по окремим траєкторіям руху.

За швидкодією роботи поділяються на:

– високої швидкодії – лінійні швидкості перевищують 1 м/с;

- середньої швидкодії – лінійні швидкості лежать в межах від 0,5 до 1 м/с;
- малої швидкодії – лінійні швидкості становлять менше 0,5 м/с.

Сучасним роботам в загальному характерна середня швидкодія, а в деяких моделях частина ланок здатна виконувати операції із показниками високої швидкодії. Серед усіх видів роботів таких моделей приблизно 20% [3]. Це пояснюється тим, що окрім забезпечення високої швидкодії робот повинен виконувати поставлені задачі із високим рівнем точності, а ці два параметри достатньо часто протирічать один одному.

За точністю роботизоване обладнання поділяється на наступні групи:

- високої точності – лінійна похибка становить менше 0,1 мм;
- середньої точності – лінійна похибка лежать в межах від 0,1 до 1 мм;
- малої точності – лінійна похибка становлять більше 1 мм.

Останній параметр, за яким класифікують роботів – це кількість ступенів свободи. Умовна схема ступенів свободи наведена на рисунку 1.4. При визначенні цього параметру спостерігається загальне правило для всіх видів роботів – чим більша кількість ступенів свободи, тим більш універсальним є робот.

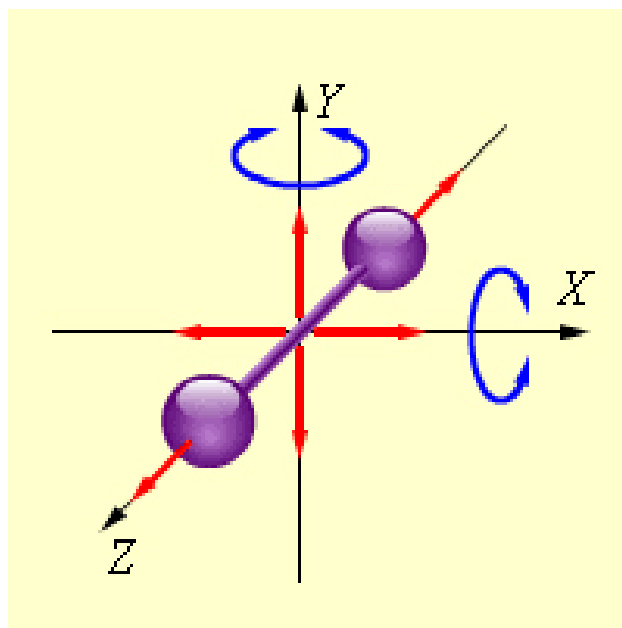


Рисунок 1.4 – Ступені свободи робота

1.2 Огляд та аналіз існуючих конструкцій роботів-маніпуляторів

Робот-маніпулятор представляє собою автоматизований механізм, призначений для виконання функцій, що повторюють рухи людської руки для переміщення об'єктів або ж для специфічних операцій технологічного процесу, наприклад сортування, пакування, зварювання, тощо [4].

В роботі робота-маніпулятора всі його ланки відіграють певну роль та визначають сферу його застосування. До складових частин робота-маніпулятора відносяться ряд ланок і з'єднань. Ланки за своєю конструкцією представляють собою жорсткі компоненти, призначені для з'єднання частин робота-маніпулятора. Рухомими компонентами робота-маніпулятора є суглоби, які виконують рухи один проти одного, а саме обертальний, поворотний або лінійний рух [5].

Кількість та типи з'єднань робота-маніпулятора визначають його ступінь свободи, а відповідно і спосіб його застосування та форму робочої зони, в якій він працює. На основі цього параметру визначається категорія робота.

Серед видів роботів-маніпуляторів виділяється декілька найбільш поширених, до яких відноситься декартовий робот, які також називають координатними роботами (рис. 1.5). Такі роботи-маніпулятори використовують прямолінійні напрямні, завдяки чому можна досягнути високої точності руху при виконанні операцій. Конструкція такого робота-маніпулятора базується на використанні Декартової системи координат.

Декартовий робот-маніпулятор має три головні осі керування, які є лінійними, тому також його можна зустріти під назвою лінійним робот. Ланки робота не виконують обертальний рух, лише лінійний, а також вони розташовані під прямими кутами відносно один одного. Переміщення та рух ланок робота виконується завдяки трьом ковзаючим муфтам [6].

Основною перевагою декартових роботів є простота конструкції та точність виконання рухів, яка в деяких моделях досягається на рівні 0,01 мм. Найбільш суттєвим недоліком є неможливість виконання руху по складним

траєкторіям та обмежена робоча зона. Ці обмеження пояснюються неможливістю робота виконувати поворотні або обертальні рухи.

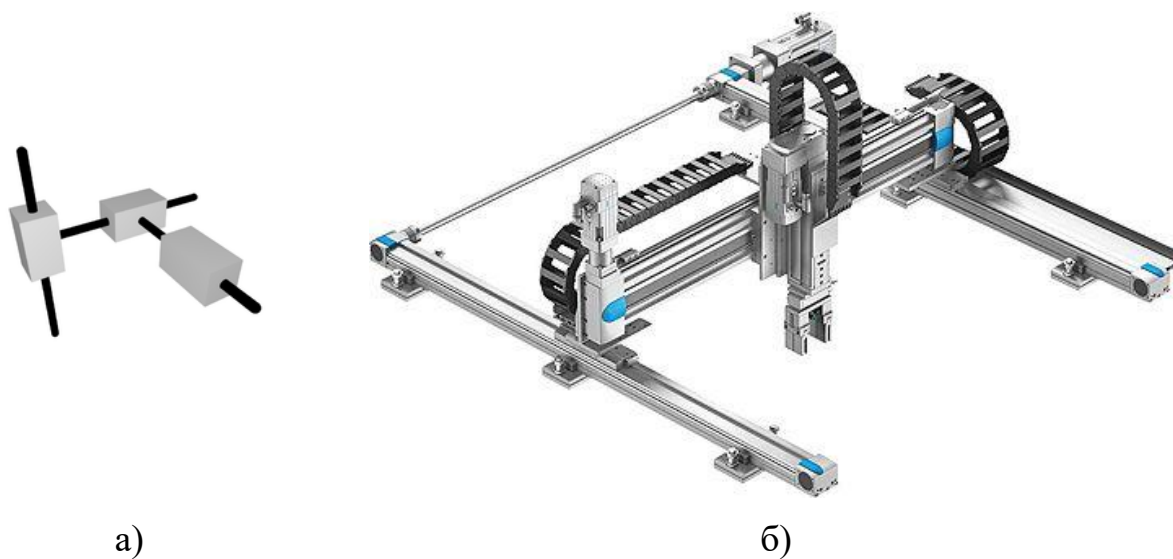


Рисунок 1.5 – Декартовий робот-маніпулятор:
а – кінематична схема; б – зовнішній вигляд

Полярний або сферичний робот-маніпулятор (рис. 1.6) – це робот, в якому з'єднання тіла та руки виконані за допомогою шарнірів. Завдяки такому з'єднанню робот-маніпулятор здатен виконувати кругові рухи, тобто рухатись в межах 3 осей полярної геометрії [7]. Таким роботам-маніпуляторам характерне формування полярних координат ланки робота та сферичну робочу оболонку.



Рисунок 1.6 – Полярний робот-маніпулятор

В історії використання роботів-маніпуляторів вони були найпершим видом промислових роботів, які з часом втратили широке поширення, оскільки з'явилися інші моделі роботів-маніпуляторів. Проте в таких галузях виробництва, де необхідно виконувати лиття під тиском та обробку матеріалів, вони ще достатньо широко поширені [8].

Циліндричні роботи-маніпулятори (рис. 1.7) з'єднують ланки за допомогою призматичного шарніру, а також в своїй конструкції мають один шарнір, що обертається, в основі робота. Поворотний шарнір відповідає за виконання рухів вздовж його осі, а за лінійних рухів відповідає призматичний шарнір.



Рисунок 1.7 – Циліндричний робот-маніпулятор

Паралельні роботи-маніпулятори конструктивно відрізняються тим, що рухома платформа з'єднується за допомогою незалежних кінематичних ланок із нерухомою основою [9]. Таким роботам-маніпуляторам характерна наявність замкнених кінематичних ланок, завдяки чому забезпечується швидкодійність, надійність та точність. Найбільш відомим видом паралельного робота-маніпулятора є платформа Гью-Стюарта (рис. 1.8).

Підвидом паралельного робота-маніпулятора є дельта-робот (рис. 1.9), який складається із трьох важелів, які, в свою чергу, за допомогою карданних шарнірів кріпляться до основи. Ключовою відмінністю такого робота є наявність в його конструкції паралелограмів. Найбільшого поширення такі роботи-

маніпулятори отримали в сфері пакування продукції, оскільки деякі моделі здатні виконати до 300 операцій захвату за хвилину.



Рисунок 1.8 – Платформа Гью-Стюарта



Рисунок 1.9 – Дельта робот

Роботи SCARA (рис. 1.10) використовують кінематику, яка базується на системі важелів. Ці важелі забезпечують виконання рухів кінцевої ланки робота завдяки приводу обертання важелів механізму. Класичний варіант виконання

роботу SCARA конструктивно налічує два незалежних приводи та два важеля, які з'єднані в одній точці. Перший привід встановлений в з'єднанні двох важелів та відповідає за виконання їх обертального руху, а другий важіль виконує обертання першого важеля та, відповідно, встановлений в його основі.

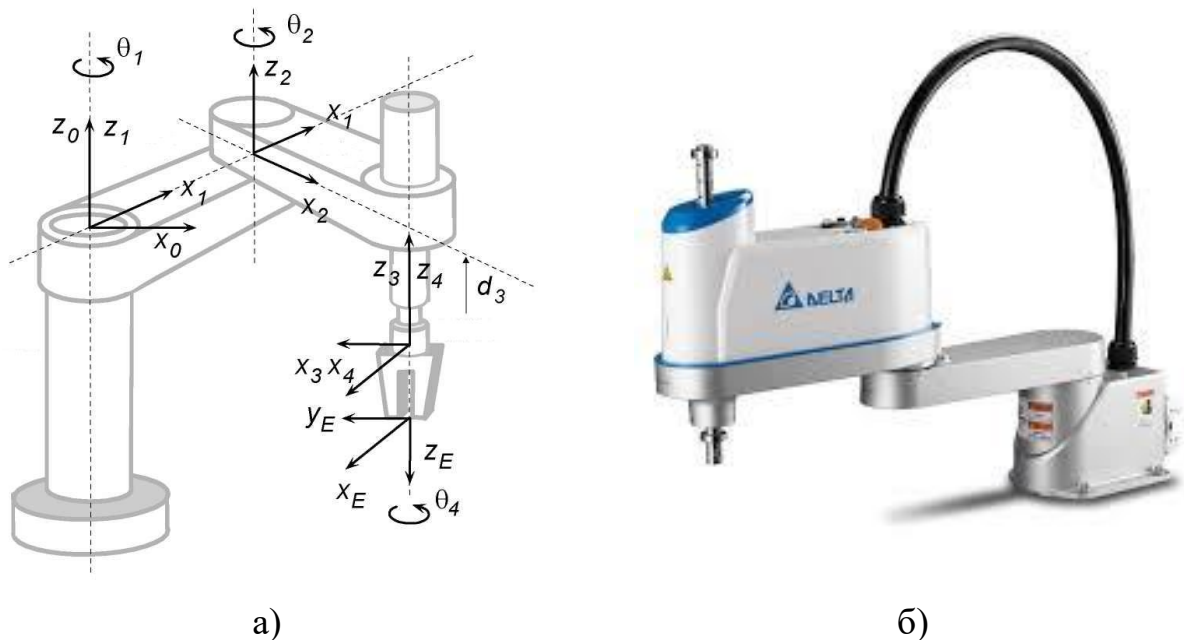


Рисунок 1.10 – Робот-маніпулятор SCARA:
а – схема руху; б – зовнішній вигляд

Першочергово роботи-маніпулятори такого типу використовувались для складання, монтажу та переміщення об'єктів, але найбільш широкого поширення вони отримали в конвеєрних системах та в електронній промисловості. Також широкого поширення такі роботи отримали в координатних машинах із числовим програмним керуванням, наприклад, 3D принтерах, фрезерних верстатах невеликих габаритів, тощо [10, 11].

Колаборативний робот (рис. 1.11) – це автоматичний пристрій, здатний виконувати операції разом із людиною-оператором та використовується для виробництва різного роду продукції. Також отримали скорочену назву кобот. Конструктивно вони мають два основні елементи: пристрій, який виконує рухи та маніпулятор.

Основною відмінністю коботів від промислових роботів є те, що вони оснащені датчиками контролю руху, які враховують розташування людини-оператора, тобто мінімізується ймовірність заподіяння шкоди оператору. В той же час промислові роботи працюють за заздалегідь розробленими програмами та не враховують можливість знаходження людини в зоні виконання своїх рухів, тобто несуть високий рівень небезпечності для людини.



Рисунок 1.11 – Колаборативний робот

Найчастіше колаборативні роботи мають невеликі габарити. Наприклад, вага становить приблизно 20 кг, а висота приблизно 1,5 м. Одним із найменших колаборативних роботів є модель Franka Emika Panda Arm [12, 13]. Навантаження, яке здатен переміщувати цей робот-маніпулятор, становить 3 кг максимум, відстань – до 850 мм, а вага робота становить 18 кг.

1.3 Методологія проведення дослідження та постановка задач

Дослідження та моделювання процесу роботи триланкового міні робота-маніпулятора можна розподілити на наступні етапи:

- визначення довжини ланки;

- проєктування ланки, основи та захвату руки робота-маніпулятора;
- друк деталей на 3D-принтері;
- підбір обладнання для робота-маніпулятора;
- програмування обладнання;
- розробка додатку для керування роботом-маніпулятором через Bluetooth;
- проєктування блок-схеми та схеми підключення;
- створення структурної моделі триланкового міні робота-маніпулятора.

Для досягнення поставленої у роботі мети були поставлені наступні задачі автоматизації роботи триланкового міні робота-маніпулятора:

- розрахунок максимальної довжини ланки, яку зможе нести сервопривід;
- конструювання основних механічних елементів за допомогою Autodesk Inventor [14 ,15], а саме основа міні робота-маніпулятора, ланка та захват;
- поєднання роботи механізму, електроніки та елементів комп'ютерного керування для створення робочої моделі робота-маніпулятора;
- розробка додатка керування роботом-маніпулятором з телефона;
- впровадження кінематики руху робота-маніпулятора по траєкторії, а саме врахування та математичне моделювання принципів перенесення об'єктів, обертання суглобів та обрахунку траєкторії руху робота-маніпулятора;
- встановлення з'єднання між керуючою програмою та мікроконтролером;
- збір прототипу робота-маніпулятора;
- тестовий запуск і перевірка руху робота-маніпулятора по траєкторії на прикладі підйому та переміщення об'єктів із місця на місце.

1.4 Висновки до першого розділу

В першому розділі було наведено класифікацію роботів-маніпуляторів за такими ознаками, як: за вантажопідйомністю, за видом технологічних операцій, за спеціалізацією, за видом системи координат, за числом рухомості, тощо. Також наведено види роботів-маніпуляторів, до яких відносяться декартовий, полярний,

колаборативний, дельта робот, робот-маніпулятор SCARA, паралельний робот, циліндричний.

Окрім того було виконано розподіл дослідження та моделювання процесу роботи триланкового міні робота-маніпулятора на етапі та постановка задач кваліфікаційної роботи магістра.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРИЛАНКОВОГО МІНІ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

2.1 Кінематичні параметри конструкції міні робота-маніпулятора

Першим етапом керування будь-яким роботизованим обладнання є побудова математичної моделі його роботи [16]. Для виконання розрахунку рухомих ланок їх бажано розділити на окремі сегменти, де кожен із сегментів виконує конкретно поставлене завдання.

Відповідно до [17] найважливішим модулем для роботів-маніпуляторів є зворотний зв'язок, просторова швидкість та кінематика руху. Вибір характеристик триланкового міні робота-маніпулятора напряму впливає на роботу робота-маніпулятора. До цих характеристик відносяться параметри двигуна, вага ланок та ступені свободи [18].

Кінематика є фундаментальною темою, яка вивчає зв'язок між координатами суглобів робота [19]. Кінематичні параметри є важливим в робототехніці особливо при вивченні поведінки та траєкторій руху роботів-маніпуляторів. В результаті визначення кінематичних параметрів є одним із найперших етапів при моделюванні роботи робота-маніпулятора [20].

При дослідженні роботів-маніпуляторів достатньо поширеним є використання параметру Денавіта-Гартенберга (DH) [19, 21]. Він працює шляхом приєднання координатної системи до кожного з'єднання та визначення трьох параметрів DH для кожного з'єднання, а потім побудови таблиці DH з використанням цих параметрів.

Оскільки в роботі досліджується триланковий робот-маніпулятор, то кількість ланок в нього становить 3 штуки. Тоді параметри DH робота-маніпулятора будуть такими, як це показано у таблиці 2.1, а кінематична модель робота-маніпулятора наведена на рисунку 2.1.

В таблиці 2.1 зазначені параметри, які відповідають наступним кінематичним параметрам триланкового міні робота-маніпулятора:

- відстань від z_i до z_{i+1} , виміряна вздовж x_i - a_i ;

- кут скручування від z_i до z_{i+1} , виміряний вздовж $x_i - \alpha_i$;
- відстань від x_{i-1} до x_i , виміряна вздовж $z_i - d_i$;
- кут від x_{i-1} до x_i , виміряний вздовж $z_i - \theta_i$.

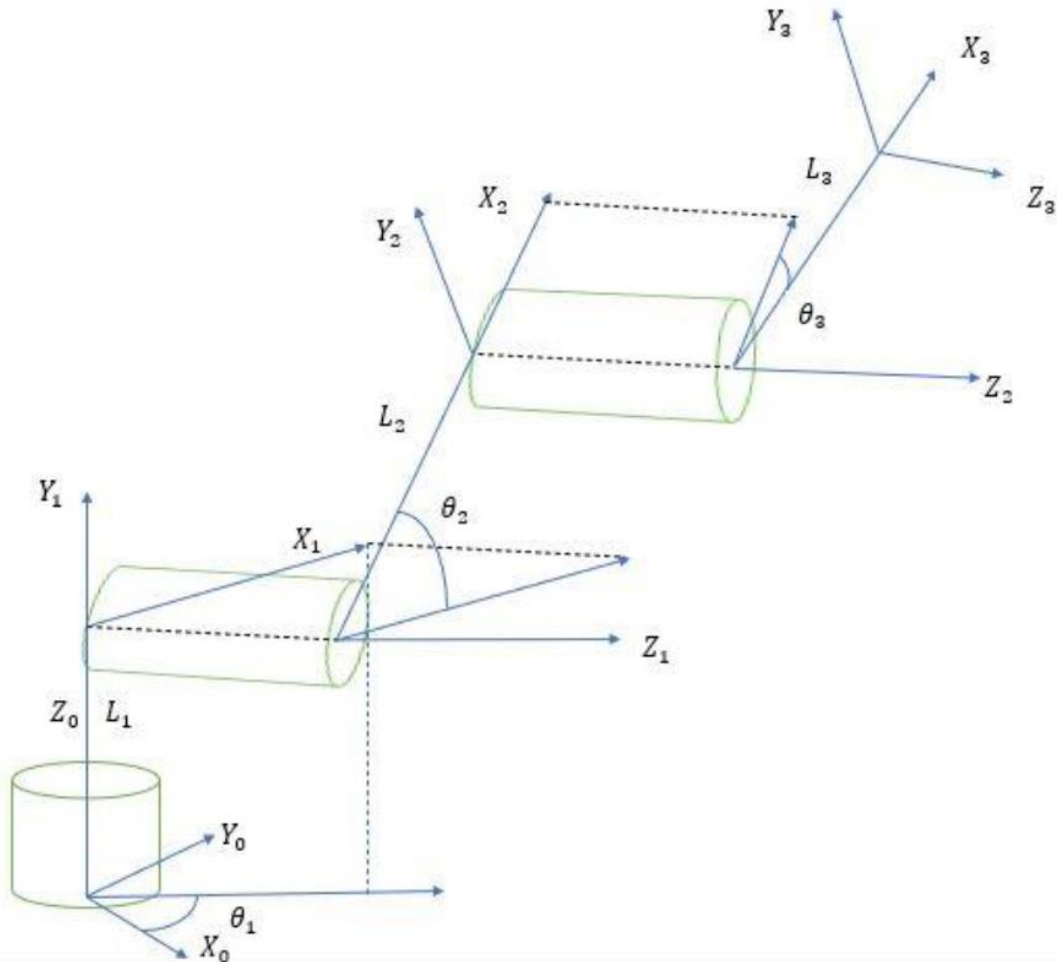


Рисунок 2.1 – Кінематична модель триланкового міні робота-маніпулятора

Таблиця 2.1 – Параметри ДН триланкового міні робота-маніпулятора

Ланка	θ_i	d_i	α_i	a_i
1	θ_1	0	90	0
2	θ_2	0	0	L_2
3	θ_3	0	0	L_3

Пряма кінематика – це визначення параметрів рухомих об’єктів, які пов’язані між собою для досягнення певної орієнтації в просторі, позиції та

розташування цих об'єктів. По своїй суті пряма кінематика представляє собою процес планування руху.

Суть прямої кінематики полягає в тому, що вплив передається зверху догори по ієрархічній структурі. Спочатку орієнтацію та положення визначає батьківський сегмент моделі. Це впливає на зміну орієнтації та положення залежних сегментів. В подальшому відбувається зміна положення наступного елемента в ланцюгу, в результаті чого також змінюється положення всіх залежних елементів.

В кінематичному аналізі роботів-маніпуляторів параметри ДН та параметри прямої кінематики використовуються найчастіше як добуток експонент. Такий добуток буде представляти собою загальну матрицю, яка в подальшому використовується для представлення призматичного або обертового суглобу в певній орієнтації в просторі [22].

Множення матриць лінійного та обертального руху виконується відповідно до формул, наведених у роботі [23]. У випадку, якщо довжина ланки та кути відомі на початку обчислення, то використовується наступна формула:

$$T_i = Rot_{x\alpha_i} \cdot Trans_{x\alpha_i} \cdot Trans_{zd_i} \cdot Rot_{z\theta_i}. \quad (2.1)$$

Матриці перетворення можна отримати із кінематичних параметрів ДН, і мають наступний вигляд:

$$T_1^0 = \begin{vmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2.2)$$

$$T_2^1 = \begin{vmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & L_2 \cdot \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2 \cdot \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2.3)$$

$$T_3^2 = \begin{vmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_2 \cdot \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & L_3 \cdot \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (2.4)$$

Однорідні матриці перетворення є добутком усіх матриць перетворення кожного зв'язку, тому однорідні матриці перетворення є:

$$T_3^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2. \quad (2.5)$$

$$T_3^0 = \begin{vmatrix} (\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3) & (-\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3) & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \cdot (L_3 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 + L_2 \cdot \cos\theta_2) \\ (\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3) & (-\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3) & -\cos\theta_1 & \sin\theta_1 \cdot (L_3 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 + L_2 \cdot \cos\theta_2) \\ (\sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3) & (\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3) & 0 & (L_3 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 + L_2 \cdot \sin\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.6)$$

Матриця Якобі – це матриця, яка використовується для опису взаємозв'язку між швидкістю суглобів робота-маніпулятора та кінцевого виконавчого механізму [24]. Такий взаємозв'язок для триланкового робота-маніпулятора визначається за наступною формулою:

$$j = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - a_1 \sin\theta_1 - a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos\theta_1 + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Матриця Якобі, або просто Якобіан, є фундаментальним інструментом у кінематиці роботів-маніпуляторів, оскільки вона встановлює зв'язок між швидкостями в сукупності спільних координат (кутів суглобів) та лінійними й кутовими швидкостями ефектора (кінцевої ланки робота). Завдяки цьому зв'язку можна ефективно аналізувати та управляти рухом маніпулятора, переходячи від конфігурацій простору суглобів до простору задач, де виконується основна робота (наприклад, переміщення об'єктів). Якобіан дозволяє отримати миттєву модель руху, що критично важливо для задач управління, планування траєкторій і зворотної кінематики [25].

Визначник матриці Якобіан має особливе значення для аналізу сингулярностей – конфігурацій, у яких маніпулятор втрачає ступінь свободи або здатність рухатися у певному напрямку. Якщо визначник Якобіану дорівнює нулю, то матриця є виродженою, і навіки-перетворення стає неможливим або неоднозначним. Це означає, що в таких положеннях неможливо отримати унікальне рішення задачі зворотної швидкісної кінематики, а сам маніпулятор стає нестабільним або некерованим у певних напрямках. Тому аналіз визначника Якобіану допомагає ідентифікувати критичні точки в конфігураційному просторі.

Крім аналізу руху, Якобіан також є ключовим елементом у розрахунку зусиль і моментів, які передаються від ефектора до приводів суглобів (через транспонований Якобіан) [26]. Це особливо важливо для задач, пов'язаних із маніпулюванням об'єктами, контролем сили та імпедансним керуванням. Таким чином, матриця Якобі і її визначник – це не просто математичні об'єкти, а практичні інструменти, які забезпечують безпечну, точну й ефективну роботу роботів-маніпуляторів у реальному середовищі.

2.2 Динамічні параметри конструкції міні робота-маніпулятора

Визначення динамічних параметрів робота-маніпулятора – таких як маса ланок, моменти інерції, центри мас, а також фрикційні та гравітаційні характеристики – є критично важливим для точного моделювання руху та ефективного керування роботом. Ці параметри визначають, як маніпулятор реагує на прикладені сили та моменти, а також як змінюються його прискорення в залежності від керуючих дій. Без адекватного урахування динаміки неможливо точно спрогнозувати поведінку робота при виконанні швидких або силових операцій, що може призвести до помилок у керуванні або навіть до пошкодження обладнання [27].

Правильно ідентифіковані динамічні параметри дають змогу реалізувати високоточні алгоритми динамічного керування, такі як зворотна динаміка або

адаптивне керування. Це дозволяє роботу рухатися плавно, точно та стабільно навіть у складних сценаріях – наприклад, при маніпулюванні важкими об'єктами або роботі на високих швидкостях. Крім того, точна динамічна модель необхідна для компенсації зовнішніх впливів, таких як гравітація, інерція чи зіткнення, що особливо важливо для взаємодії з навколишнім середовищем або людьми [28].

Недостатня точність у визначенні динамічних параметрів може призводити до нестабільності керування, перевитрат енергії, надмірного зносу приводів або неточностей у виконанні завдань. У промислових роботах, де повторюваність і надійність є критичними, це може означати зниження продуктивності або навіть аварійні ситуації. Отже, правильне визначення динамічних характеристик є основою для безпечної, ефективної та точної роботи роботів-маніпуляторів у реальному застосуванні [29].

Конструкція триланкового міні робота-маніпулятора має наступні ступені свободи [30]:

- радіальне переміщення r ;
- вертикальне переміщення z ;
- обертання θ .

Рух складної механічної системи, якою являється робот-маніпулятор, ефективно описується рівнянням, що базується на методі Лагранжа. Рівняння Лагранжа автоматично враховують наявні обмеження, оскільки частини системи в роботі-маніпулятор з'єднані між собою. Тобто, вже немає необхідності проводити заміну одного набору рівнянь іншим, в результаті чого можна досягнути усунення крутних моментів та сил обмежень [31].

За допомогою рівняння Лагранжа можна усунути необхідність використання при розрахунку динамічних параметрів робота-маніпулятора складних векторних діаграм, оскільки в ньому застосовуються скалярні величини [32].

Рух захвату міні робота-маніпулятора в системі координат можна описати у наступному вигляді [33]:

$$\ddot{r} = \frac{F_r}{m} + \frac{\theta^2}{2m} \left(2r^2 m_p + ((l-r)^2 + r^2) \cdot \frac{3m_a}{4l} \right), \quad (2.9)$$

$$\ddot{\theta} = \left(-\dot{r}\dot{\theta} \left(2r^2 m_p + ((l-r)^2 + r^2) \cdot \frac{3m_a}{4l} \right) + F_\theta \right) \cdot \frac{1}{j_{(r)}+J}, \quad (2.10)$$

$$\ddot{z} = \frac{F_z}{m_v} - g, \quad (2.11)$$

де $\dot{r}, \dot{\theta}, \dot{z}$ - швидкості напрямків r, θ, z відповідно;

J – постійна інерція вертикального стовпа;

F_θ, F_z, F_r – моменти та сили, прикладені до ланок θ, z, r відповідно;

m_a – маса радіального плеча;

$j_{(r)}$ – змінні інерція радіальної ланки;

m_v – маса, прикладена вертикально;

l – довжина радіального плеча;

m_p – маса корисного вантажу;

m_h – маса основи.

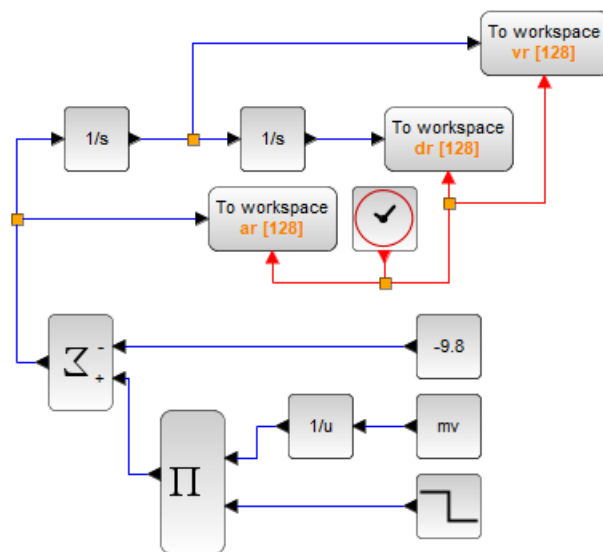
Пряма динамічна модель робота-маніпулятора – це набір диференціальних рівнянь, призначення яких полягає в описанні динаміки руху маніпулятора. Моделювання прямої динамічної моделі руху робота-маніпулятора визначається за формулами 2.9 – 2.11.

Для реалізації цієї моделі було використано Xcos. Пакет Scilab застосовується при необхідності виконання наукових та інженерних обчислень, а також математичного моделювання систем різного призначення. Цей пакет схожий на MATLAB, але на відміну від останнього, він наявний у вільному доступі, тобто програма безкоштовна [34].

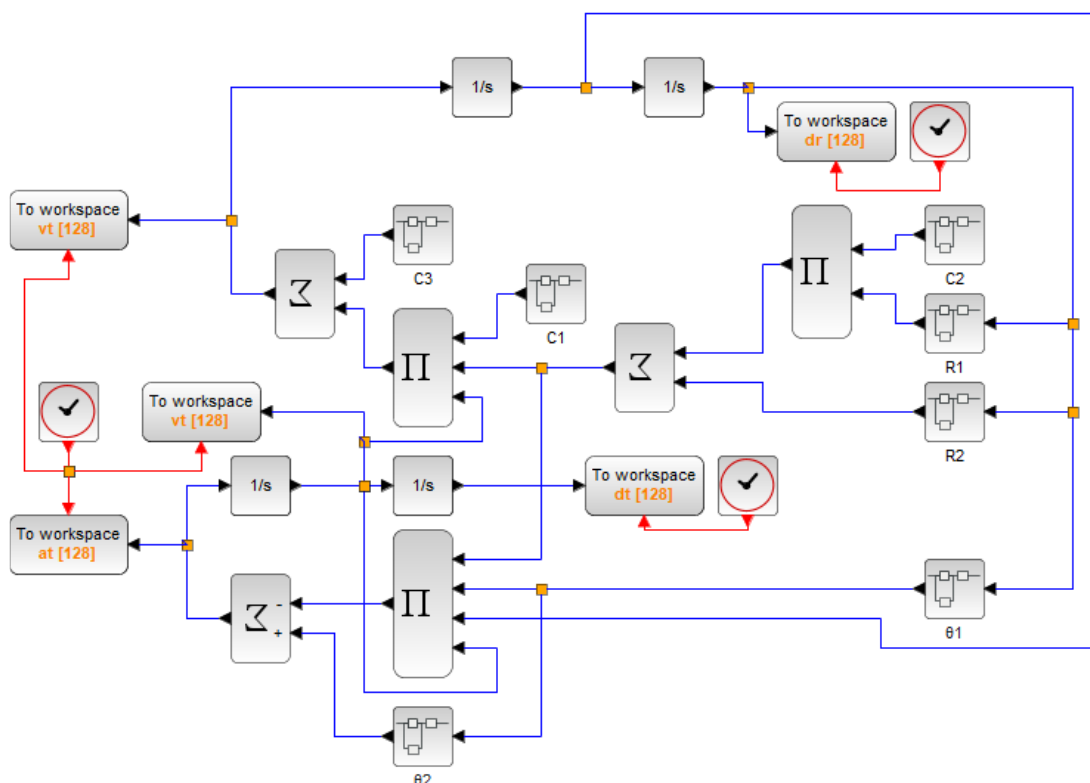
Аналогічно до MATLAB, у Scilab наявний додаток для виконання імітаційного моделювання систем Simulink, а саме Xcos. Цей пакет містить бібліотеку універсальних блоків, які в подальшому можуть використовуватись для імітаційного моделювання.

Пряма динамічна модель триланкового міні робота-маніпулятора була побудована у Scilab за допомогою бібліотеки Xcos і наведена на рисунку 2.2.

В першу чергу динамічна модель руху робота-маніпулятора необхідна для створення механізму керування. При збільшенні корисного навантаження прискорення зменшується по причині впливу другого закону руху Ньютона [35].



а)



б)

Рисунок 2.2 – Динамічна модель триланкового міні робота-маніпулятора:

а – для вертикального напрямку (z); б – для кутового і радіального напрямків (θ, r)

Вплив прискорення на зміну корисного навантаження більш виражений для радіального напрямку (рис. 2.3) у порівнянні із кутовим напрямком. Така відмінність пояснюється тим, що структура робота-маніпулятора для кутового з'єднання є симетричною відносно осі поздовжньої осі z , а у випадку радіального з'єднання така симетрія не спостерігається.

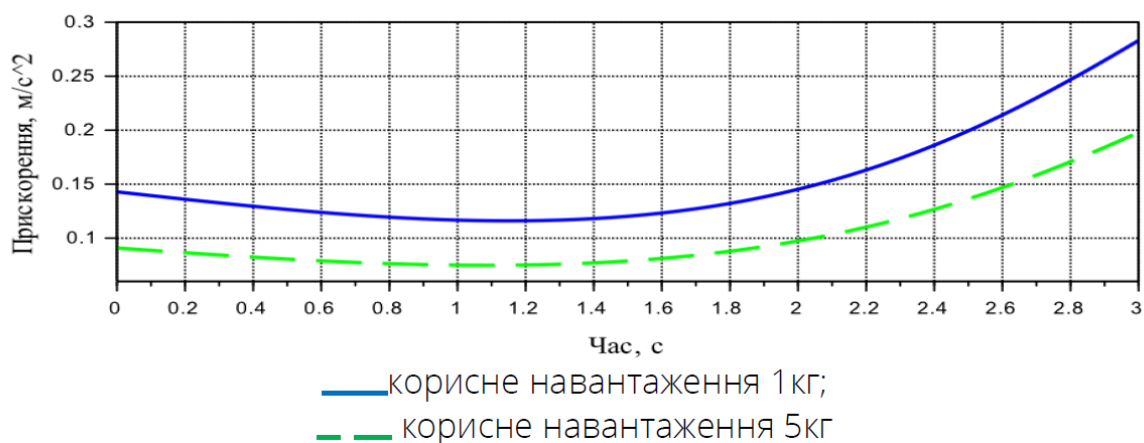


Рисунок 2.3 – Прискорення радіальної ланки триланкового міні робота-маніпулятора із різними значеннями корисного навантаження

Якщо відбувається зміна інерції приводної системи (рис. 2.4, 2.5), то результати такої зміни стають відносно незначними, тобто перехресний зв'язок між кутовим і радіальним напрямком майже непомітні. В результаті, прискорення виглядає порівняно рівним.

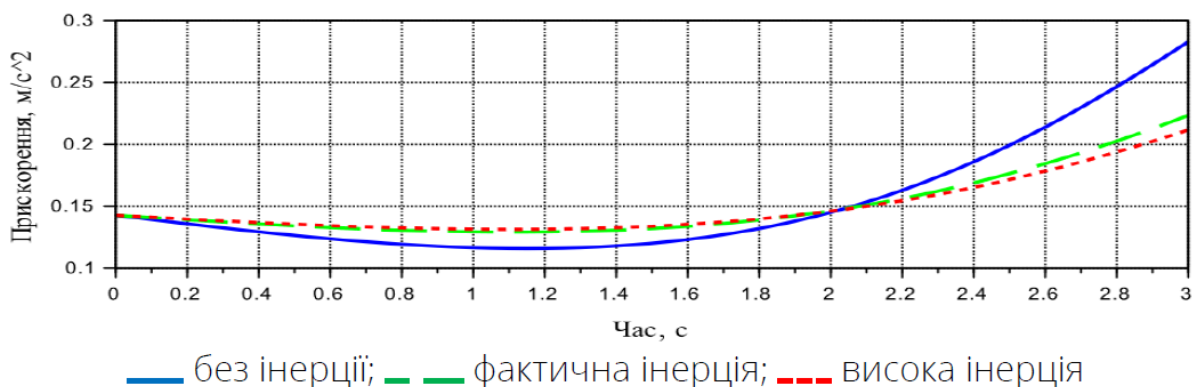


Рисунок 2.4 – Переміщення радіальної ланки триланкового робота-маніпулятора при різних значеннях інерції

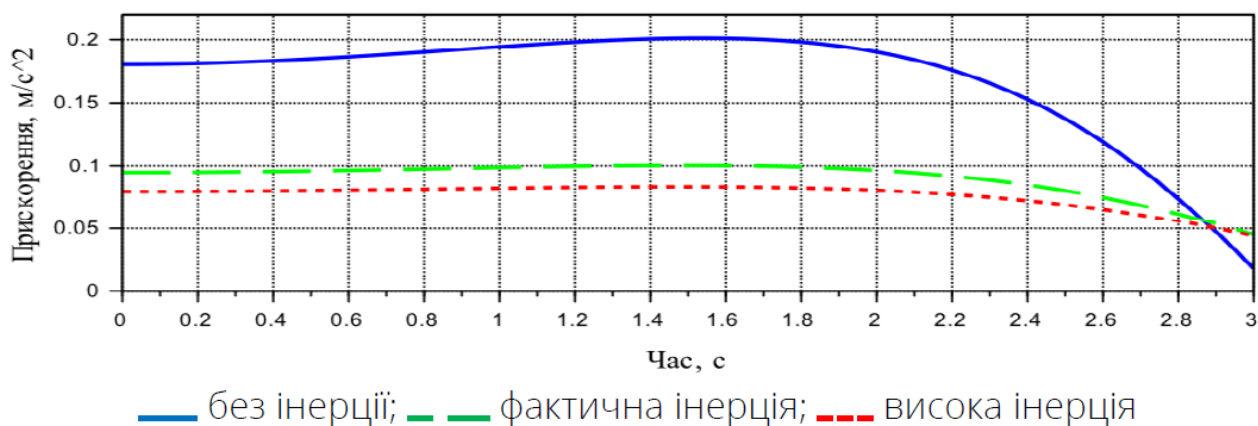


Рисунок 2.5 – Прискорення кутової ланки триланкового робота-маніпулятора при різних значеннях інерції

Після отримання таких залежностей, можна отримати зворотну динамічну модель на основі прямої динамічної моделі. Для побудови зворотної динамічної моделі необхідно задати спільні змінні та їх перші похідні, після чого можна виконати обрахунок узагальнених сил.

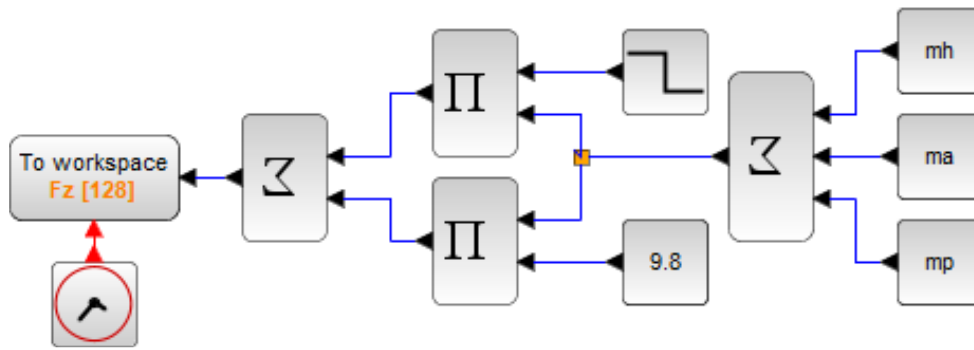
Після перетворень рівнянь 2.9 – 2.11 зворотна динамічна модель набуває наступного вигляду:

$$F_r = \dot{r}m - \frac{\theta^2}{2m} \left(2rm_p + ((l-r)^2 + r^2) \cdot \frac{3m_a}{4l} \right), \quad (2.12)$$

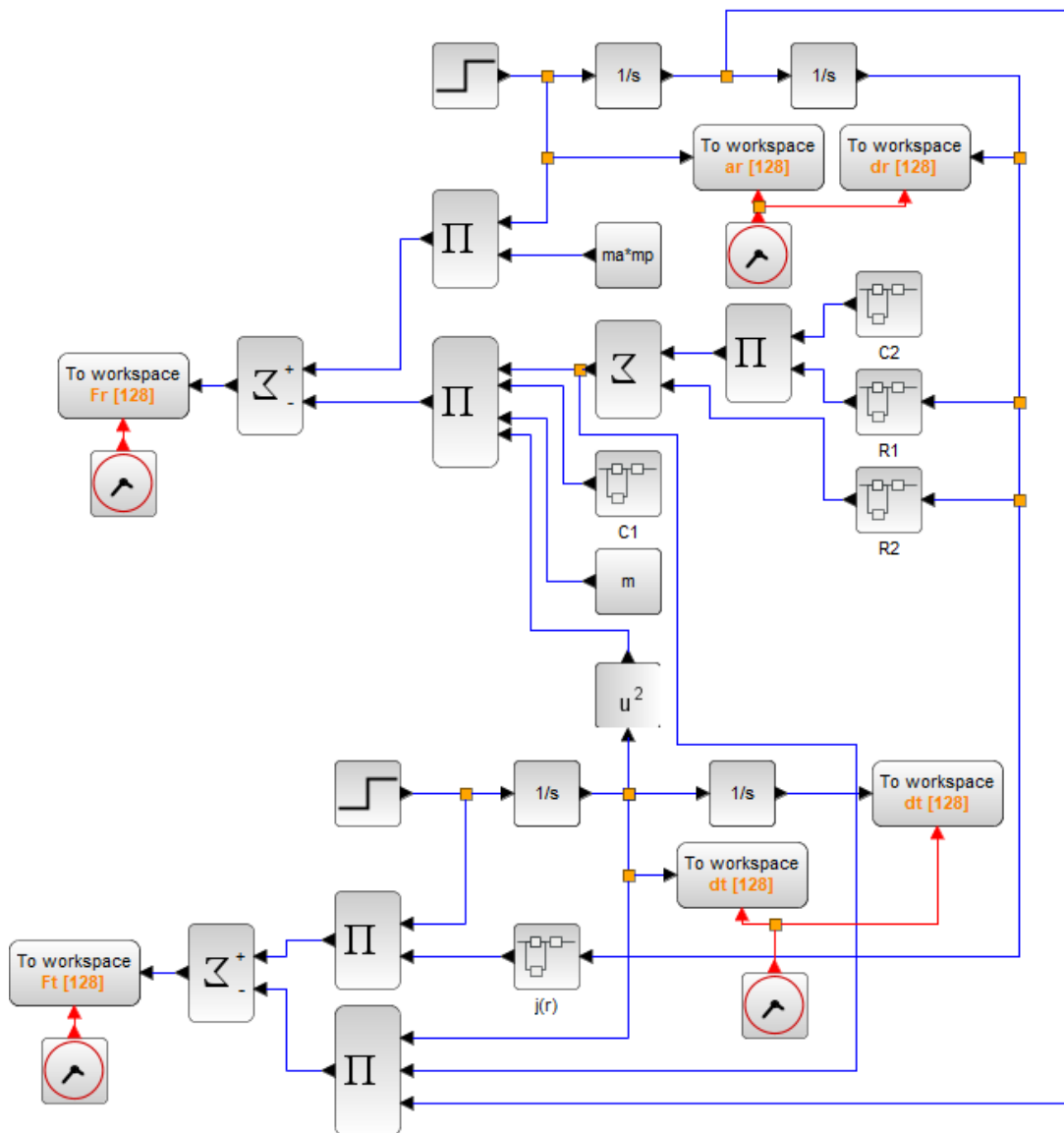
$$F_\theta = \theta^2(j_r + J) + \dot{\theta}\dot{r} \left(2rm_p + ((l-r)^2 + r^2) \cdot \frac{3m_a}{4l} \right), \quad (2.13)$$

$$F_z = gm_v + \ddot{z}m_v. \quad (2.14)$$

Аналогічно до прямої динамічної моделі триланкового міні робота-маніпулятора за допомогою Scilab була побудована модель на основі зворотної динамічної моделі (рис. 2.6), яка використовується для визначення необхідних моментів (рис. 2.7) та сил (рис. 2.8) привода при заданих прискореннях. Моделювання виконувалось для значень корисного навантаження, які становлять 1 і 5 кг.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Зворотна динамічна модель триланкового міні робота-маніпулятора:

а – для вертикального напрямку; б – для кутового та радіального напрямку

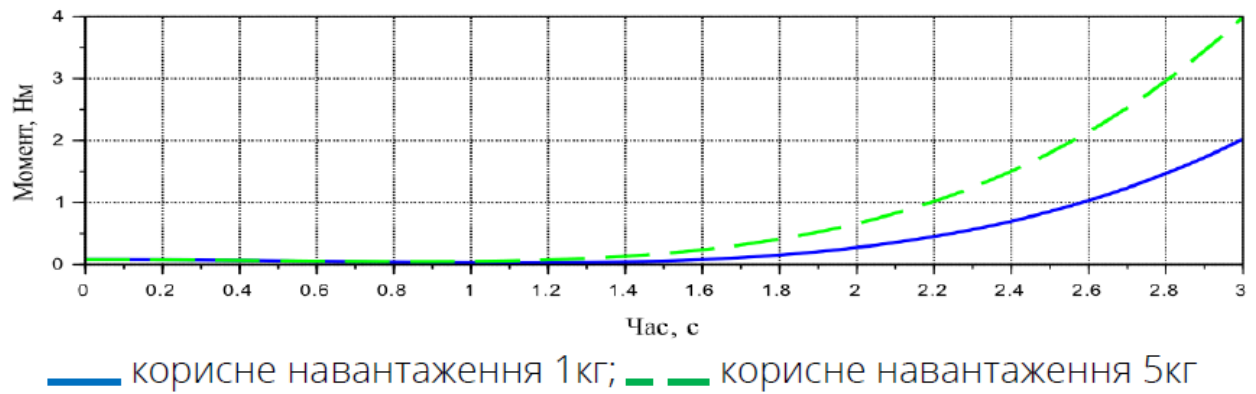


Рисунок 2.7 – Сила радіальної ланки робота-маніпулятора при різних корисних навантаженнях

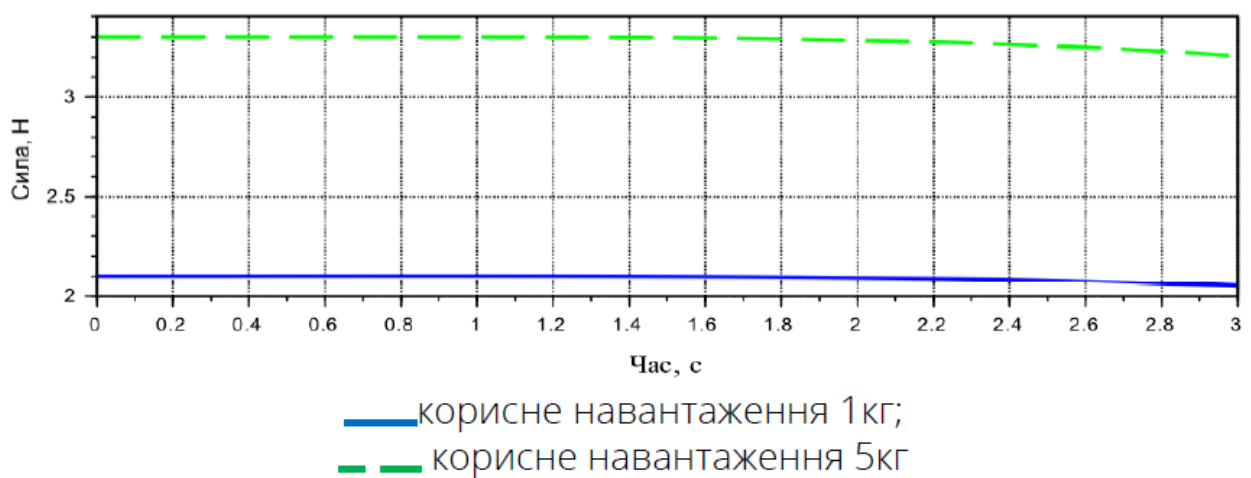


Рисунок 2.8 – Момент кутової ланки робота-маніпулятора при різних корисних навантаженнях

Для досягнення ефективного керування триланковим міні роботом-маніпулятором необхідно підтримувати динамічну реакцію робота-маніпулятора відповідно до попередньо визначеної продуктивності. Таке завдання ускладнюється рядом факторів, до яких відносяться гравітаційні навантаження на ланки маніпулятора, взаємні впливи, інерційні ефекти та нелінійність [36]. Виконання такої задачі стає неможливим без створення динамічної моделі системи, що досліджується.

Основною метою дослідження такої моделі є розроблення відповідного механізму керування. Для кожної із трьох ланок робота-маніпулятора необхідно

використати незалежні ПД-регулятори з швидкістю та опорними положеннями, які визначаються наступним відношенням:

$$\tau = (\theta_d - \theta)K_p + (\dot{\theta}_d - \dot{\theta})K_v. \quad (2.15)$$

Відповідно, формули 2.9 – 2.11 перетворюються у наступні:

$$\ddot{r} = \frac{(r_d - \dot{r})K_{vr} + (r_d - r)K_{pr}}{m} + \left(2r^2 m_p + ((l - r)^2 + r^2) \frac{3m_a}{4l} \right) \frac{\dot{\theta}^2}{2m}, \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & ((\dot{\theta}_d - \dot{\theta})K_{v\theta} + (\theta_d - \theta)K_{p\theta}) + \\ & + \dot{\theta} \dot{r} \left(- \left(2r^2 m_p + ((l - r)^2 + r^2) \frac{3m_a}{4l} \right) \right) \frac{1}{j_{(r)} + J}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\ddot{z} = \frac{(z_d - \dot{z})K_{vr} + (z_d - z)K_{pz}}{m_v} + g, \quad (2.18)$$

де $K_{vz}, K_{vr}, K_{v\theta}$ – коефіцієнти підсилення швидкості для координат z, r, θ відповідно;

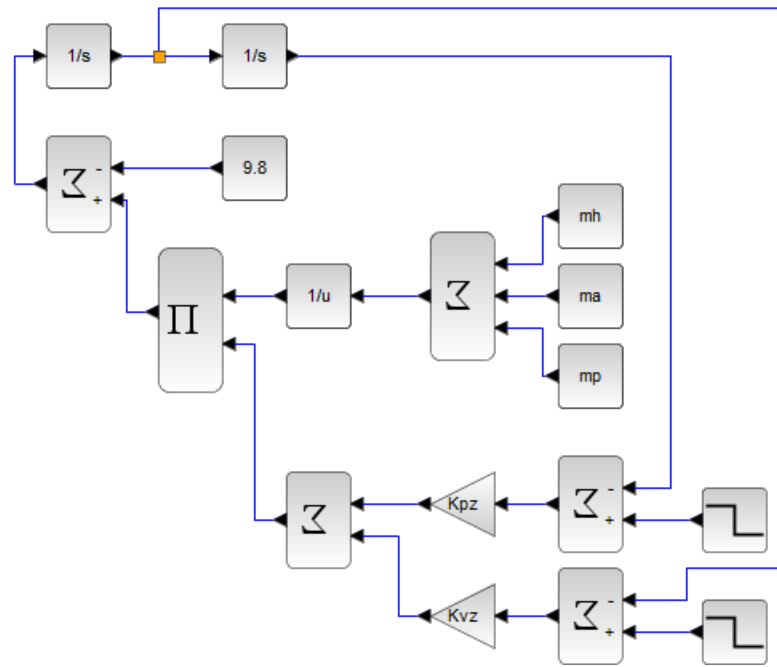
$K_{pz}, K_{pr}, K_{p\theta}$ – це коефіцієнти підсилення положення для координат z, r, θ відповідно.

На рисунку 2.9 наведена пряма динамічна модель із зворотним зв'язком. При її моделюванні були отримані наступні результати:

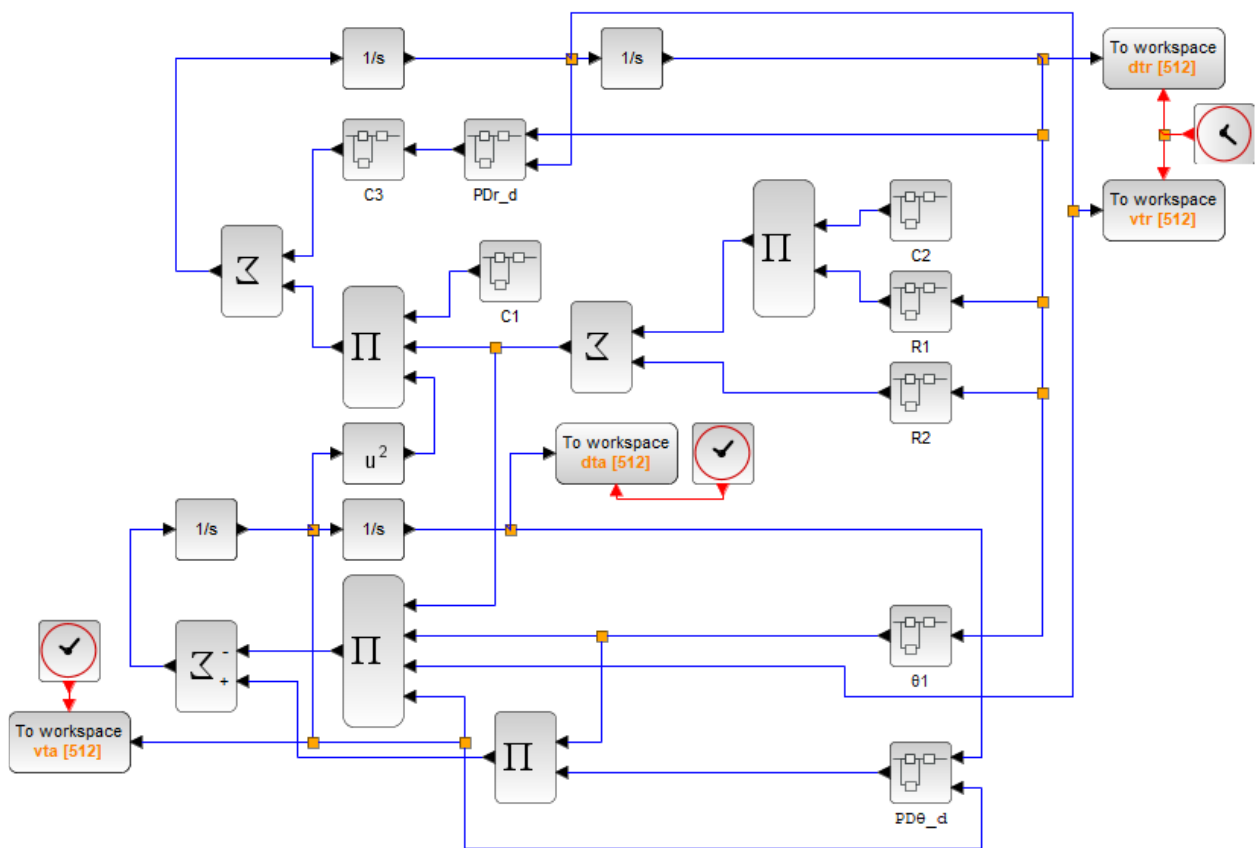
– навіть у випадку дуже малих коефіцієнтів підсилення, система демонструє нестабільність;

– при використанні тільки пропорційних регуляторів система не стабілізується.

Можна прийти до висновку, що така система потребує демпфування. Тому в якості регулятора похідного типу використовується ПД-регулятор, який додасть демпфування до системи та дозволить зменшити похибку усталеного стану. Завдяки зменшенні цієї похибки в системі можна буде використати високі пропорційні коефіцієнти підсилення.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Пряма динамічна модель триланкового міні робота-маніпулятора із зворотним зв'язком:

а – для вертикального напрямку; б – для кутового та радіального напрямку

Більш чутливою до змін система стає при використанні ПД-регулятора, завдяки чому можна досягнути швидкої реакції. Якщо коефіцієнт K_{pr} змінюється в межах від 100 до 250, то в системі не спостерігається суттєвий взаємний вплив поворотних з'єднань. Аналогічні результати характерні і для ситуації, якщо коефіцієнт радіальної ланки $K_{r\theta}$ змінюється в межах від 100 до 250. Можна зробити висновок, що цьому діапазону не характерний сильний зв'язок між ланками робота-маніпулятора.

Проте, у випадку зміни корисного навантаження на робот-маніпулятор (рис. 2.10), цей ефект стає більш помітним для фіксованих коефіцієнтів.

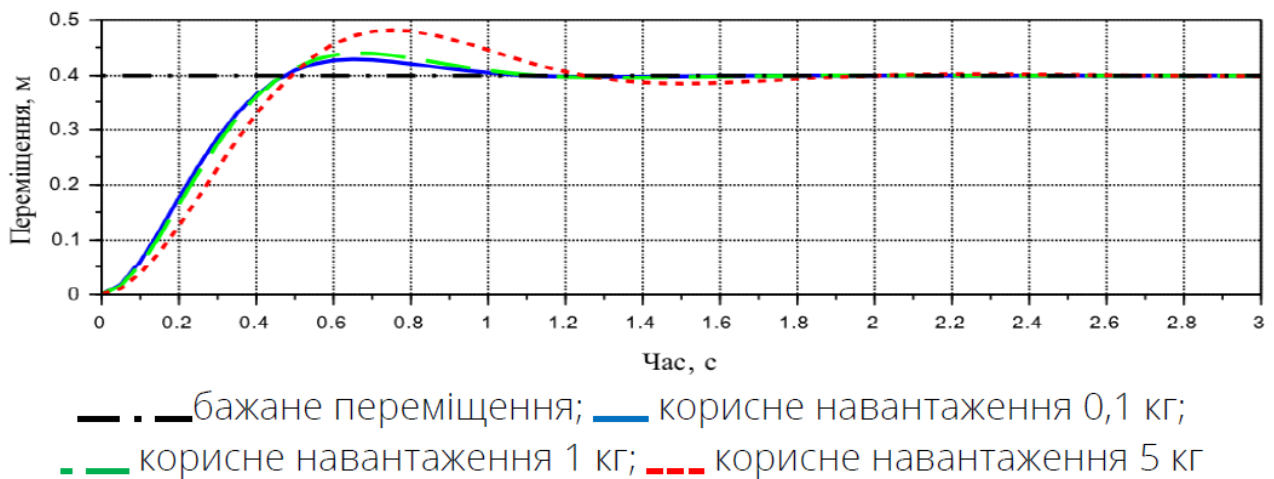


Рисунок 2.10 – Переміщення радіальної ланки робота-маніпулятора при різних корисних навантаженнях

По причині більшої інерції у випадку більших корисних навантажень підвищуються коливання радіальної ланки. Крім того, чим більше корисне навантаження, тим більший час підйому. Такий ефект можна пояснити тим, що регулятор потребує більше часу на наближення до запрограмованого бажаного кроку з метою збільшення корисного навантаження. Це показує, що налаштування радіального регулятора повинно проводитись для різних корисних навантажень окремо. В результаті такого налаштування можна буде досягнути необхідної продуктивності робота-маніпулятора. Однак планування коефіцієнтів

підсилення не є необхідністю для кутової ланки, що видно з рисунку 2.11. Це пояснюється тим, що кутова ланка розташована симетрично до поздовжньої осі.

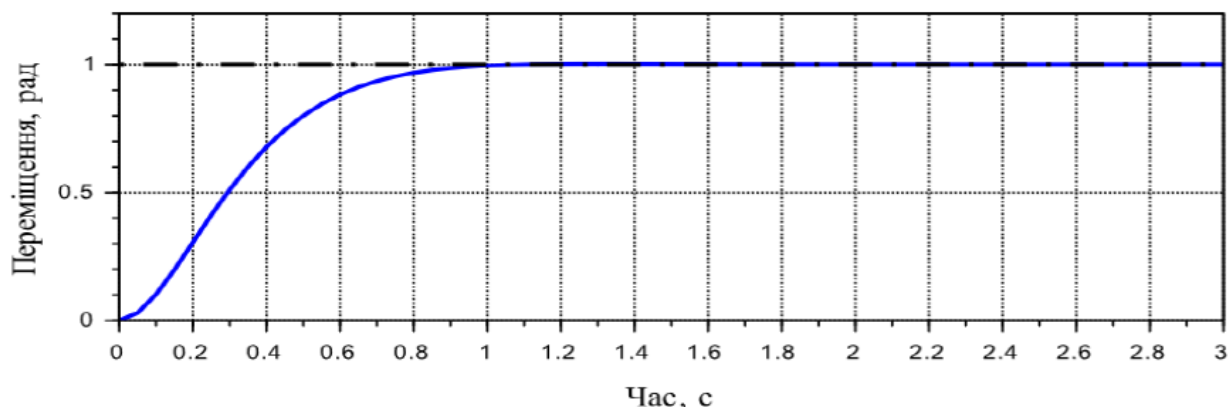


Рисунок 2.11 – Переміщення кутової ланки робота-маніпулятора при різних корисних навантаженнях

Результати моделювання у вигляді лінійних сегментів для траєкторії руху триланкового міні робота-маніпулятора із параболічними плавними з'єднаннями показані на рисунку 2.12. З рисунку видно, що похибка відстеження незначна.

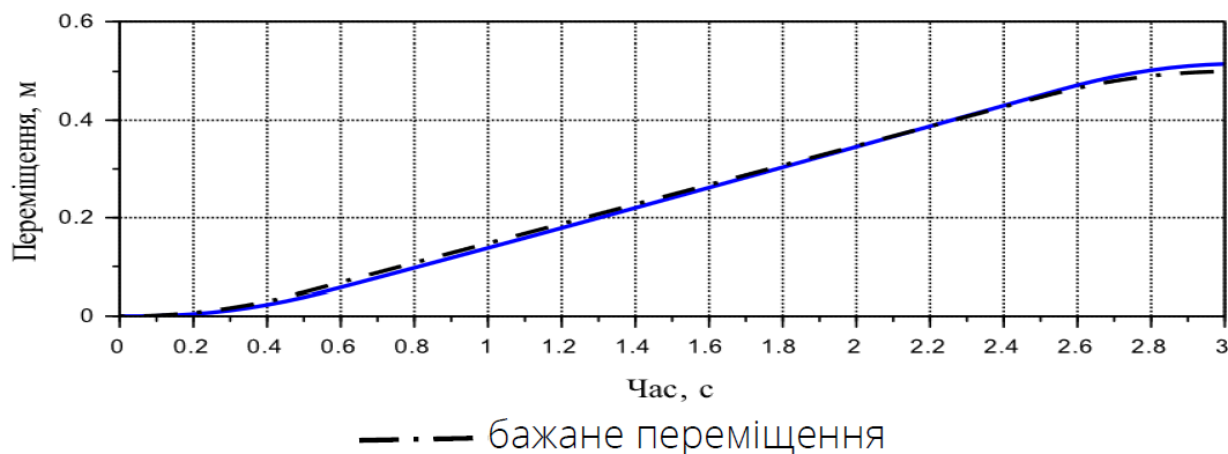


Рисунок 2.12 – Переміщення радіальної ланки робота-маніпулятора за траєкторією руху у вигляді сегментів

Після проведення математичного моделювання динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора встановлено, що йому характерний

слабкий динамічний вплив зв'язків шарніра із інерцією систем привода. Завдяки незначному впливу кожен із систем привода можна розглядати окремо, тобто вважати, що вона виконує рух із постійним навантаженням.

2.3 Результати математичного моделювання роботи триланкового міні робота-маніпулятора

Для знаходження однорідної матриці перетворення довжини та кута зв'язку θ , необхідно визначити довжину всіх зв'язків у роботі-маніпуляторі та кути, які використовуються для підйому об'єктів.

Параметри довжини ланок та кутів будуть наступними:

- довжина першої ланки L_1 становить 1,2 см, а кут θ_1 становить 90° ;
- довжина другої ланки L_2 становить 13,8 см, а кут θ_1 становить 75° ;
- довжина третьої ланки L_3 становить 13,8 см, а кут θ_1 становить 0° .

Відповідно до математичної моделі визначення кінематичних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора (див. розділ 2.1) та на основі формул 2.2 – 2.4, кінематичні параметри будуть наступні:

$$T_1^0 = \begin{vmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.19)$$

$$T_2^1 = \begin{vmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & L_2 \cdot \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2 \cdot \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,25 & -0,96 & 0 & 0,035 \\ 0,096 & 0,25 & 0 & 0,133 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.20)$$

$$T_3^2 = \begin{vmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_2 \cdot \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & L_3 \cdot \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,014 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.21)$$

Тоді,

$$T_3^0 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0,25 & -0,96 & 0 & 0,035 \\ 0,096 & 0,25 & 0 & 0,133 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,014 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \\ = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0,25 & -0,96 & 0 & 0,07 \\ 0,96 & 0,25 & 0 & 0,26 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

При визначенні просторової швидкості руху з'єднань застосовується матриця Якобі (формула 2.8). Результати розрахунку для триланкового міні робота-маніпулятора будуть наступні:

$$\theta = |6,16 \ 6,16 \ 6,16|^T. \quad (2.23)$$

На цьому етапі враховуються параметри сервоприводу, які становлять:

- перший кут $\theta_1 = 90^\circ$;
- другий кут $\theta_2 = 75^\circ$;
- третій кут $\theta_3 = 0^\circ$.

Оскільки швидкість визначається за формулою

$$v = \theta \cdot J \quad (2.24)$$

тоді параметр матриці Якобіан:

$$J = \begin{bmatrix} 6,16 \\ 6,16 \\ 6,16 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,83 & -0,07 & -0,035 \\ -0,26 & -0,26 & -0,13 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Маючи значення кута і показник матриці Якобіан, можна виконати розрахунок швидкості:

$$v = \begin{bmatrix} -5,7 \\ -4,09 \\ 18,5 \end{bmatrix} \frac{\text{рад.}}{\text{сек}} \quad (2.26)$$

2.4 Висновки до другого розділу

В розділі наведено розроблену математичну модель для кінетичних та динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора. Визначено ДН параметри робота-маніпулятора та визначник матриці Якобіан.

Після проведення математичного моделювання динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора встановлено, що йому характерний слабкий динамічний вплив зв'язків шарніра із інерцією систем привода. Завдяки незначному впливу кожному із систем привода можна розглядати окремо, тобто вважати, що вона виконує рух із постійним навантаженням.

Також у розділі було проведено розрахунок параметрів на основі розробленої математичної моделі для триланкового міні робота-маніпулятора.

3 МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТРИЛАНКОВОГО МІНІ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

3.1 Побудова моделі

Окрім підбору обладнання для моделі триланкового міні робота-маніпулятор, необхідно виконати моделювання його конструкції. Для такого моделювання було використано програмний пакет Autodesk Inventor [14, 15], завдяки чому в результаті побудованої моделі можна виконати конструювання зв'язків робота.

Студентська версія Autodesk Inventor розповсюджується безкоштовно за умови реєстрації на сайті в якості студента, в результаті чого можна отримати програмний продукт на 30 днів пробного періоду [37].

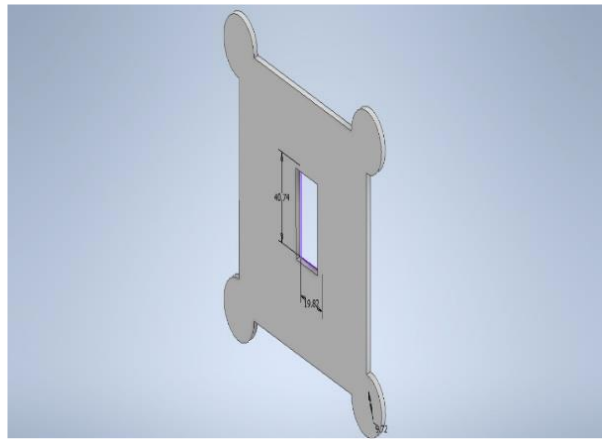
Тривимірна модель триланкового міні робота-маніпулятора наведена на рисунку 3.1.

Конструктивно модель робота-маніпулятора складається із квадратної основи, довжина якої становить 90 мм. Крім того, в основі передбачено отвір для розміщення в ньому сервоприводу (рис. 3.1, а). Розміри отвору становлять 40,74 мм довжина та 19,82 мм ширина. З'єднувальна ланка робота-маніпулятора (рис. 3.1, б) має довжину 138 мм, а товщину – 2,5 мм.

При виготовленні триланкового міні робота-маніпулятора передбачається використання технології тривимірного друку, оскільки деталі в такого робота мають малі розміри. Передбачається використання 3D-принтеру серії F123 виробника Stratasys [38].

Цей 3D-принтер базується на використанні технології FDM, тобто виконання моделювання методом направлення, а їх основне призначення полягає у швидкому прототипуванні. Також вони підтримують широкий спектр матеріалів, від PLA до інженерних пластиків, наприклад ASA, ABS, PC-ABS.

Перевагами використання саме цього 3D-принтеру є можливість використання великої кількості видів матеріалу, віддалений контроль через смартфон, безшумність роботи, тощо [39].



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Тривимірна модель триланкового міні робота-маніпулятора:

а – основа; б – з'єднувальна ланка; в – тривимірна модель в зборі

3.2 Мікроконтролер

У роботах-маніпуляторах мікроконтролер виконує функцію центрального керуючого елемента, який забезпечує координацію роботи всіх вузлів системи – датчиків, приводів, виконавчих механізмів та інтерфейсів зв'язку. Завдяки високому рівню інтеграції мікроконтролер дозволяє реалізувати алгоритми керування в реальному часі, здійснювати зворотний зв'язок та забезпечувати точне позиціонування маніпулятора відповідно до заданих параметрів. Це особливо важливо для автоматизованих систем, де потрібна синхронізація декількох ступенів свободи та динамічна корекція рухів залежно від зовнішніх умов [40].

Крім того, використання мікроконтролера сприяє підвищенню енергоефективності та надійності роботи маніпулятора завдяки можливості оптимізації алгоритмів керування та моніторингу технічного стану системи. Мікроконтролер може виконувати попередню обробку даних із сенсорів, мінімізуючи затримки передачі інформації до вищого рівня керування, або працювати автономно в локальному контурі регулювання. Це дозволяє забезпечити адаптивність маніпулятора до змін у навколишньому середовищі, стабільність роботи при наявності перешкод та високу точність виконання технологічних операцій [41].

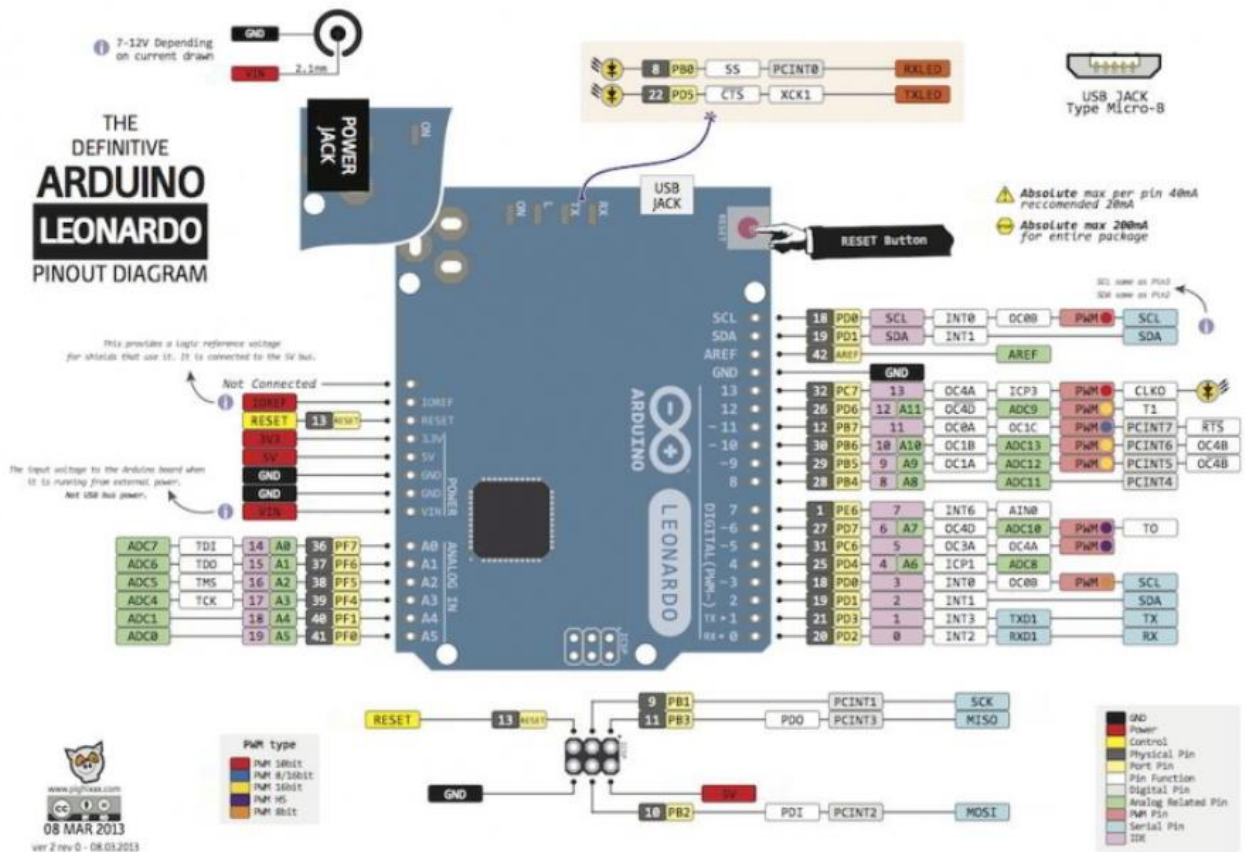
В якості мікроконтролера для триланкового міні робота-маніпулятора передбачається використання мікроконтролера Arduino Leonardo (рис. 3.2). Вартість мікроконтролера становить 290 гривень [42].

Цей мікроконтролер виконаний на базі чіпа Atmel ATmega32u4 (рис. 3.3). Цей чіп має 20 цифрових виходів/входів, при чому в якості ШИМ можуть використовуватись 7 з них, а 12 використовуються як аналогові [43]. Технічні характеристики мікроконтролера наведені у таблиці 3.1.

Крім того, в мікроконтролері наявний кварцевий резонатор на 16 МГц, роз'єм живлення, роз'єм мікро-USB, кнопка скидання та роз'єм для внутрішньосхемного програмування ICSP.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Мікроконтролер Arduino Leonardo:
а – зовнішній вигляд; б – розпіновка виходів

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики Arduino Leonardo [43]

Характеристика	Показник
Робоча напруга, В	5
Тактова частота, МГц	16
Кількість цифрових входів/виходів, штук	20
Напруга живлення, В рекомендована гранична	7-12 6-20
Максимальний струм одного виводу, мА	40
Кількість аналогових входів, штук	12
EEPROM, Кб	1
Флеш-пам'ять, Кб	32
SRAM, Кб	2,5

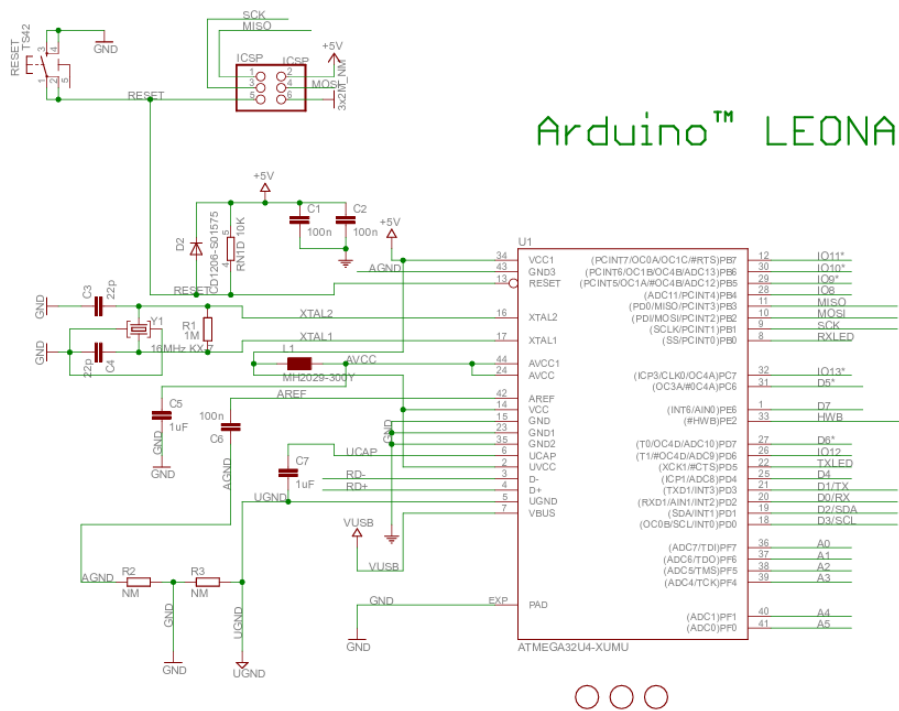


Рисунок 3.4 – Схема підключення мікроконтролера

Основна відмінність мікроконтролера Arduino Leonardo полягає в тому, що його контролер USB безпосередньо вбудований в чіп. В результаті цього відсутня

необхідність використання додаткового процесору. Тобто, якщо під'єднати мікроконтролер до комп'ютера, то він буде розпізнаватись і як клавіатура з мишею, а не тільки як віртуальний СОМ-порт.

3.3 Сервопривід

Керування сервоприводом робота-маніпулятора планується через використання техніки перетворення цифрових сигналів для керування аналоговими схемами, тобто буде використовуватись імпульсна широтна модуляція. Сервопривід запускається під прямим кутом і може виконувати рухи в обох напрямках на однакову відстань, тобто загальний кут становить 180°.

Сервопривід – це механізм, який використовується в системах, в яких необхідно виконувати керування та забезпечувати високу точність рухів. Він складається із двигуна, датчика зворотного зв'язку та системи керування. Завдяки датчику сервоприводу можна виконувати точне контролювання положення, прискорення та швидкості об'єкта [44].

Робота сервоприводу базується на отриманні імпульсного сигналу, який виступає у ролі керуючого значення. Цей сигнал визначає кут поворотку. Далі, отриманий параметр порівнюється блоком керування. В залежності від результату порівняння, блок керування повертає сигнал із вказанням дії, яку необхідно виконати: пришвидшитись, сповільнитись або повернутись.

Для триланкового міні робота-маніпулятора було обрано сервопривід MG996R (рис. 3.5). Основний принцип вибору саме цього сервоприводу полягав у тому, що він має невеликі габаритні розміри. Вартість цього сервоприводу становить 186 гривень. Технічні характеристики наведені у таблиці 3.2, а підключення до мікроконтролера наведено на рисунку 3.6 [45].



Рисунок 3.5 – Сервопривід MG996R

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики сервоприводу MG996R [45]

Характеристика	Показник
Вага, г	55
Робоча напруга, В	4,8 – 6
Кут повороту, °	180
Матеріал механізму	Метал
Швидкість, с/60°	Від 0,19 до 0,18
Крутний момент, кг/см	Від 9 до 11
Розміри, мм	40,7 x 19,7 x 42,9

Для визначення максимальної ваги, яку зможе нести сервопривід за умови довжини з'єднання 13,8 см, використовуємо формулу:

$$\tau = G \cdot R \cdot M, \quad (3.1)$$

де G – гравітаційне прискорення, м/сек²;

M – вага, г;

R – відстань, см;

τ – крутний момент, Н/м.

Тобто, вага, яку здатен нести сервопривід, становить:

$$M = \frac{\tau}{G \cdot R} = \frac{9400}{13,8 \cdot 9,81} = 69,5 \text{ г.} \quad (3.2)$$

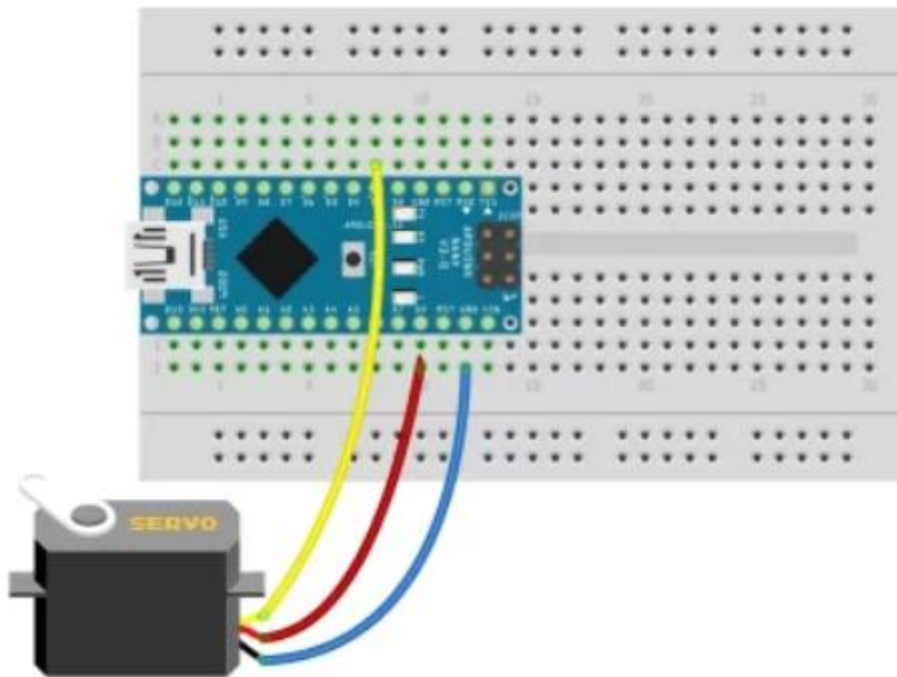


Рисунок 3.6 – Підключення сервоприводу до мікроконтролера

В процесі роботи пристрої, які призначені для підйому та переміщення об'єктів та мають декілька ступенів свободи, можуть мати різні ланки із різними вимогами, які ставляться до таких їх характеристик як точність, вага та швидкість. Оскільки одна з ланок триланкового міні робота-маніпулятора вдвічі менша за дві інші, в роботі системи необхідно передбачити використання двох сервоприводів.

Наприклад, на плечі, яке буде виконувати порівняно великі траєкторії руху, передбачається встановлення сервоприводу MG996R. Тобто, він використовується для керування підйому об'єкта та власної ваги плеча. А для керування захватом невеликих об'єктів, де необхідна висока точність та швидкість необхідно передбачити використання міні сервоприводу.

Це можна пояснити тим, що якщо використовувати потужний сервопривід на всіх осях руху ланок робота-маніпулятора, то збільшиться його вага, що

суперечить основній меті роботи – створити робота-маніпулятора невеликого розміру з невеликою вагою. Крім того, використання міні сервоприводу дозволить досягнути вищої точності та призведе до оптимізації роботи робота-маніпулятора.

Для триланкового міні робота-маніпулятора сервопривід MG996R передбачається для плеча та основи. В плечі його функція полягає у виконанні руху руки, а в основі – за поворот в горизонтальній площині. Такий вибір пояснюється тим, що для підйому необхідно забезпечити великий момент по причині ваги об'єкта та ланок.

У випадку із захватом міні сервопривід призначений для відкривання захвату та його орієнтації в просторі. Причина такого вибору полягає в тому, що у об'єкта невелика вага, тому необхідно досягнути високих значень точності та швидкості.

В якості мікро сервоприводу було обрано модель Tower Pro SG90 (рис. 3.7). Технічні характеристики сервоприводу наведені у таблиці 3.3, а вартість становить 120 гривень [46].



Рисунок 3.7 – Мікро сервопривід Tower Pro SG90

Ця модель сервоприводу представляє собою якісний та легкий мікро сервопривід, який має невелику вартість, а вага шестерні може класифікуватись як ультралегка, оскільки становить всього 9 г.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики мікро сервоприводу Tower Pro SG90

[46]

Характеристика	Показник
Вага, г	14,7
Частота, мкс	1520
Тип двигуна	Колекторний
Габаритні розміри, мм	23 x 12 x 28,5
Матеріал корпусу та редуктора	Пластик
Швидкість, сек/60°	0,1 – 0,12
Живлення, В	4,8 – 6
Зусилля, кг/см	1,2 – 2,5

Розрахунок моменту для сервоприводу виконується за формулою:

$$M = \left(\frac{L_1 m_1}{2} + \left(\left(\frac{L_2}{2} + L_1 \right) m_2 \right) + (L_2 + L_1) m_3 \right) \cdot g, \quad (3.3)$$

де m_1, m_2, m_3 – вага плеча, передпліччя та об'єкта відповідно, кг;

L_1, L_2 – довжина плеча та передпліччя відповідно, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для сервоприводу MG996R становитиме:

$$M_1 = \left(\frac{0,138 \cdot 0,1}{2} + \left(\left(\frac{0,138}{2} + 0,138 \right) 0,08 \right) + (0,138 + 0,138) 0,05 \right) \cdot 9,81 = 3,7 \text{ кг} \cdot \text{см}. \quad (3.4)$$

Сервопривід моделі MG996R має значення від 9 до 11 кг·см, тобто запас в такому випадку становить х3.

Для підйому об'єкта передпліччям формула набуває наступного вигляду:

$$M = \left(\frac{L_2 m_2}{2} + L_2 m_3 \right) \cdot g. \quad (3.5)$$

Тоді

$$M_2 = (0,0069 \cdot 0,0052) \cdot 9,81 = 1,24 \text{ кг} \cdot \text{см}. \quad (3.5)$$

Тобто, у випадку сервоприводу моделі SG90 запас становить 1,5, оскільки в його характеристиках визначено значення 1,8 кг·см. Тому, для передпліччя більш оптимальним вибором буде сервопривід моделі SG90, хоча допустиме використання моделі MG996R (рис. 3.8).

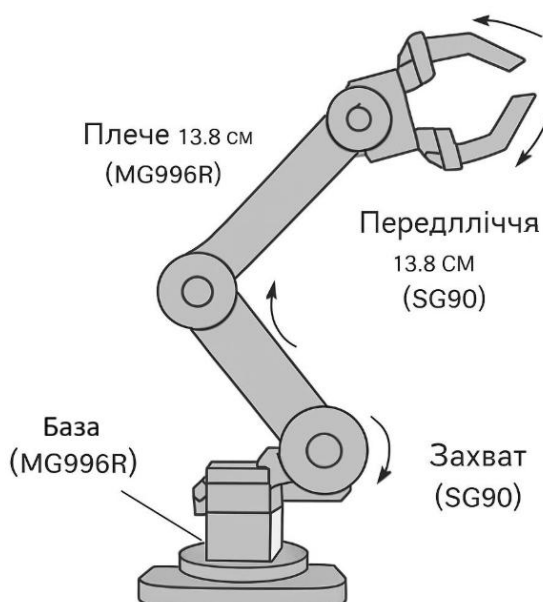


Рисунок 3.8 – Сервоприводи в триланковому міні роботі-маніпуляторі

3.4 Датчики та модулі

Для розпізнавання наявності об'єкта, який підлягає підйому роботом-маніпулятором, необхідно передбачити в конструкції робота інфрачервоний датчик. Основними критеріями при виборі датчика стали:

- компактні габаритні розміри, оскільки габаритні розміри самого робота-маніпулятора невеликі, необхідно передбачити датчик із легким кріпленням, який

при цьому не буде мати значний вплив на інерцію чи вагу, а також не перешкоджатиме вільності руху;

– коректність діапазону вимірювань, оскільки робот-маніпулятор передбачається для підйому невеликих об'єктів, дуже важливим є висока точність роботи маніпулятора, тобто висока точність отримання даних із датчика;

– точність, оскільки поле операцій робота-маніпулятора буде мати невеликі розміри, приблизно виглядатиме у вигляді сфери із радіусом 13,8 см, тому важливо, щоб похибка роботи датчика була мінімальною.

Із наявних на ринку продукції ІЧ датчиків було обрано датчик Sharp GP2Y0A41SK0F (рис. 3.9), технічні характеристики якого наведено у таблиці 3.4, а вартість становить 199 гривень [47].

Підключення датчика до мікроконтролера наведено на рисунку 3.10.



Рисунок 3.9 – ІЧ датчик Sharp GP2Y0A41SK0F

Цей датчик було обрано в першу чергу по причині відстані вимірювань, яка лежить в межах від 4 до 30 см. Враховуючи габаритні розміри плеча міні робота-маніпулятора, це буде більш ніж достатньою відстанню.

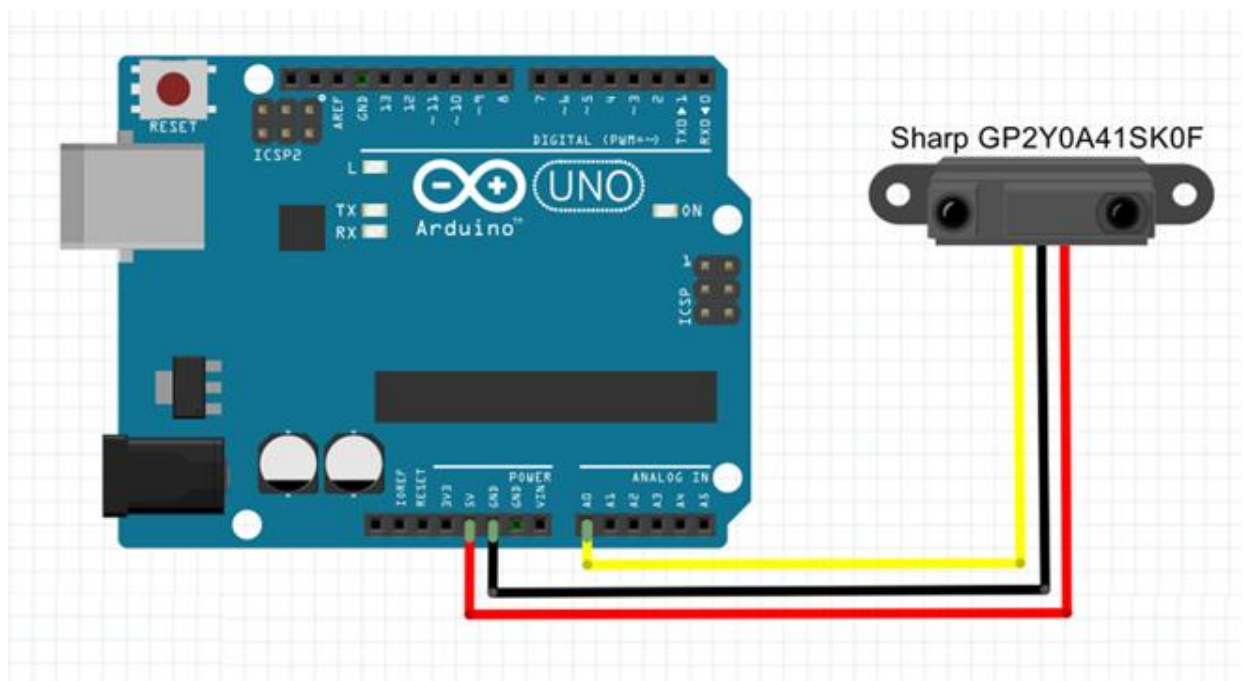


Рисунок 3.10 – Підключення ІЧ датчика до мікроконтролера

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики ІР датчику Sharp GP2Y0A41SK0F

[47]

Характеристика	Показник
Розміри, мм	29,5 x 13 X 13,5
Середній споживаний струм, мА	12
Робоча напруга, В	4,5 – 5,5
Середній час оновлення інформації, мс	16,5
Вимірювана відстань, см	4-30

Цей датчик відрізняється маленьким часом відгуку та компактністю. Датчик має нелінійний вихід, в результаті чого сигнал на аналоговому виході збільшується після збільшення лінійної відстані, внаслідок чого значно підвищується ефективність роботи.

Для зв'язку триланкового міні робота-маніпулятора із смартфоном та/або комп'ютером, необхідно передбачити встановлення модулю Bluetooth. При виборі модуля для поставленої задачі необхідно враховувати ряд параметрів. В першу чергу, надійність та радіус дії модулю. Оскільки робот-маніпулятор має

невеликі габаритні розміри, то при виборі модуля для зв'язку можна обрати Bluetooth із невеликим радіусом дії, який лежить в межах 5-10 м.

Основним параметром при виборі Bluetooth модулю буде його вага, для того, щоб не змінювати баланс конструкції робота-маніпулятора. Крім того, необхідно враховувати сумісність інтерфейсу модулю із мікроконтролером.

Для триланкового міні робота-маніпулятора було обрано модуль Bluetooth 4.0 на CC2541 моделі HM-10 (рис. 3.11). Його вартість становить 244 гривні, а технічні характеристики наведені у таблиці 3.5 [48]. Підключення модулю до мікроконтролера наведено на рисунку 3.12.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики модулю Bluetooth HM-10 [48]

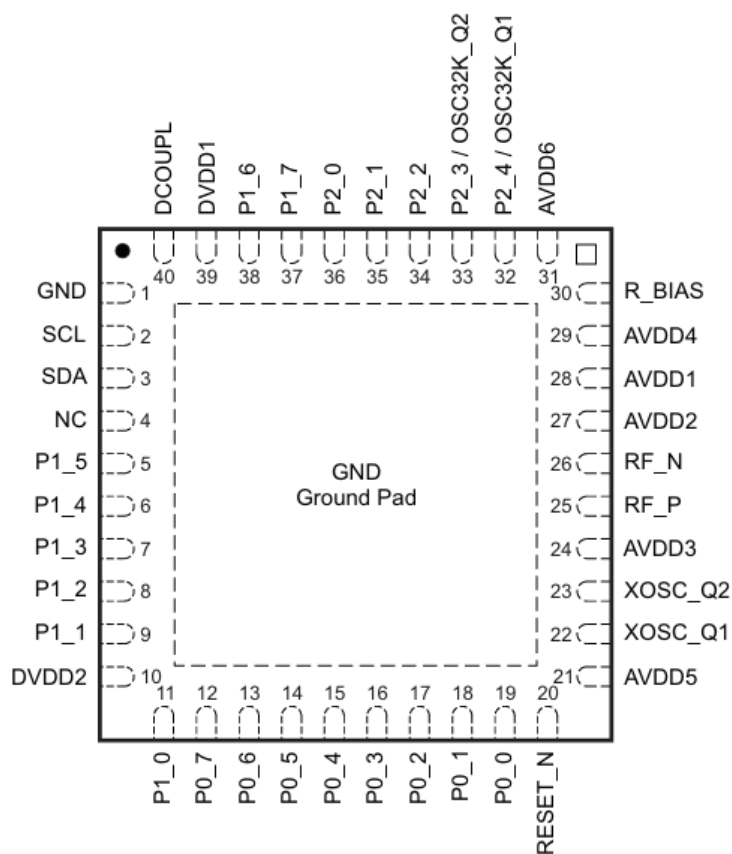
Характеристика	Показник
Температурний діапазон роботи, °С	від -40 до +85
Протокол	Bluetooth 4.0
Флеш-пам'ять, кБ	128
Швидкість передачі даних, Мбіт/с	1
Частота, МГц	2,4
Потужність передавача, дБм	0
Напруга живлення, В	3,6 – 5
Інтерфейси	I2C, SPI, UART, ADC, GPIO, PWM
Профілі	SMP, L2CAP, GATT, GAP
Чутливість приймача, дБм	-94
Схема	CC2541
Стандарт	Bluetooth Smart

Цей модуль базується на новій розробці, а саме на мікросхемі CC2541F128RHAT від Texas Instruments. Ця мікросхема представляє собою новий трансивер, основне призначення якого полягає у створення периферійних пристроїв за стандартом Bluetooth Smart. Ці пристрої здатні працювати роками

від CR2032 дискового елемента. Споживаний струм мікросхеми при роботі в режимі передачі та прийому не перевищує 20 мА.



а)



б)

Рисунок 3.11 – Модуль Bluetooth HM-10:

а – зовнішній вигляд; б – конфігурація виходів

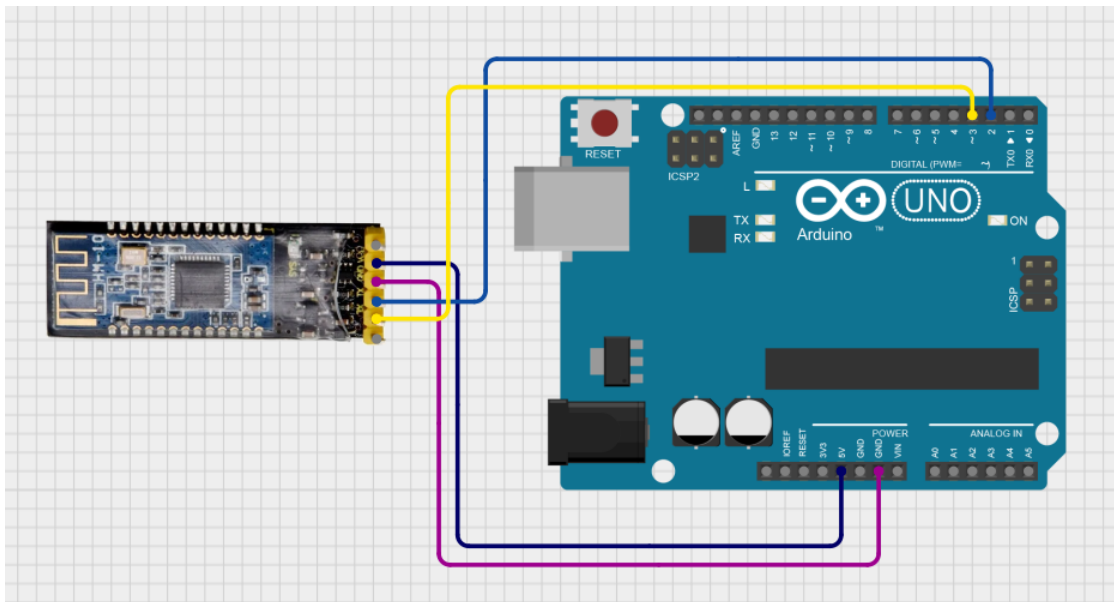


Рисунок 3.12 – Підключення модулю Bluetooth до мікроконтролера

Мікросхема в цьому модулі, а саме CC2541, сумісна із попередньою моделлю CC2540 та схожа за рядом ключових характеристик. Але наявний ряд відмінностей, до яких можна віднести знижену потужність передачі, яка становить 0 дБм. Це виконано для того, щоб споживаний струм відповідав вимогам специфікацій.

3.5 Розробка схеми підключення

Для з'єднання всіх вищеперерахованих елементів керування триланковим міні роботом-маніпулятором знадобиться, в першу чергу, макетна плата. При виборі макетної плати необхідно враховувати, що в системі керування роботом-маніпулятором наявні мікроконтролер, ІЧ датчик, модуль Bluetooth, тобто вибір повнорозмірної макетної плати не буде доцільним, оскільки залишиться багато вільного місця. В такому випадку можна обрати макетну плату, яка відповідає половині розміру повнорозмірної макетної плати.

Тому було обрано макетну плату MB-102 (рис. 3.13), яка коштує 38 гривень [49].

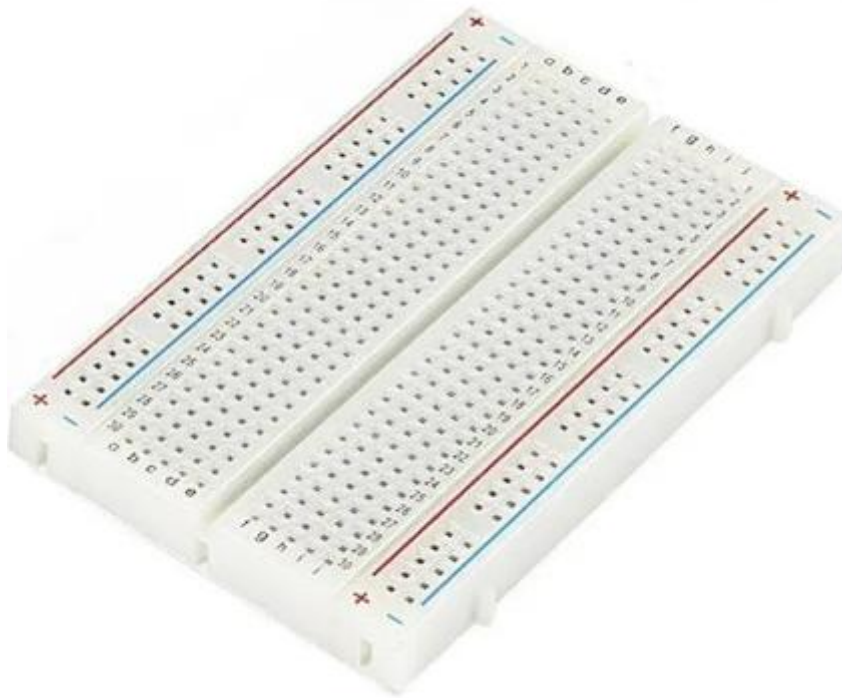


Рисунок 3.13 – Макетна плата MB-102

Крім того необхідно передбачити наявність потенціометру на 10 кОм. Такий опір був обраний тому, що він є стандартним значенням для мікроконтролеру Arduino, а саме для його аналогового виходу. Було обрано лінійний потенціометр WH148 B10K (рис. 3.14), вартість якого становить всього 6 гривень [50]. Ця модель дозволить виконувати плавну зміну опоры від 0 до 10 кОм, що значно простить керування триланковим міні роботом-маніпулятором.

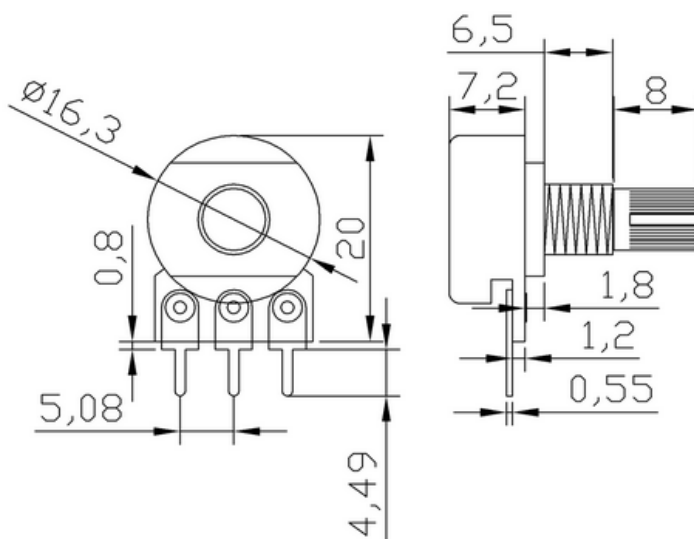
Для з'єднання всіх компонентів системи керування роботом-маніпулятором необхідно використовувати кабелі (рис. 3.15), вартість комплекту із 40 штук довжиною 20 см становить 38 гривень [51]. Цей набір перемичок призначений для з'єднання таких елементів, як наприклад мікроконтролер, із макетною платою.

Було розроблено схемі підключення вищеперерахованого обладнання, яка наведена на рисунку 3.16. Кожен потенціометр і сервопривід має три контакти. Вихідний контакт потенціометра підключається до аналогового входу мікроконтролера Arduino. В той же час вихідний контакт сервоприводу

підключається до цифрового входу мікроконтролера для керування рухом сервоприводу.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Потенціометр WH148:

а – зовнішній вигляд; б - конструкція

Для можливості керування триланковим міні роботом-маніпулятором було розроблено три різні блок-схеми керування його роботою. Перша блок-схема (рис. 3.17) передбачає ручне керування роботом за допомогою потенціометрів. Кожен із сервопривідів керується окремим потенціометром, які, в свою чергу,

підключені до аналогового порту мікроконтролера. Сервоприводи підключаються до ШІМ виводу мікроконтролера. Основним елементом керування роботою робота-маніпулятора є мікроконтролера Arduino Leonardo, а живлення виконується через зовнішнє джерело.



Рисунок 3.15 – Кабелі для з'єднання

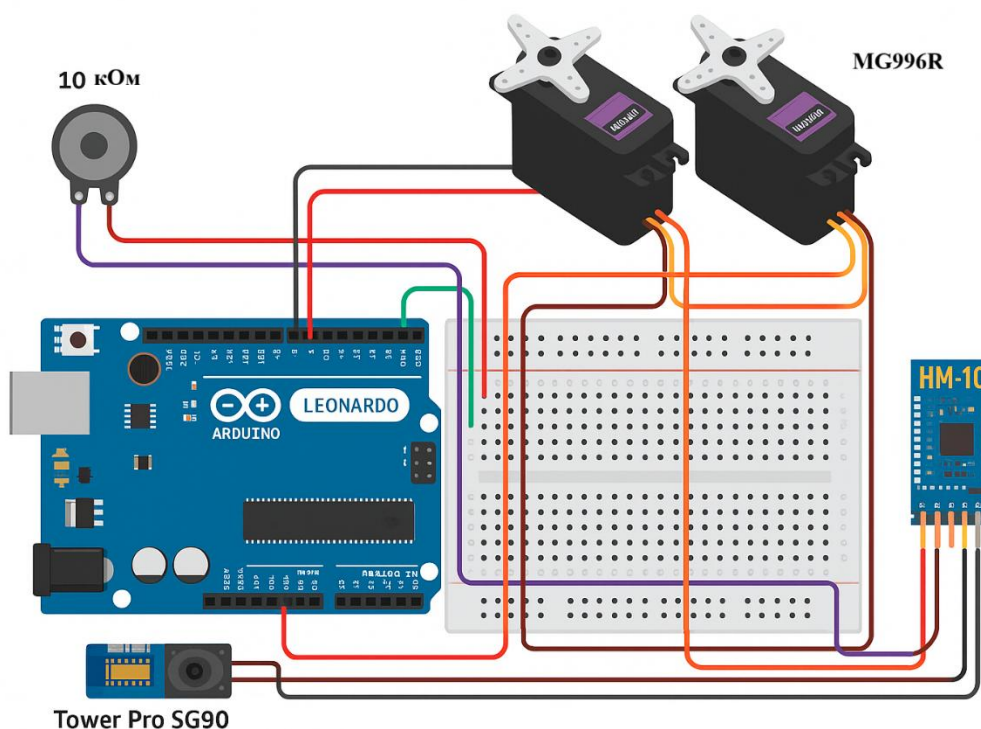


Рисунок 3.16 – Схема підключення

Другий варіант керування передбачається через мобільний додаток зі смартфона за допомогою Bluetooth модуля. В цьому випадку схема керування

показана на рисунку 3.18. Модуль Bluetooth та сервоприводи підключені до ШІМ мікроконтролера, а також в якості живлення використовується зовнішнє джерело.

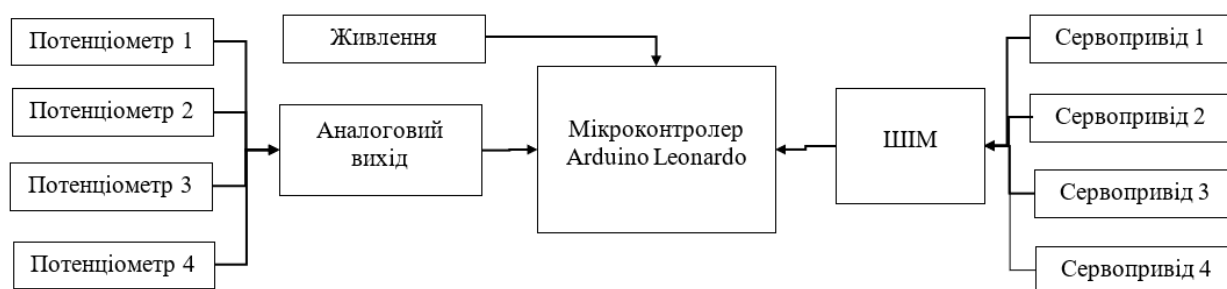


Рисунок 3.17 – Схема керування роботом-маніпулятором для ручного керування

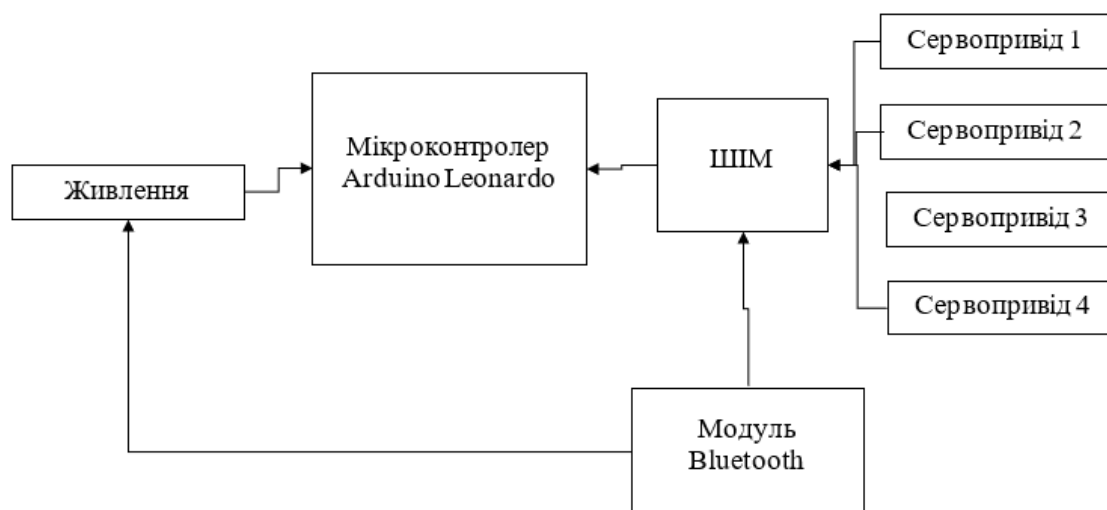


Рисунок 3.18 - Схема керування роботом-маніпулятором через Bluetooth модуль

Остання схема керування (рис. 3.19) передбачає керування роботою робота-маніпулятора в автоматичному режимі за допомогою ІЧ датчика. В цьому випадку використовується два окремі мікроконтролери типу Arduino, а саме Arduino UNO та Arduino Leonardo. Перший з мікроконтролерів виконує керування роботою сервоприводу на захваті руки робота-маніпулятора. Двигун робота-маніпулятора вмикається тільки у випадку спрацювання ІЧ датчика. Датчик в цьому випадку використовується для виявлення об'єкту в полі дії робота-маніпулятора, а при спрацюванні датчика автоматично закривається

захват руки. Другий мікроконтролер виконує керування трьома сервоприводами, які підключені через ШІМ.

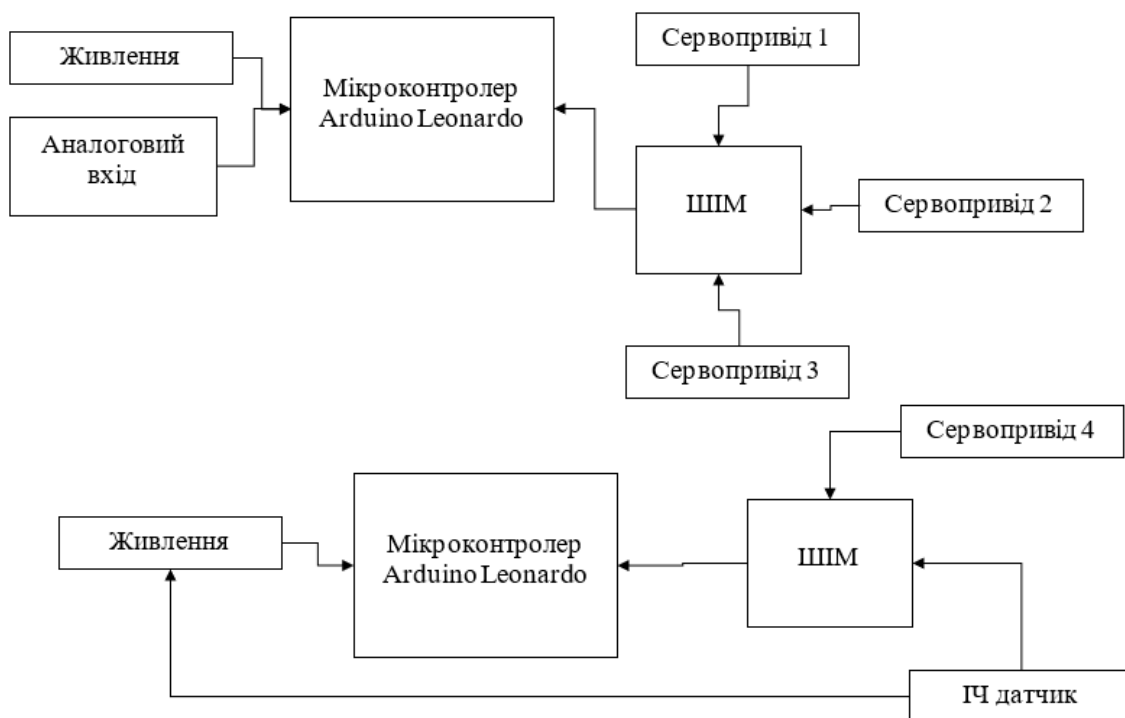


Рисунок 3.19 - Схема керування роботом-маніпулятором з використанням ІЧ датчику

3.6 Висновки до третього розділу

В третьому розділі було виконано підбір обладнання для керування триланковим міні роботом-маніпулятором. Це обладнання включає в себе мікроконтролер Arduino Leonardo, сервоприводи MG996R та Tower Pro SG90, модуль Bluetooth HM-10, інфрачервоний датчик, потенціометр на 10 кОм, а також обладнання для з'єднання, яке включає в себе кабелі та макетну плату.

Створено модель конструктивних елементів триланкового робота-маніпулятора в програмі Autodesk Inventor. Для створення робота передбачається використання технології 3D друку.

Також було виконано розрахунок ваги, яку здатен піднімати такий маніпулятор. Максимальна вага становить 69,5 г. Крім того, була розроблена схема підключення системи керування триланковим міні-роботом маніпулятором та три варіанти схем керування роботом-маніпулятором – для ручного керування через потенціометри, для автоматичного керування через спрацювання ІЧ датчику та для керування через модуль Bluetooth за допомогою мобільного додатку.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРИЛАНКОВОГО МІНІ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

4.1 Розробка алгоритму роботи триланкового міні робота-маніпулятора

Алгоритм керування для робота-маніпулятора представляє собою послідовність правил або команд, за якими робот виконує дії [52]. За умови відсутності алгоритми робот-маніпулятор не буде виконувати жодні дії, та формально представляє собою набір приладів, які не здатні працювати.

Алгоритм керування призначений для розрахунку траєкторії руху робота-маніпулятора та подальшої координації таких рухів з метою досягнення необхідної точки в просторі рукою, тобто захватом [53].

Для керування роботом-маніпулятором через мобільний додаток з телефону за допомогою підключення до Bluetooth було розроблено алгоритм керування, який показаний на рисунку 4.1. Після відкриття відповідного додатку на мобільному телефоні та за умови увімкненого модулю Bluetooth як на телефоні, так і в роботі-маніпуляторі, необхідно виконати з'єднання цих двох приладів. Система буде готова для прийому та передачі сигналів лише після встановлення з'єднання.

Робот-маніпулятор передбачений на різні варіанти використання. Один із них – через мобільний додаток за допомогою з'єднання, встановленого через Bluetooth, другий – вручну за допомогою потенціометрів. Алгоритм ручного керування триланковим міні роботом-маніпулятором через потенціометри наведений на рисунку 4.2.

Коли відбувається увімкнення системи, виконується підключення сервоприводу до ШІМ виходу з метою отримання сигналів від потенціометрів. Потенціометри, в свою чергу, підключені до аналогового порту мікроконтролера Arduino Leonardo.

Коли оператор робота-маніпулятора виконує обертання ручки потенціометра під необхідним кутом, система виконує порівняння кута із

заданим діапазоном. Після цього ШІМ порт надає команду на двигун робота-маніпулятора виконати переміщення на задане положення.

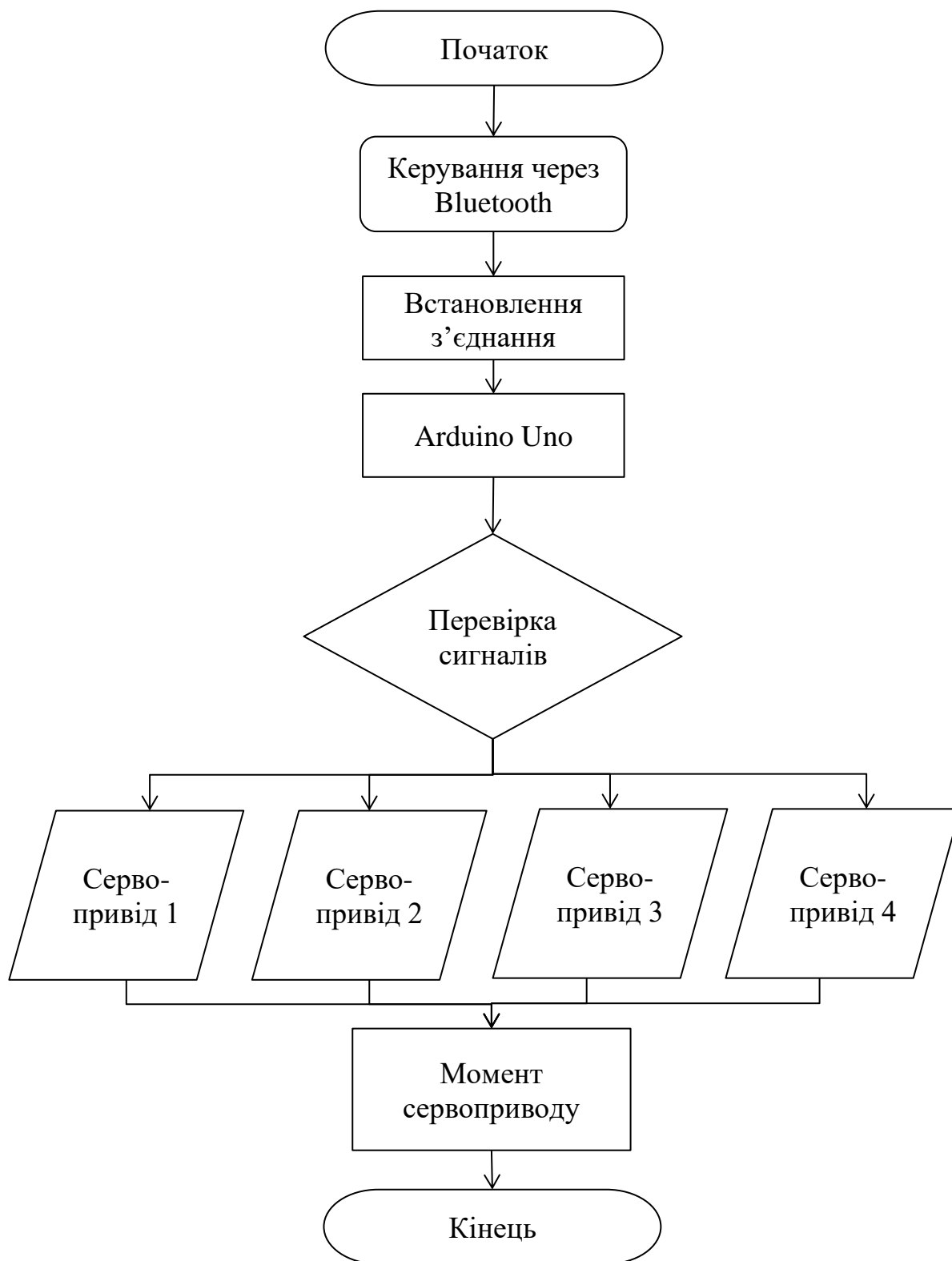


Рисунок 4.1 – Блок-схема керування роботом-маніпулятором через Bluetooth модуль



Рисунок 4.2 – Алгоритм керування роботом-маніпулятором через потенціометри

4.2 Розробка програмного забезпечення для триланкового міні робота-маніпулятора

Для розробки програмного коду для мікроконтролера Arduino використовувалось середовище розробки Arduino IDE, яке є безкоштовним для використання. Це середовище включає в себе відлгоджувач, програматор, редактор коду та компілятор [54]. Тобто, за допомогою Arduino IDE можна виконати:

- написання коду програми керування;

- завантаження скетчу;
- відслідковування послідовного порту;
- перевірка коду, тощо.

Arduino IDE поширюється безкоштовно і його можна завантажити за посиланням [55]. Інсталятор наявний для ряду операційних систем, до яких відносяться macOS, Linux та Windows.

Середовище розробки Arduino IDE вміщає в себе вбудований текстовий редактор для коду програми, вікна введення тексту, області повідомлень, панелі інструментів (рис. 4.3).

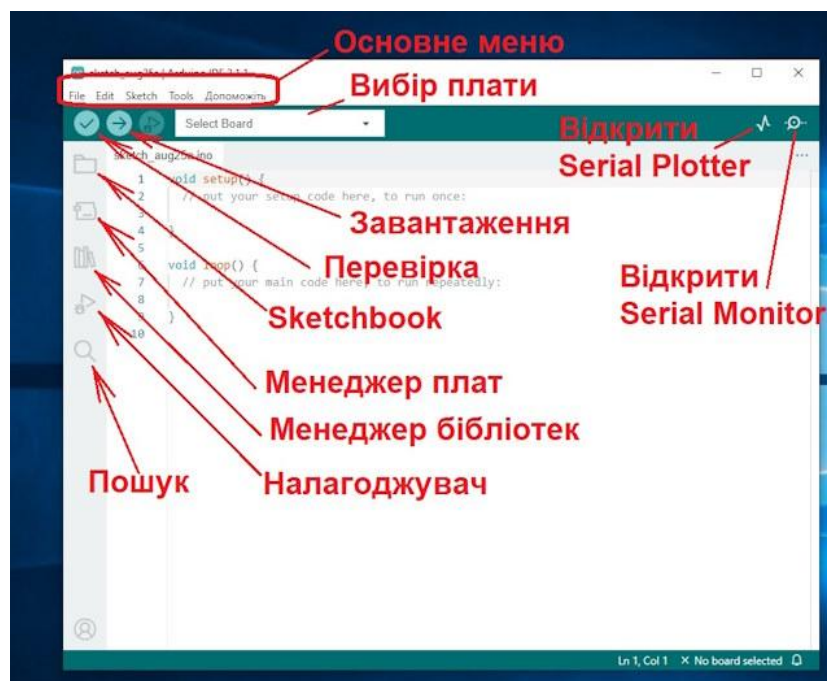


Рисунок 4.3 – Інтерфейс та складові Arduino IDE

Скетчем називається програма, яка написана в цьому програмному середовищі. Написати скетч можна в текстовому редакторі, в якому наявний ряд інструментів для вставки, вирізки, заміни або пошуку тексту. Якщо необхідно виконати експорт і збереження проєкту, то в області повідомлень з'являються пояснення або вказівки на помилки, які виникли [56, 57].

В додатку А наведений програмний код ручного керування триланковим міні роботом-маніпулятором за допомогою потенціометрів, в додатку Б –

програмний код керування захватом за допомогою ІЧ-датчику, а у додатку В – програмний код роботи робота-маніпулятора в автоматичному режимі, у додатку Г – програмний код керування роботом-маніпулятором через мобільний додаток зі смартфона, який з’єднується з роботом через модуль Bluetooth.

При керуванні триланковим міні роботом-маніпулятором один із варіантів його керування – це за допомогою з’єднання смартфона із роботом-маніпулятором через Bluetooth модуль. Для такого керування з телефону необхідно розробити програмний додаток керування.

Для розробки цього мобільного додатку було використано MIT App Inventor [58]. MIT App Inventor спрощує процес програмування додатків, оскільки в нього наявний інтуїтивно зрозуміле візуальне середовище програмування. В першу чергу, цей продукт передбачений для створення додатків для телефонів та планшетів, які базуються на операційних системах AndroidOS або iOS [59]. Інструмент програмування базується на використанні блоків (рис. 4.4).

По своїй суті це програмне середовище відноситься до RAD-систем. Розробка додатків виконується в онлайн режимі та базується на використанні візуальної мови програмування, яка схожа на Scratch [60]. Компілятор призначений для транслювання візуальної мови у вигляді блоків з MIT App Inventor у байт-код, який базується на фреймворку GNU.

Для створення додатків через MIT App Inventor необхідно мати доступ до аккаунта Google. Унікальністю цієї програми є можливість виконання тестування роботи додатку на мобільному телефоні в режимі реального часу без необхідності проведення попередньої установки на мобільний пристрій або компіляції додатку [61]. По своїй структурі середовище представляє собою хмарне середовище візуальної розробки, яке показано на рисунку 4.5.

При створенні додатку для мобільного пристрою цей процес можна поділити на два етапи. Перший передбачає проектування інтерфейсу користувача, а другий власне програмування елементів програми. Для реалізації цих етапів в MIT App Inventor наявні два різні віка – дизайнер та блоки відповідно [62].

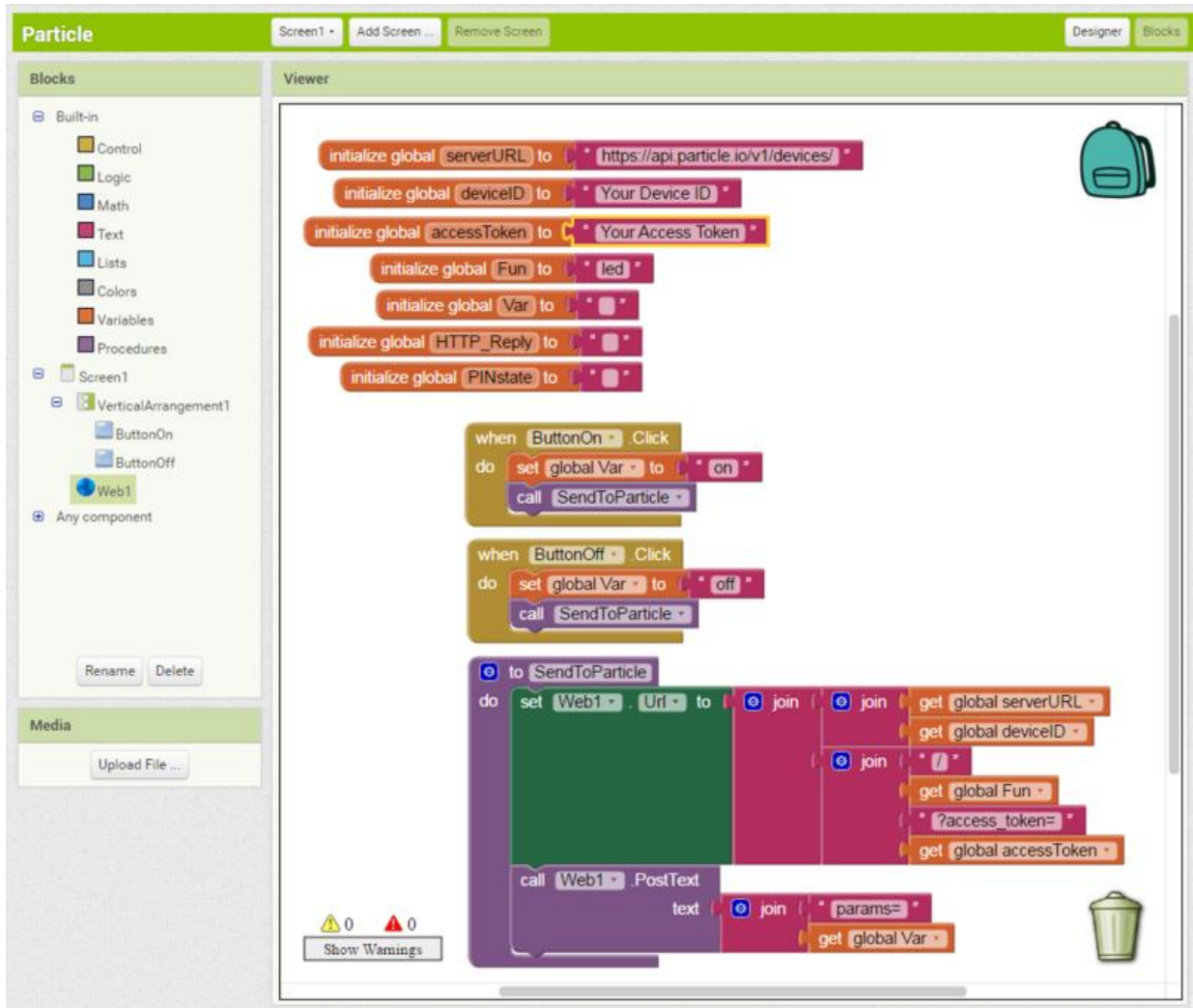


Рисунок 4.4 – Інтерфейс MIT App Inventor

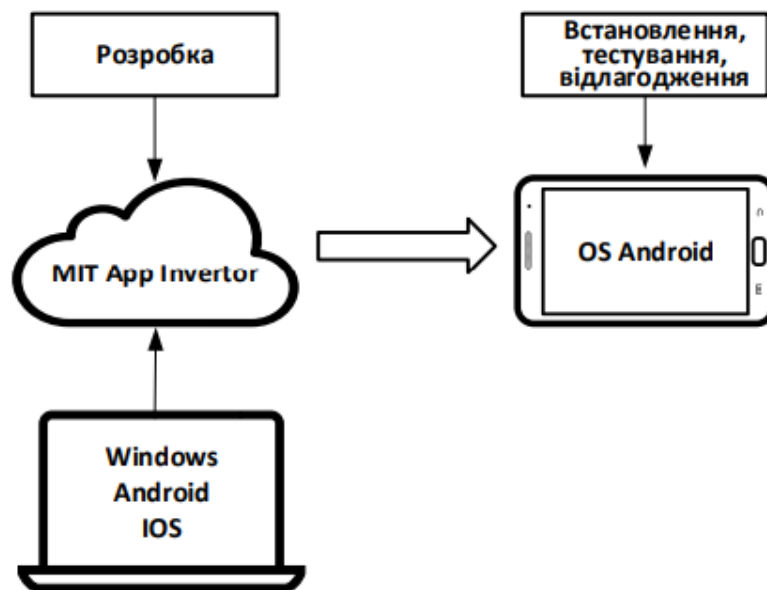


Рисунок 4.5 – Хмарне середовище MIT App Inventor

На початку було створено окремий додаток (рис. 4.6). Після цього було розроблено інтерфейс мобільного додатку для керування триланковим міні роботом-маніпулятором. При розробці інтерфейсу були створені клієнт Bluetooth, кнопки із відповідними написами, тощо.

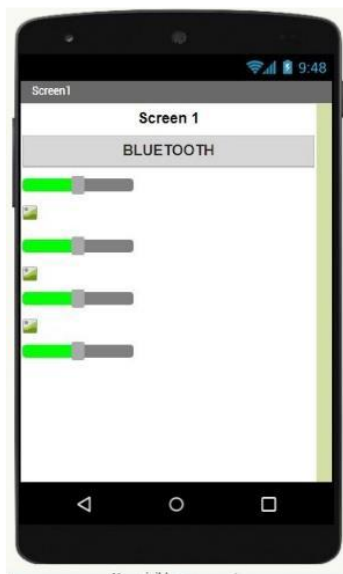


Рисунок 4.6 – Створення додатку в MIT App Inventor

Після створення інтерфейсу мобільного додатку керування роботом-маніпулятором було створено блоки програми (рис. 4.7), які відповідають алгоритму, описаному в розділі 4.1. Блоки керування роботом-маніпулятором наведені на рисунках 4.8 – 4.10.

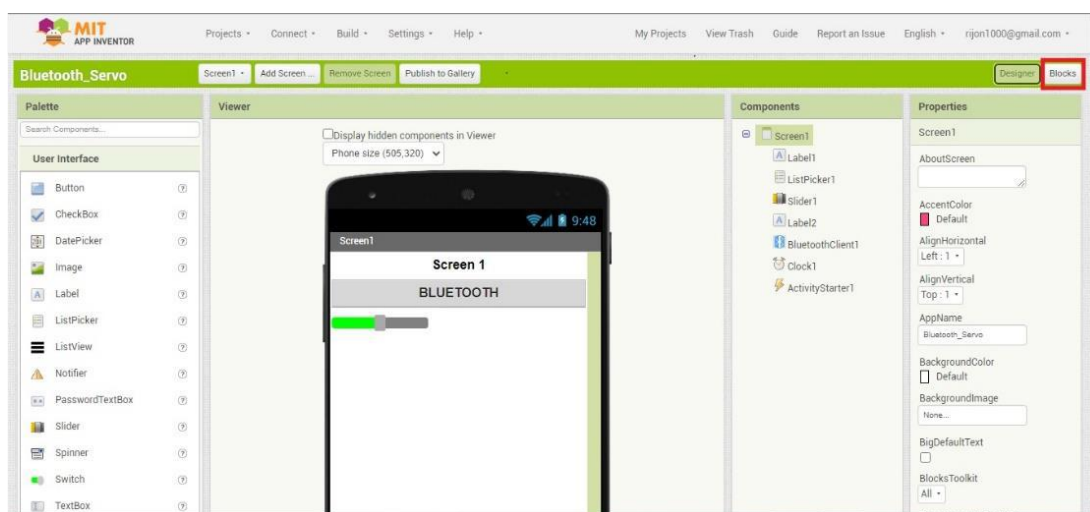


Рисунок 4.7 – Створення мобільного додатку в MIT App Inventor

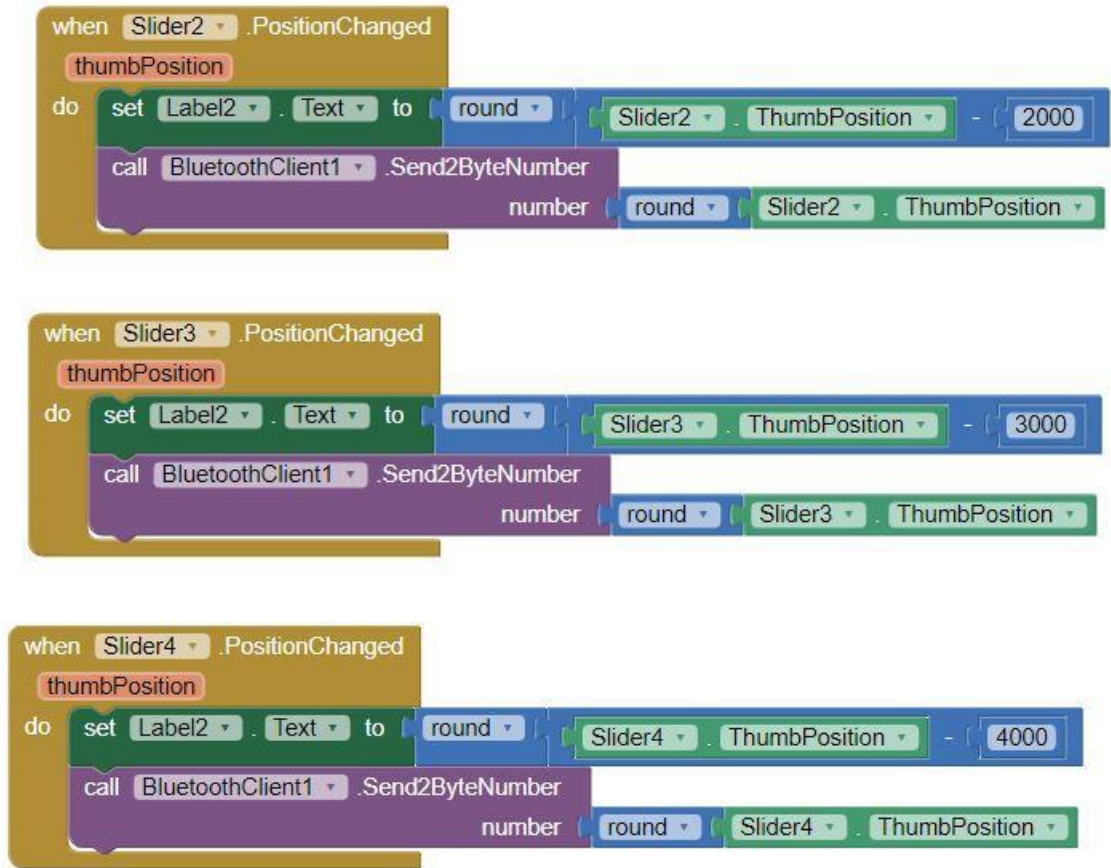


Рисунок 4.8 – Блоки керування положенням робота-маніпулятора

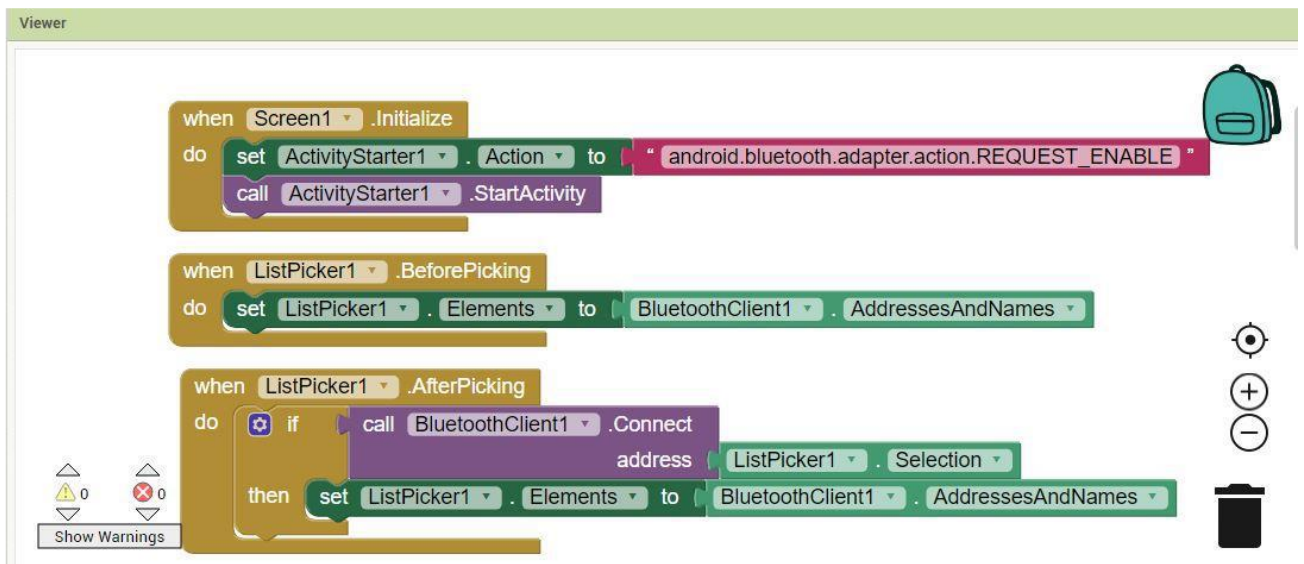


Рисунок 4.9 – Блоки MIT App Inventor для виконання підключення до робота-маніпулятора через модуль Bluetooth

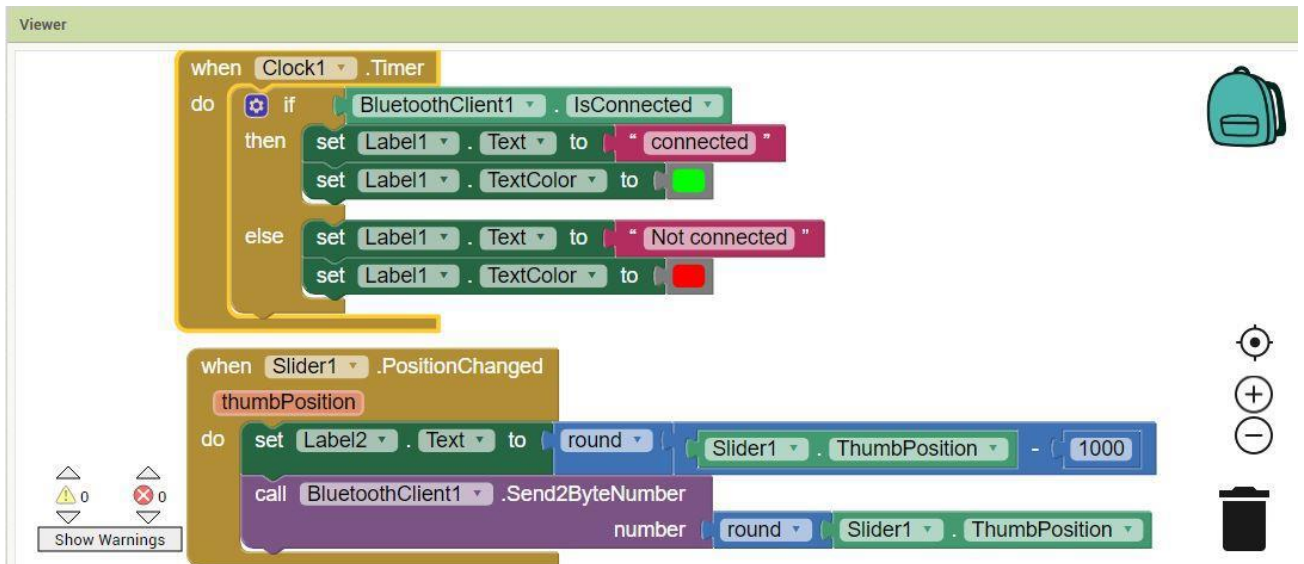


Рисунок 4.10 – Блоки виведення повідомлення про успішне підключення

4.3 Дослідження роботи триланкового міні робота-маніпулятора

Перед початком тестування роботи триланкового міні робота-маніпулятора було виконано його збірку. Конструктивні елементи триланкового міні робота-маніпулятора були надруковані на 3D принтері. Інші елементи керування, такі як потенціометри, модуль Bluetooth, з'єднання кабелями, тощо, були виконані вручну. Результат наведений на рисунку 4.11.

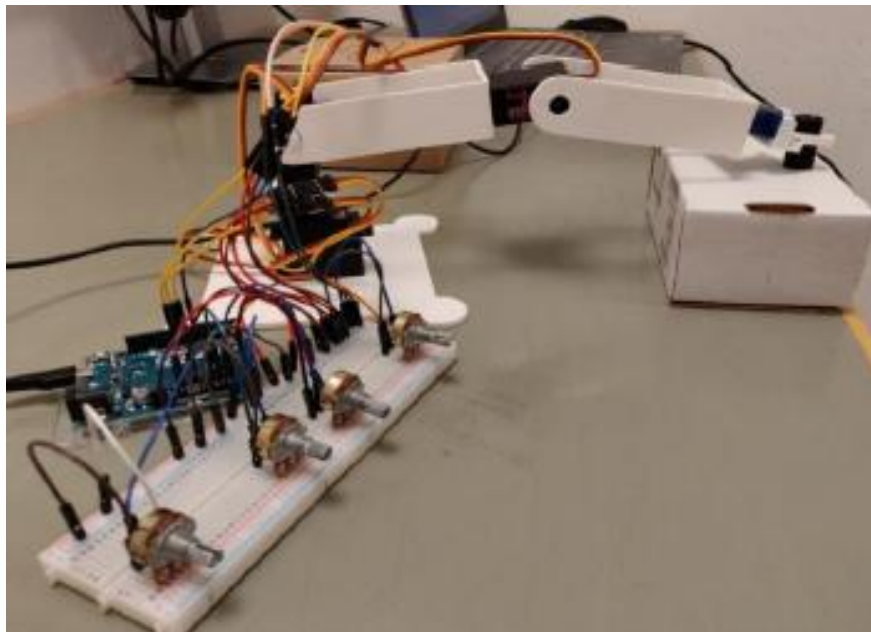


Рисунок 4.11 – Модель триланкового міні робота-маніпулятора

Для проведення дослідження режимів роботи триланкового міні робота-маніпулятора була обрана задача підйому об'єкту та його переміщення з однієї точки в другу. Окрім задачі підйому та переміщення також роботу необхідно було встановити першочергове положення об'єкта.

Триланковий міні робот-маніпулятор передбачений на три режими роботи, які будуть досліджуватись окремо один від одного, а саме:

- ручне керування за допомогою потенціометрів;
- керування через мобільний додаток завдяки зв'язку по Bluetooth;
- робота через ІЧ датчик.

При дослідженні ручного режиму керування триланковим міні роботом-маніпулятором на першому етапі всі початкові положення та кути сервоприводу мають нульове значення (рис. 4.12). Це значення було взято із значення аналогового виходу мікроконтролера.

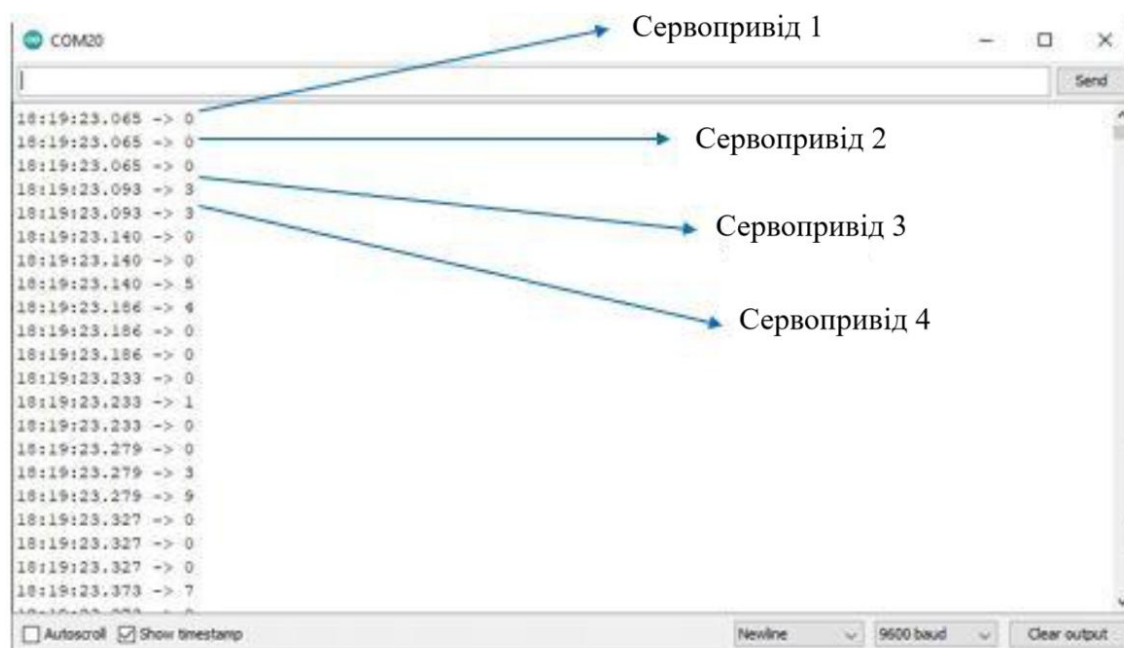


Рисунок 4.12 – Початкові значення сервоприводів робота-маніпулятора

Після цього було виконано невеличкі рухи роботом-маніпулятором за допомогою потенціометрів. В результаті було отримано дані, зображені на

рисунку 4.13. З рисунку 4.13 видно, що відбулась зміна куту сервоприводу при обертанні двигуна.

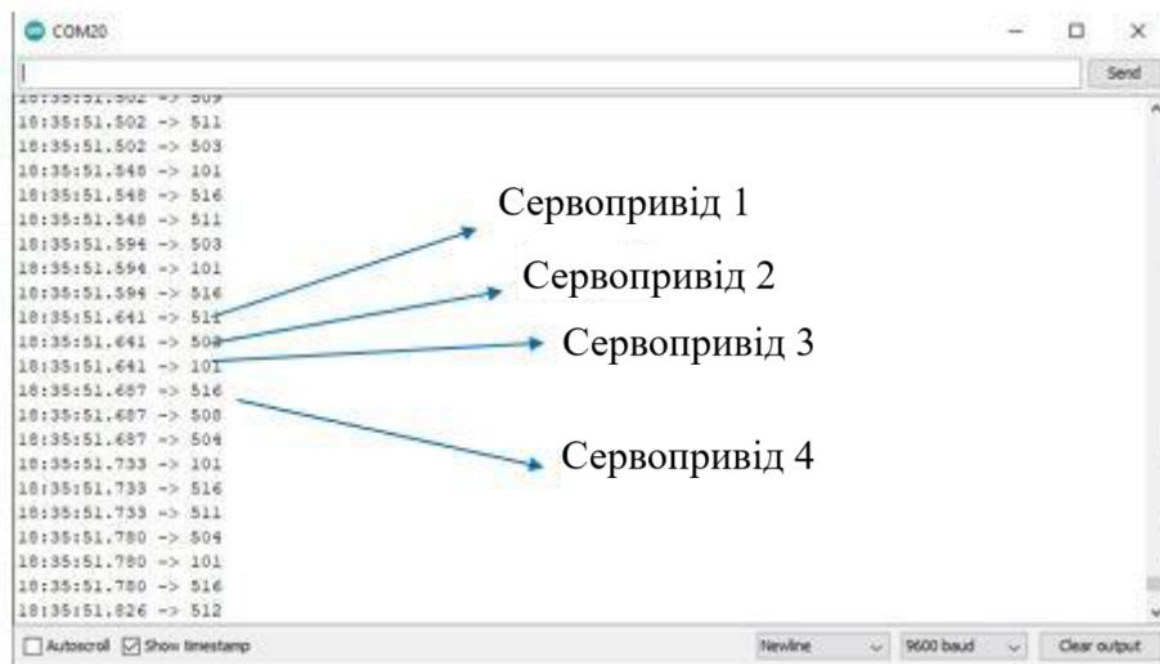


Рисунок 4.13 – Зміна значень кута повороту сервоприводу

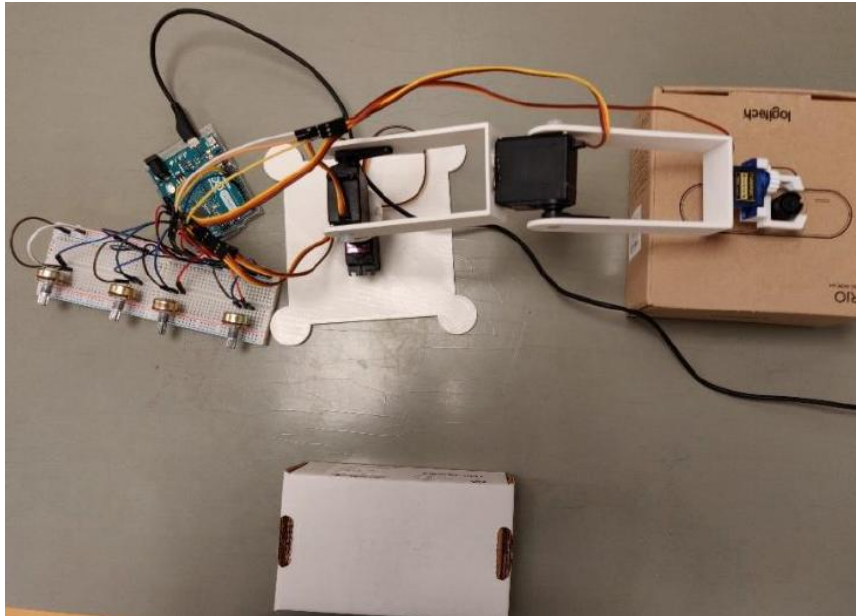
При виконанні роботом-маніпулятором процесу підйому об'єкта, можна через Arduino IDE побачити значення аналогового виходу. За цим значенням можна визначити кут повороту сервоприводу. Максимальне аналогове значення для потенціометра становить 1023, а максимальний кут повороту сервоприводу становить 180 градусів. Тоді, кут сервоприводу становить:

$$\theta = \frac{180^\circ}{1023} = 89,9^\circ \approx 90^\circ. \quad (4.1)$$

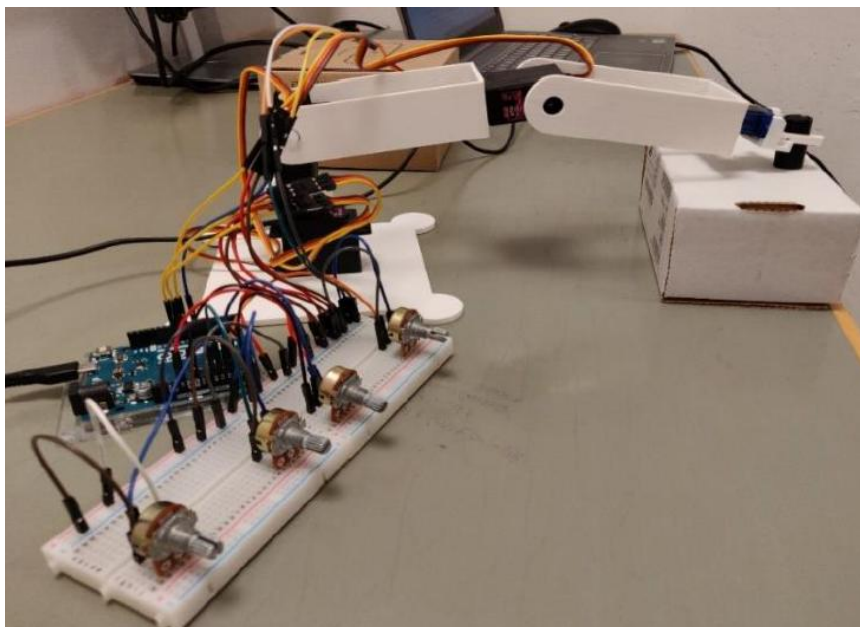
В результаті триланковий міні робот-маніпулятор виконав підйом об'єкта та перемістив його в іншу точку, як це показано на рисунку 4.14. Таким чином, можна зробити висновок про коректність роботи робота-маніпулятора при ручному керуванні за допомогою потенціометрів, оскільки роботом-маніпулятором було виконано наступні задачі:

- захват об'єкта;

- підйом об'єкта;
- переміщення об'єкта;
- розташування об'єкта на поверхні.



а)



б)

Рисунок 4.14 – Дослідження керування триланковим міні роботом-маніпулятором за допомогою потенціометрів:

а – початкове положення; б – виконане переміщення об'єкту

Оскільки робот-маніпулятор має дуже малі розміри, то для визначення його точних значень його рухів, а саме кутів повороту та координату руху по траєкторії, можна скористуватись побудованим графіком, який зображений на рисунку 4.15.

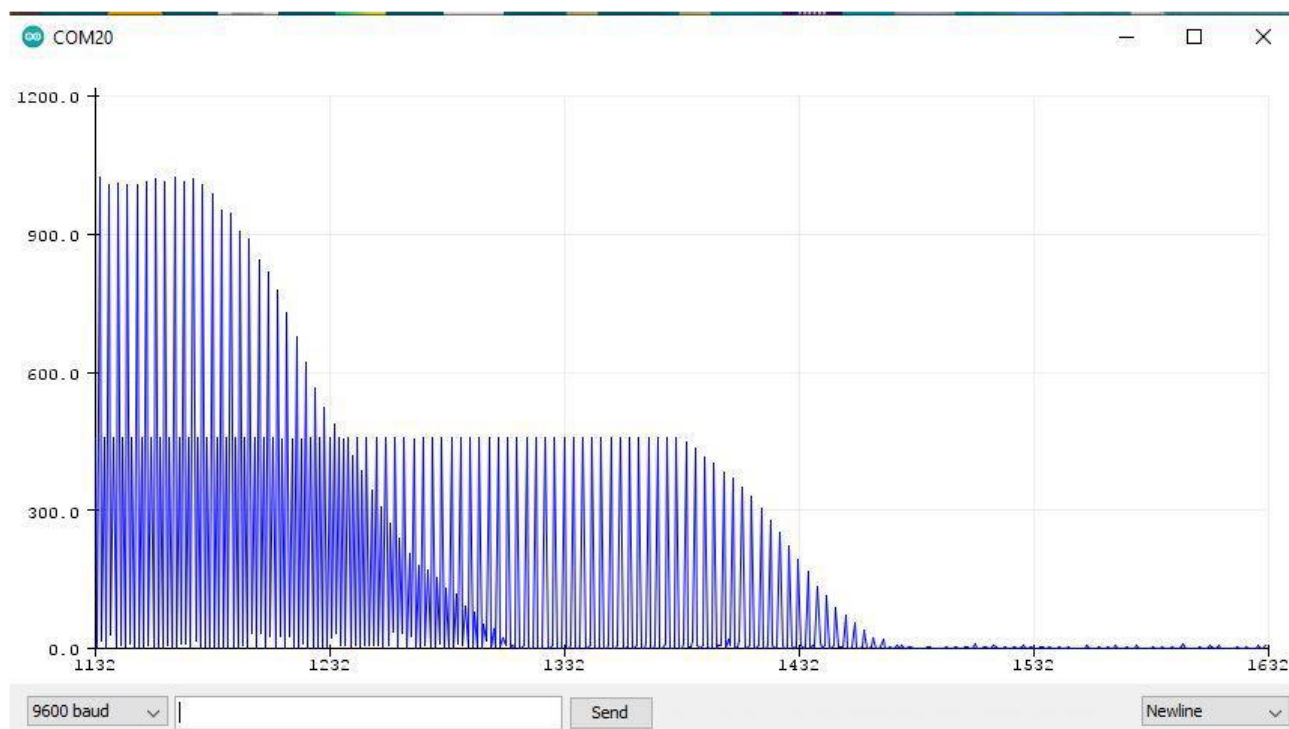


Рисунок 4.15 – Графік зміни положення об'єкту

Аналогічне дослідження було виконано для автоматичного режиму роботи триланкового міні робота-маніпулятора. В такому режимі всі сервоприводи працюють автоматично без втручання оператора, тобто потенціометри не задіяні ззовні. В цьому варіанті керування сервопривід підключений до ШІМ виводу мікроконтролера Arduino Leonardo, а живлення виконано від зовнішнього джерела.

Результати зміни положення робота-маніпулятора та підтвердження коректності його роботи показані на рисунку 4.16.

Наступний варіант керування триланковим міні роботом-маніпулятором передбачає використання інфрачервоного датчика. В цьому випадку задіяний

мікросервопривід TowerPro SG90 та інфрачервоний датчик Sharp GP2Y0A41SK0F.

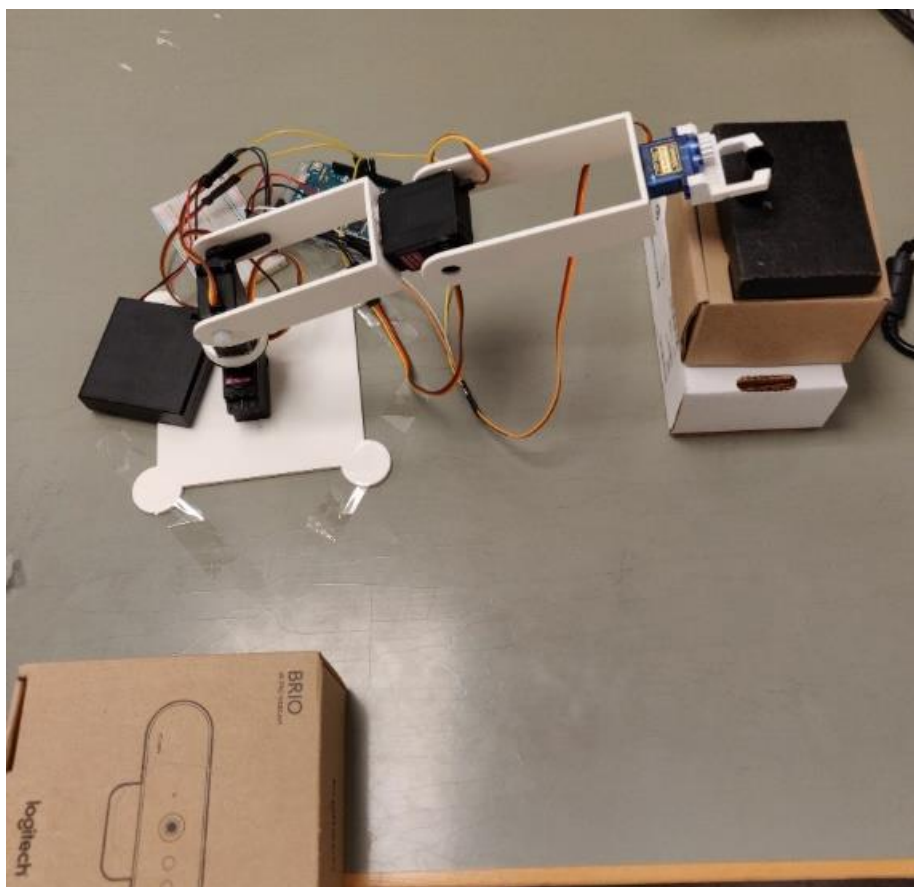


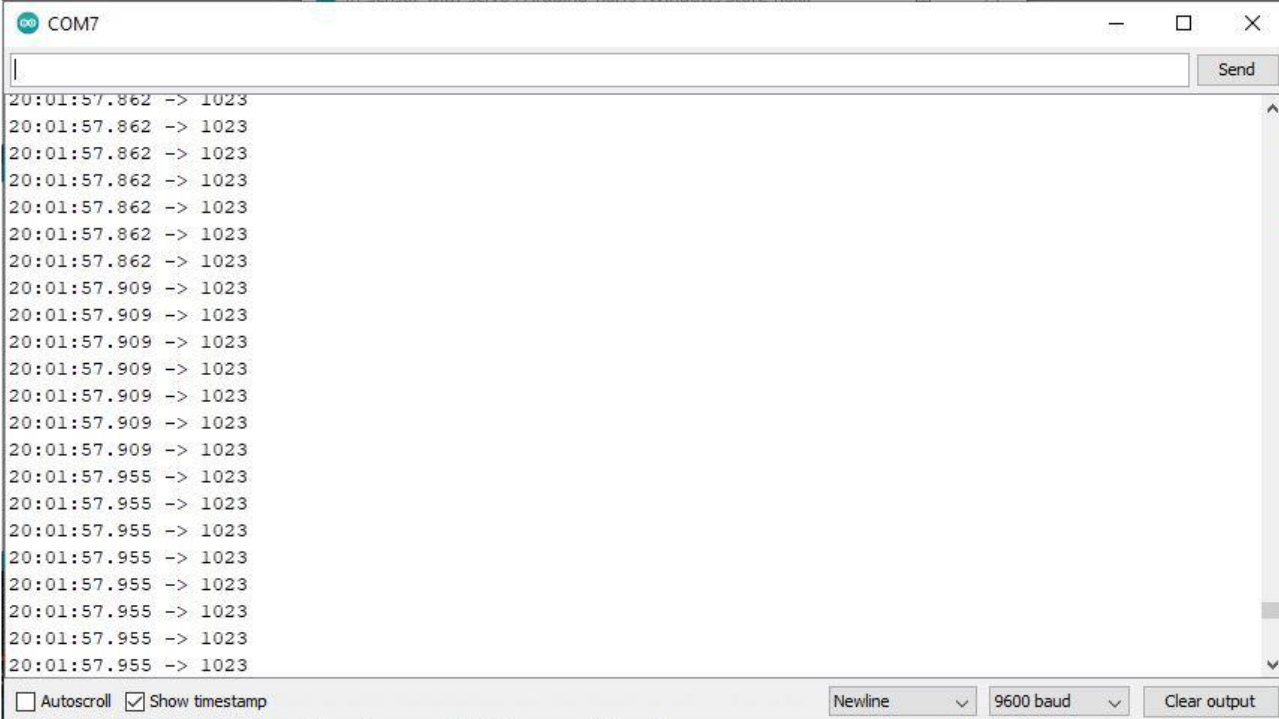
Рисунок 4.16 – Переміщення об’єкту в автоматичному режимі

Такий режим роботи передбачає, що при спрацюванні ІЧ датчику, тобто коли датчик виявляє об’єкт, захват автоматично закривається для утримання об’єкту і його подальшого переміщення. Такий варіант керування роботом-маніпулятором та результати виконання поставленої задачі щодо переміщення об’єкта наведений на рисунку 4.17.

Для перевірки коректності значень кутів повороту рухомих елементів робота-маніпулятора та координат при виконанні ним руху по траєкторії було проаналізовано проміжні дані, які наведені на рисунках 4.18 – 4.19.

При відсутності об’єкта (рис. 4.18) ІЧ датчик виконує відправку на мікроконтролер сигналу, який відображає нульове значення на послідовному моніторі.

У випадку, коли ІЧ датчик виявляє предмет в полі свого руху, значення сигналу відображається на моніторі програмного забезпечення Arduino IDE (рис. 4.19), а це значення становить 1023.



The screenshot shows a serial monitor window titled 'COM7'. The window contains a list of data points, each consisting of a timestamp followed by an arrow and the value '1023'. The timestamps are: 20:01:57.862, 20:01:57.909, and 20:01:57.955. There are 18 lines of data in total. At the bottom of the window, there are control buttons: 'Autoscroll' (unchecked), 'Show timestamp' (checked), 'Newline' (dropdown), '9600 baud' (dropdown), and 'Clear output'.

Рисунок 4.19 – Значення ІЧ датчику при наявності об’єкта

Останній варіант керування – це за допомогою розробленого додатку з мобільного пристрою через з’єднання по Bluetooth. В цьому варіанті всі сервоприводи працюють в автоматичному режимі. Керування системою виконується через мобільний додаток, живлення передбачено від зовнішнього джерела.

4.4 Висновки до четвертого розділу

В четвертому розділі було розроблено алгоритми керування роботом-маніпулятором при різних варіантах керування – для ручного керування за допомогою потенціометрів, для керування через мобільний додаток шляхом з’єднання по модулю Bluetooth та керування за допомогою ІЧ датчику.

Також було розроблено мобільний додаток керування роботом-маніпулятором, програмний код якого наведений в додатках. Після цього було виконано дослідження роботи робота-маніпулятора, яке показало здатність виконувати тестового завдання щодо переміщення об'єкту з однієї точки в іншу.

ВИСНОВКИ

В першому розділі було наведено класифікацію роботів-маніпуляторів за такими ознаками, як: за вантажопідйомністю, за видом технологічних операцій, за спеціалізацією, за видом системи координат, за числом рухомості, тощо. Також наведено види роботів-маніпуляторів, до яких відносяться декартовий, полярний, колаборативний, дельта робот, робот-маніпулятор SCARA, паралельний робот, циліндричний.

Окрім того було виконано розподіл дослідження та моделювання процесу роботи триланкового міні робота-маніпулятора на етапі та постановка задач кваліфікаційної роботи магістра.

В другому розділі наведено розроблену математичну модель для кінетичних та динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора. Визначено DH параметри робота-маніпулятора та визначник матриці Якобіан.

Після проведення математичного моделювання динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора встановлено, що йому характерний слабкий динамічний вплив зв'язків шарніра із інерцією систем привода. Завдяки незначному впливу кожен із систем привода можна розглядати окремо, тобто вважати, що вона виконує рух із постійним навантаженням.

Також у розділі було проведено розрахунок параметрів на основі розробленої математичної моделі для триланкового міні робота-маніпулятора.

В третьому розділі було виконано підбір обладнання для керування триланковим міні роботом-маніпулятором. Це обладнання включає в себе мікроконтролер Arduino Leonardo, сервоприводи MG996R та Tower Pro SG90, модуль Bluetooth HM-10, інфрачервоний датчик, потенціометр на 10 кОм, а також обладнання для з'єднання, яке включає в себе кабелі та макетну плату.

Створено модель конструктивних елементів триланкового робота-маніпулятора в програмі Autodesk Inventor. Для створення робота передбачається використання технології 3D друку.

Також було виконано розрахунок ваги, яку здатен піднімати такий маніпулятор. Максимальна вага становить 69,5 г. Крім того, була розроблена схема підключення системи керування триланковим міні-роботом маніпулятором та три варіанти схем керування роботом-маніпулятором – для ручного керування через потенціометри, для автоматичного керування через спрацювання ІЧ датчику та для керування через модуль Bluetooth за допомогою мобільного додатку.

В четвертому розділі було розроблено алгоритми керування роботом-маніпулятором при різних варіантах керування – для ручного керування за допомогою потенціометрів, для керування через мобільний додаток шляхом з'єднання по модулю Bluetooth та керування за допомогою ІЧ датчику.

Також було розроблено мобільний додаток керування роботом-маніпулятором, програмний код якого наведений в додатках. Після цього було виконано дослідження роботи робота-маніпулятора, яке показало здатність виконувати тестового завдання щодо переміщення об'єкту з однієї точки в іншу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Поліщук Л.К. Верстатні комплекси. Проектування роботів та маніпуляторів. Частина 1: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2018. 132 с.
2. Ang, M.H. Encyclopedia of Robotics / M.H. Ang, O. Khatib, B. Siciliano. – Living reference work. 2020. 623 p.
3. Промислові роботи. Класифікація промислових роботів. URL: https://kemppi.in.ua/articles/promochlenie_roboti.htm (дата звернення: 05.09.2025)
4. Основи автоматики та робототехніки: навчальний посібник / А.М. Гуржій та ін. Дніпро: «Гарант СВ», 2021. 243 с.
5. Ковальов Ю.А., Кошель С.О., Манойленко О.П. Проектування промислових роботів та маніпуляторів: навчальний посібник. Центр навчальної літератури. 2019. 256 с.
6. Лісовець С.М., Барилко С.В. Робототехніка. Практикум. Частина 1: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерноінтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (151 Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 78 с.
7. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник. К., 2012. 357 с.
8. Що таке робот-маніпулятор? URL: <https://www.evsint.com/uk/what-is-a-robotic-manipulator-a-guide/> (дата звернення – 10.09.2025)
9. Морзе Н.В., Варченко-Троценко Л.О., Гладун М.А. Основи робототехніки: навчальний посібник. Кам'янець-Подільський : ПП Буйницький О.А., 2016. 184 с.
10. Цвіркун Л.І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. 3-тє вид., переробл. і доповн. Дніпро: НГУ, 2017. 224 с.

11. Михайлов Є.П., Лінгур В.М. Маніпулятори та промислові роботи: навчальний посібник для студентів бакалаврів; Одес. нац. політехн. ун-т. Одеса, 2019. 233 с.
12. Franka Emika Panda Arm. URL: <https://robodk.com/robot/ru/Franka/Emika-Panda> (дата звернення: 12.09.2025)
13. Колаборативний робот Franka Emika Panda. URL: https://hydrolider.com.ua/ua/p595553818-kollaborativnyj-robot-franka.html?srsId=AfmBOoqAsVdUBwSS87m1QK2_bnrmsZ5hkDx4uH3-OzjC4cDM14ycUdDe (дата звернення – 12.09.2025)
14. Донченко М.В. Технології комп'ютерного проектування: навчальний посібник. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 364 с.
15. Waguespack C. Mastering Autodesk Inventor 2014 and Autodesk Inventor LT 2014. John Wiley & Sons, Inc, Canada. 1034 с.
16. Математичне моделювання процесів і систем: навчальний посібник / Жученко А.І. та ін. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 351 с.
17. Математичне моделювання систем і процесів: навчальний посібник / Павленко П. М. та ін. К.: НАУ, 2017. 392 с.
18. Матвійчук В.А., Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А. Математичне моделювання новітніх технологічних систем: монографія. Вінниця, ВНТУ, 2021. 192 с.
19. Mohammed A.A., Sunar M. Kinematics modeling of a 4-DOF robotic arm. International Conference on Control, Automation and Robotics, 2015, pp. 87-91
20. Математичне моделювання технічних і технологічних процесів на ПЕОМ / Шебаніна О.В. та ін. Миколаїв, Миколаївський національний аграрний університет, 2020. 105 с.
21. Палажченко Є.В., Шендрик В.В. Сховище даних цифрових двійників для кінематики промислових роботів. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2024, (4), 111-118.
22. Кірчук Р.В., Дударєв І.М. Математичне моделювання машин: навчальний посібник. Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2014. 134 с.

23. Fredmer A. Application and Control of Robotic Manipulator through PLC. 2017. 225 p.
24. Фіхтенгольц Г.М. Курс диференціального та інтегрального числення. 2025. 2391 с.
25. Математичний аналіз в прикладах і задачах / Ляшко І.І. та ін. 2025. 1200 с.
26. Жалдак М.І., Михалкін Г.О., Деканов С.Я. Математичний аналіз. Функції багатьох змінних: навчальний посібник. К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. 430 с.
27. Elatta A.Y., Gen L.P., Zhi F.L. An Overview of Robot Calibration. *Information Technology Journal* 3 (1), Asian Network for Scientific Information. 2004. p. 74-78.
28. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів. Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. 232 с.
29. Міщук Д., Горбатюк Є., Волянюк В. Визначення геометричних параметрів маніпулятора за характеристиками робочого середовища. *Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини*. 94, 2019. С. 25-34.
30. Аналіз динаміки системи керування робота-маніпулятора / Білюк І.С. та ін. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки»*, №21, 2022. с. 105-112
31. Ропай В.А., Науменко О.Г., Киба В.Я. Застосування рівнянь Лагранжа II рода до рішення задач динаміки механічних систем. Методичні рекомендації до розділу курсу «Спецрозділи математики, теоретичної кінематики та аналітичної динаміки» для студентів всіх форм навчання. Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2013. 56 с.
32. Карачун В.В., Мельник В.М. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів над курсовою роботою з дисципліни “Аналітична механіка” (розділ “Рівняння Лагранжа II роду”) спеціальності “133-Галузеве машинобудування” спеціалізації “Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв”, електронне видання. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 19 с.

33. Карбованець М.І., Лазур В.Ю., Нодь Є.А. Теоретична механіка. Частина І. Метод Лагранжа: навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. 82 с.
34. Дубовий В.М., Юхимчук М.С. Імітаціне моделювання в системі SCILAB/XCOS: навчальний посібник. Вінниця, ВНТУ. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/10dubovyj_imitacijne_modelyuvannya_v_systemi_Scilab-Xcos/txt/d&yu_rozdil4.html (дата звернення: 01.10.2025)
35. Фізика. «Механіка». Компенсаційний курс. КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://physics.zffft.kpi.ua/mod/book/view.php?id=355&chapterid=139> (дата звернення – 04.10.2025)
36. Fu, K.S., Gonzalez, R.C. and Lee C.S.G. (1987). Robotics: Control Sensing, Vision and intelligence. St. Louis: McGraw-Hill
37. Autodesk Inventor: 3D modeling software for designers and engineers. URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview> (дата звернення: 15.10.2025)
38. F123 Series – FWM 3D Printer. URL: <https://www.stratasys.com/en/landing-pages/f123-series-printers/> (дата звернення: 15.10.2025)
39. Манжілевський О.Д., Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2021. 106 с.
40. Новацький А.О. Мікропроцесорні та мікроконтролерні системи: Частина 2. Проектування мікропроцесорних систем: Лабораторний практикум: навч. посіб. для студ. освітньої програми «Інтегровані інформаційні системи» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 268 с.
41. Мікропроцесорна техніка: навчальний посібник / Цирульник С.М. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2017. 124 с.

42. Arduino Leonardo. URL: https://kosmodrom.ua/ru/otladochnaya-plata/arduino-leonardo.html?gad_source=1&gad_campaignid=21279505378&gbraid=0AAAAA9phgKTGBz8BUSWTufpWfeJl7EUsq&gclid=CjwKCAjwx-zHBhBhEiwA7Kjq6yTepPRDpivfbJZXftUj-vDfO54Knux9tYEGIrNwkTm_wnRaGORLRBoCLl0QAvD_BwE (дата звернення: 20.10.2025)

43. Arduino Leonardo A000057. URL: <https://arduino.ua/ua/prod260-arduino-leonardo-a000057?srsId=AfmBOooRTTenO74WyslJyg4igd44DLMQzHgQcJyHbOz1s6JYPaurhnJ> (дата звернення: 20.10.2025)

44. Як побудований сервопривід. Принцип роботи. URL: <https://modelistam.com.ua/ua/kakustroen-servoprivod-printsip-raboty-a-164/> (дата звернення: 22.10.2025)

45. Сервопривід MG996R Servo (15299). URL: https://evo.net.ua/servoprivid-mg996r-servo-15299/?gad_source=1&gad_campaignid=17182912741&gbraid=0AAAAACph_DEPbSDmpjCDr3MlhC_-kpJP1&gclid=CjwKCAjw6vHHBhBwEiwAq4zvA8DG46KBHyueBBecc3k3_2V92TbneVPLNW5uTtP2ZeHzChK83w21ThoCiLcQAvD_BwE (дата звернення: 22.10.2025)

46. Сервопривід мікро 9Г Tower Pro SG90 1,2 кг / 0,12 сек. URL: <https://modelistam.com.ua/ua/servoprivod-mikro-tower-pro-sg90-p-46732/> (дата звернення: 24.10.2025)

47. IR датчик відстані Sharp GP2Y0A41SK0F (4-30 см) з кабелем. URL: https://rozetka.com.ua/ua/341833672/p341833672/?gad_source=1&gad_campaignid=22980532501&gbraid=0AAAAADmLgivNoDfkGG6Ivs1vp2GYteSGC&gclid=CjwKCAjw04HIBhB8EiwA8jGNbQx_J0YS6YHEFQ7WOVUKoxA6O4aSaQysk_tG3g2runvaQ-xe3vSJohoCgzoQAvD_BwE (дата звернення: 26.10.2025)

48. Модуль Bluetooth 4.0 на CC2541 (HM-10). URL: https://arduino.ua/prod1291-modyl-bluetooth-4-0-na-cc2541-hm-10?srsltid=AfmBOopwc3ErC_bp9Aw8NVv3_JtYNjcLMcrBAO--HAqms75p_r66HWPa (дата звернення: 28.10.2025)
49. Макетна плата 400 MB-102. URL: https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=94&product_id=68&gad_source=1&gad_campaignid=20839106384&gbraid=0AAAAADk5dvoS2_6WYMrMR6PE3DR7bFiyo&gclid=Cj0KCQjw9obIBhCAARIsAGHm1mRN6gZrMZAAXodIJDgCDxcVpg0nWYVI10kDWBYI7CZRykIggqmMp4k8aAsTGEALw_wcB (дата звернення: 28.10.2025)
50. Резистор змінний B10K потенціометр WH148 15мм Ардуїно. URL: <https://arduino.com.ua/ua/p1411446299-rezistor-peremennyj-b10k.html?srsltid=AfmBOoo6aFDbeOXm35PFwVmg2yf6VIXSg1X0yh6LBcz7hhLbrpjhNFE> (дата звернення: 28.10.2025)
51. Дроти для Arduino з'єднувальні 40 шт. довжина 20 см. URL: https://arduino.com.ua/ua/p1105649530-provoda-dlya-arduino.html?srsltid=AfmBOoq38Bc0DvvtItsh-j3TUstz1J59I_tJb7sKLYJNxWIKaDByXHs5 (дата звернення: 28.10.2025)
52. Вишневий С.В., Катін П.Ю., Крилов Є.В. Інформатика. Основи програмування та алгоритми: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 221 с.
53. Троцько В.В. Теорія алгоритмів: навчально-методичний посібник. Київ: Університет економіки та права «КРОК», 2023. 126 с.
54. Arduino IDE. URL: <https://itmaster.biz.ua/electronics/arduino/arduino-ide.html> (дата звернення: 1.11.2025)
55. Bring your projects to life with Arduino software. URL: <https://www.arduino.cc/en/software/> (дата звернення: 1.11.2025)
56. Засорнов О.С., Засорнова І.О. Програмування мікроконтролерних та робототехнічних систем. Навчальний посібник. Кондор, 2023. 280 с.

57. Програмування для робототехніки: мови та інструменти. URL: <https://itproger.com/ua/news/programmirovanie-dlya-robototehniki-yaziki-i-instrumenti> (дата звернення 03.11.2025)
58. MIT App Inventor. URL: <https://appinventor.mit.edu/about-us> (дата звернення 10.11.2025)
59. Lamg K., Texel S. Become an App Inventor: The Official Guide from MIT App Inventor. 2022. 178 p.
60. Бондарчук Ж.А. Збірка творчих завдань та вправ в середовищі програмування. Scratch. Методична розробка, Луцьк. 2017, 44 с.
61. Цирульник С.М. MIT App Inventor: Створення Android-додатку лабораторного практикуму без програмування. *Open educational e-environment of modern University*, № 4 (2018). с. 91-95
62. Вивчаємо MIT App Inventor. URL: <https://sites.google.com/view/mitinvai2/> (дата звернення 12.11.2025)
63. Тищенко К.В., Ткач О.П. Програмування систем збору і аналізу даних. Суми: Сумський державний університет, 2022. 168 с.
64. Сагун А.В., Хайдуров В.В., Поліщук І.А. Розробка програмних модулів для обміну даними у промислових мережах: навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 103 с.
65. Guthlas S. Building a Mobile App: Design and Program Your Own App. 2017. 128 p.
66. Walter D., Sherman M. Learning MIT App Inventor. 2014. 240 p.
67. Kamriani F. App Inventor 2 Essentials. 2016. 246 p.
68. Ніколайчук В.М. Основи робототехніки: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2008. 76 с.
69. Robotics. / Mihelj M. та ін.: Springer. 2010. 249 p.
70. Поляков А.О., Федорченко О.В., Шматко О.В. Аналіз методів і технологій розроблення мобільних додатків для платформи Android: навчальний посібник. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2017. 286 с.

Додаток А. Програмний код керування положенням сервоприводу робота-
маніпулятора за допомогою потенціометрів

```
#include <Servo.h>
Servo servo1; // створити об'єкт сервоприводу для керування сервоприводом 1
Servo servo2; // створити об'єкт сервоприводу для керування сервоприводом 2
Servo servo3; // створити об'єкт сервоприводу для керування сервоприводом 3
Servo servo4; // створити об'єкт сервоприводу для керування сервоприводом 4
int potpin1 = A3; // аналоговий вихід, що використовується для підключення
потенціометра 1
int potpin2 = A2; // аналоговий вихід, що використовується для підключення
потенціометра 2
int potpin3 = A1; // аналоговий вихід, що використовується для підключення
потенціометра 3
int potpin4 = A0; // аналоговий вихід, що використовується для підключення
потенціометра 4
int val1; // змінна для зчитування значення з аналогового виходу A3
int val2; // змінна для зчитування значення з аналогового виходу A2
int val3; // змінна для зчитування значення з аналогового виходу A1
int val4; // змінна для зчитування значення з аналогового виходу A0

void setup ()

{
  Serial. Begin (9600);
  servo1.attach(9); // приєднує servo1 на виході 9
  servo2.attach(10); // приєднує servo2 на виході 10
  servo3.attach(8); // приєднує servo3 на виході 8
  servo4.attach(7); // приєднує servo4 на виході 7
}

void loop ()

{
  val1 = analogRead(potpin1); // зчитує значення потенціометра1 (значення від 0 до
1023)
  Serial.println(val1);
  val1 = map (val1, 0, 1023, 0, 180); // масштабуйте його для використання з
сервоприводом 1 (значення від 0 до 180)
  servo1.write(val1); // встановлює положення сервоприводу 1 відповідно до
масштабованого значення
  delay (15);
  val2 = analogRead(potpin2);
  Serial.println(val2);
```

```
val2 = map(val2, 0, 1023, 0, 180);  
servo2.write(val2);  
delay(15);  
val3 = analogRead(potpin3);  
Serial.println(val3);  
val3 = map(val3, 0, 1023, 0, 180);  
servo3.write(val3);  
delay(15);  
val4 = analogRead(potpin4);  
Serial.println(val4);  
val4 = map(val4, 0, 1023, 0, 180);  
servo4.write(val4);  
delay (15);  
  
}
```

Додаток Б. Програмний код керування захватом за допомогою ІЧ-датчику

```
#include<Servo.h> // бібліотека
Servo motor; // Назва сервоприводу

void setup ()
{
  pinMode (7, INPUT); // Контрольний вихід сервоприводу, підключений до виводу
  ШІМ 7
  pinMode (4, INPUT); // Контрольний вихід ІЧ датчику, підключений до виводу
  ШІМ 4
  Serial.begin(9600);
  motor.attach(7);
  motor.write(130);
}

void loop()

{

if (digitalRead(4) ==LOW)

{

Serial.println(1023);
motor.write(90);

}

if (digitalRead(4)==HIGH)

{

Serial.println(0);
motor.write(0);

}

}
```

```
#include <VarSpeedServo.h>

VarSpeedServo servo1; // створення об'єкту сервоприводу для керування ним
VarSpeedServo servo2;
VarSpeedServo servo3;
VarSpeedServo servo4;

void setup()

{
servo1.attach(9); // приєднує сервопривід з виходом 9 до об'єкта servo
servo1.write(0,10,true); // встановити початкове положення servo1, зачекати до
завершення
servo2.attach(10);
servo2.write(90,10,true);
servo3.attach(8);
servo3.write(45,10,true);
servo4.attach(7);
servo4.write(0,10,true);
}

void loop()
{
servo1.write(90,10,true); // Servo1 рухається на 90 градусів зі швидкістю 10
servo2.write(75,10,true);
servo3.write(0,10,true);
servo4.write(160,10,true);
servo1.write(0,10,true); // Сервопривід 1 переміщується на 0 градусів зі швидкістю
10 від положення 1 до положення 2
servo2.write(90,10,true);
servo4.write(0,10,true);
servo3.write(45,10,true);
servo2.write(0,10,true);
}
```

МОДУЛЬ

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <wiring_private.h>
#include <Servo.h>
Servo myservo1, myservo2, myservo3, myservo4; // Назва сервоприводу

int bluetoothTx = 0;
int bluetoothRx = 1;
SoftwareSerial bluetooth(bluetoothTx, bluetoothRx);
void setup()

{

myservo1.attach(9);
myservo2.attach(10);
myservo3.attach(8);
myservo4.attach(7);
Serial.begin(9600);
bluetooth.begin(9600);
}

void loop ()

{

if(bluetooth.available()>= 2 )

{

unsigned int servopos = bluetooth.read();
unsigned int servopos1 = bluetooth.read();
unsigned int realservo = (servopos1 *256) + servopos;
Serial.println(realservo);

if (realservo >= 1000 && realservo <1180)
{
int servo1 = realservo;
servo1 = map (servo1, 1000, 1180, 0, 180);
myservo1.write(servo1);
Serial.println("Servo 1 ON");
delay (10);
}
}
```

```
if (realservo >= 2000 && realservo <2180)
{
int servo2 = realservo;
servo2 = map (servo2, 2000, 2180, 0, 180);
myservo2.write(servo2);
Serial.println("Servo 2 ON");
delay (10);
}
if (realservo >= 3000 && realservo <3180)
{
int servo3 = realservo;
servo3 = map (servo3, 3000, 3180, 0, 180);
myservo3.write(servo3);
Serial.println("Servo 3 ON");
delay(10);
}

if (realservo >= 4000 && realservo <4180)
{
int servo4 = realservo;
servo4 = map (servo4, 4000, 4180, 0, 180);
myservo4.write(servo4);
Serial.println("Servo 4 ON");
delay (10);
}}

}
```

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТРИЛАНКОВОГО МІНІ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

Питлик Н.А.,
Корецька Л.О.,
Соколан Ю.С.

Хмельницький національний університет

В деяких галузях промисловості використання роботів-маніпуляторів достатньо обмежене по причині невеликих об'єктів та обмеженого простору роботи. В таких випадках неможливо використовувати роботи-маніпулятори типових габаритних розмірів, а роботизація таких технологічних процесів потребує спеціалізованих міні роботів. До таких галузей відносяться фармацевтика, медицина, проведення лабораторних досліджень [1].

Для виконання таких специфічних задач та для роботи із об'єктами, вага яких становить менше 70 г, було розроблено модель триланкового міні робота-маніпулятора (рис. 1). CAD-модель була створена в Autodesk Inventor [2], виготовлення такого робота передбачено за технологією 3D-друку [3]. Експлуатація триланкового міні робота-маніпулятора потребує наступного обладнання: мікроконтролера Arduino, одного мікросервоприводу Tower Pro SG90 для керування захватом та трьох сервоприводів моделі MG996R, Bluetooth модулю PM-10 для можливості керування через мобільний додаток, ІЧ датчику Sharp GP2Y0A41SK0F для виявлення об'єктів в полі роботи, а також ряду додаткового обладнання, до яких можна віднести макетну плату, потенціометри WH148 B10K та кабелі з'єднання.



Рис. 1. Модель триланкового міні робота-маніпулятора

Для керування роботом-маніпулятором через мобільний додаток з телефону за допомогою підключення до Bluetooth було розроблено алгоритм керування, який показаний на рисунку 2. Для розробки мобільного додатку використовувався MIT App Inventor [4], в якому було створено інтерфейс мобільного додатку та блоки керування положенням триланкового міні робота-маніпулятора (рис. 3).

Після того, як було виконано моделювання роботи триланкового міні робота-маніпулятора та розроблено мобільний додаток для керування ним, також було зібрано прототип (рис. 4, а) такого робота та перевірено його роботу при виконанні задачі розпізнавання об'єкту за допомогою ІЧ датчику, виконання захвату об'єкту та переміщення об'єкту з однієї точки на поверхні в іншу.

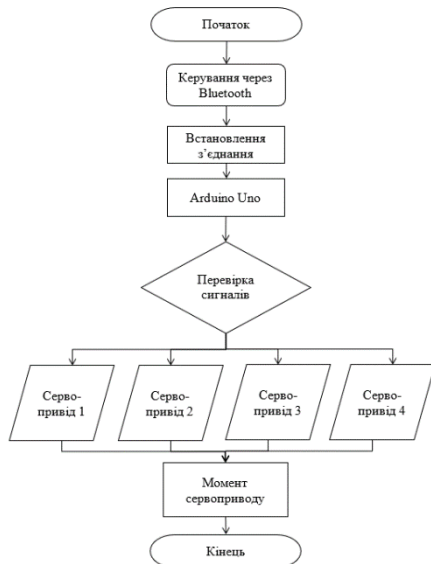


Рис. 2. Блок-схема керування роботом-маніпулятором через підключення по Bluetooth

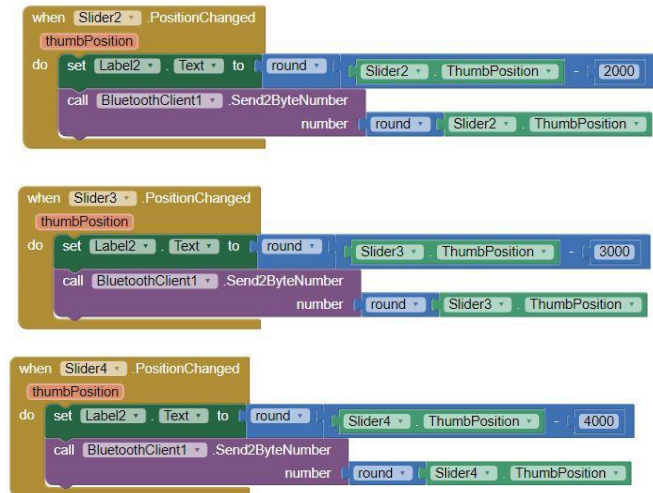
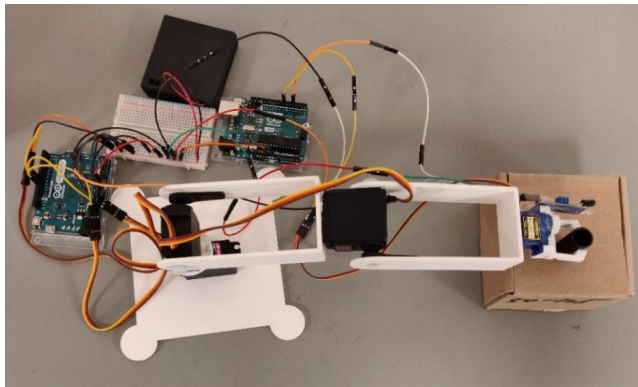
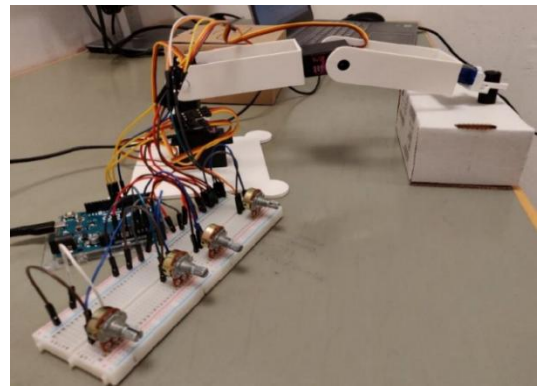


Рис. 3. Програмний код мобільного додатку для керування положенням робота-маніпулятора



а)



б)

Рис. 4. Прототип триланкового міні робота-маніпулятора:
а – з керуванням через мобільний додаток; б – з ручним керуванням

Крім того, в триланковому міні роботі-маніпуляторі передбачено можливість керування його роботою у ручному режимі за допомогою потенціометрів (рис. 4 б).

Такі роботи-маніпулятори можуть використовуватись для виконання робіт із дрібними об'єктами, а також в агресивному та небезпечному для людини середовищі. Крім того використання роботів-маніпуляторів невеликих розмірів доцільно використовувати при підготовці майбутніх фахівців в сфері робототехніки, оскільки вони зберігають всі типові функції, але не займають багато місця в навчальних аудиторіях.

Перелік посилань

1. Основи автоматики та робототехніки: навчальний посібник / А.М. Гуржій та ін. Дніпро: «Гарант СВ», 2021. 243 с.
2. Донченко М.В. Технології комп'ютерного проектування: навчальний посібник. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 364 с.
3. Манжілевський О.Д., Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2021. 106 с.
4. Цирульник С.М. MIT App Inventor: Створення Android-додатку лабораторного практикуму без програмування. *Open educational e-environment of modern University*, № 4 (2018). с. 91-95

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Питлик Назарій Аркадійович

Тема: Модель триланкового міні робота-маніпулятора

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

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень ____ Кількість сторінок записки 85

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: розроблено модель триланкового міні робота-маніпулятора, виконано математичне моделювання його параметрів, виконано підбір обладнання, розроблено алгоритми керування та мобільний додаток для керування з телефону

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі наведено класифікацію та виконано огляд і аналіз існуючих конструкцій роботів-маніпуляторів. В другому розділі виконано математичне моделювання кінематичних та динамічних параметрів триланкового міні робота-маніпулятора. В третьому розділі побудована САД-модель триланкового міні робота-маніпулятора та виконано підбір обладнання для нього. В четвертому розділі виконано моделювання роботи робота-маніпулятора, розроблено алгоритми керування в різних режимах, розроблено мобільний додаток для керування роботом з телефону та перевірено роботу зібраного триланкового міні робота-маніпулятора.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: в роботі не виконана перевірка ланок триланкового міні робота-маніпулятора на міцність та розрахунку ймовірності відмови у випадку перенавантаження міні робота-маніпулятора

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

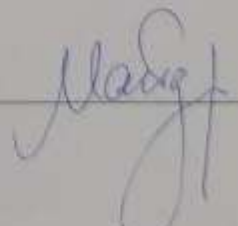
9. Оцінка дипломної роботи: добре (С-75)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Майдан Павло Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри МАЕЕС

Хмельницького національного університету

“ 15 ” 12, 2025 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР
канд. техн. наук, доценту Корецька Л.О.

Питлик Назарій Аркадійович

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-24-1

ЗАЯВА

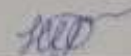
З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності,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

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

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

05.12.2025

дата



підпис

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Назарій ПИТЛИК

Співавтор:

Назва: Питлик (на антиплагіат)

Експерт: Людмила КОРЕЦЬКА.

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 2.7%

Коефіцієнт подібності 2: 0%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 53

Інтервали: 0

Білі знаки: 4

Дата створення звіту: 2025-12-15 08:30:17.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-12-15

Доцент Микола Федула

Дата

експерт

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

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

Назва: Модель триланкового міні робота-маніпулятора

Автор: Питлик Назарій Аркадійович

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

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

Науковий керівник: Корецька Людмила Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

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

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

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 2,7% і адресується до 43 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Людмила КОРЕЦЬКА

Валерій МАРТИНЮК

Людмила КОРЕЦЬКА