

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»
РОБОТИЗОВАНИЙ МАНІПУЛЯТОР З ВИКОРИСТАННЯМ
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

**ROBOTIC MANIPULATOR USING ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи КІ-42

Рабан Олександр Ігорович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Костючко Сергій Миколайович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

« 04 » червня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Т. ТЕРЛЕЦЬКИЙ

« 10 » 01 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Рабану Олександр Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Роботизований маніпулятор з використанням штучного інтелекту

Керівник роботи к.т.н., доц. Костючко Сергій Миколайович

затвержені наказом закладу вищої освіти від «04» січня 2025 року № 11/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 11.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області та різні інтернет-ресурси технічного спрямування.

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

Вступ

Аналіз проблеми створення гібридного роботизованого маніпулятора та постановка завдань дослідження

дослідження

Теоретичні основи гібридних маніпуляторів з пневматичними та електромеханічними приводами

Проектування архітектури та системи керування маніпулятором

Реалізація та тестування фізичного прототипу

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Огляд проблеми створення гібридного маніпулятора та постановка завдань дослідження</i>	<i>Костючко С.М., доцент</i>		
<i>Теоретичне обґрунтування та технічна реалізація гібридної системи</i>	<i>Костючко С.М., доцент</i>		
<i>Проектування та реалізація системи керування маніпулятором</i>	<i>Костючко С.М., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Лавренчук С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		_____ %	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 10.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми, аналіз предметної області та наявних рішень</i>	до 10.02.2025 р.	Виконано
2.	<i>Теоретичне обґрунтування реалізація гібридної системи</i>	до 02.03.2025 р.	Виконано
3.	<i>Проектування та реалізація керування маніпулятором</i>	до 02.04.2025 р.	Виконано
4.	<i>Висновки та загальні результати дослідження</i>	до 10.04.2025 р.	Виконано
5.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 15.04.2025 р.	Виконано
6.	<i>Формування додатків</i>	до 02.05.2025 р.	Виконано
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2025 р.	Виконано
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 30.05.2025 р.	Виконано
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 03.06.2025 р.	Виконано
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	до 10.06.2025 р.	Виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Рабан О.І.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Костючко С.М.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Рабан О. І. Роботизований маніпулятор з використанням штучного інтелекту. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Перший розділ присвячено аналізу підходів до побудови роботизованих маніпуляторів. Розглянуто типи виконавчих механізмів, підходи до керування, застосування пневматичних м'язів і мікроконтролерів у побудові систем автоматизації, а також приклади реалізацій з використанням штучного інтелекту.

У другому розділі представлено архітектуру спроектованої системи: описано компонування пневматичних м'язів і сервоприводів, обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32, описано логіку адресного керування, реалізацію зворотного зв'язку та технічну готовність до взаємодії з AI-системою.

У третьому розділі описано етапи реалізації фізичного прототипу: монтаж пневматичних і електронних компонентів, розробку прошивки для ESP32, тестування працездатності одного повного каналу, а також окреслено потенційні шляхи масштабування системи до повноцінної роботизованої руки.

Об'єкт дослідження – роботизовані маніпулятори з поєднанням пневматичних і електромеханічних приводів.

Предмет дослідження – архітектура керування пневматичними м'язами та логіка інтеграції з сервомеханікою на базі ESP32.

Метою роботи є створення фізичного прототипу гібридного маніпулятора, який поєднує пневматичні м'язи, сервоприводи та мікроконтролер ESP32, із підтримкою зворотного зв'язку та підготовкою до AI-керування.

Ключові слова: роботизований маніпулятор, ESP32, пневматичний м'яз, FSR-сенсор, соленоїдний клапан, адресне керування, штучний інтелект.

ABSTRACT

Raban O. Robotic manipulator using artificial intelligence. Manuscript.

Qualification work of the bachelor of the specialty "Computer Engineering" specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The first chapter is devoted to the analysis of modern approaches to the construction of robotic manipulators. Types of actuators, approaches to control, the use of pneumatic muscles and microcontrollers in the construction of automation systems, as well as examples of implementations using artificial intelligence are considered.

The second section presents the architecture of the designed system: the layout of pneumatic muscles and servo drives is described, the choice of the ESP32 microcontroller is justified, the address control logic, feedback implementation, and technical readiness for interaction with the AI system are described.

The third section describes the stages of implementing the physical prototype: installation of pneumatic and electronic components, development of firmware for ESP32, testing the operability of one full channel, and also outlines potential ways to scale the system to a full-fledged robotic arm.

The object of research is robotic manipulators with a combination of pneumatic and electromechanical drives.

The subject of research is the architecture of pneumatic muscle control and the logic of integration with servomechanics based on ESP32.

The aim of the work is to create a physical prototype of a hybrid manipulator that combines pneumatic muscles, servos and an ESP32 microcontroller, with feedback support and preparation for AI control.

Keywords: robotic manipulator, ESP32, pneumatic muscle, FSR sensor, solenoid valve, addressable control, artificial intelligence.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СФЕРІ РОБОТИЗОВАНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ.....	10
1.1 Сучасні класифікації та сфери застосування роботизованих маніпуляторів	10
1.2 Пневматичні штучні м'язи: принцип дії та особливості використання.....	11
1.3 Архітектура керування роботизованими системами на базі ESP32	13
1.4 Аналіз існуючих реалізацій подібних систем	14
1.5 Проблеми та виклики при побудові гібридних маніпуляторів	15
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРИ МАНІПУЛЯТОРА.....	17
2.1 Постановка задачі на проєктування	17
2.2 Архітектура маніпулятора.....	18
2.2.1 Загальна структура системи.....	18
2.2.2 Пневматичний модуль.....	19
2.2.3 Сервоприводи та живлення.....	19
2.2.4 Комунікація з ESP32.....	20
2.3 Вибір елементної бази	21
2.4 Схема керування та програмна логіка	22
2.4.1 Логіка керування пневматичними каналами	23
2.4.2 Керування сервоприводами	24
2.4.3 Обробка команд та запобігання помилкам	25
2.5 Зворотний зв'язок у системі керування.....	26
2.6 Моделювання поведінки системи у віртуальному середовищі	27

2.7 Безпека використання системи.....	27
2.8 Етапність реалізації проєкту та подальші дії.....	28
РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ.....	30
3.1 Монтаж фізичної конструкції.....	30
3.2 Реалізація електричної схеми.....	34
3.3 Програмна реалізація та налаштування ESP32.....	35
3.4 Тестування працездатності та налагодження.....	36
3.5 Взаємодія з AI-системою: архітектурні основи.....	38
3.6 Технічні складнощі, виявлені під час налаштування.....	39
3.7 Варіанти розвитку системи та можливості модернізації.....	40
ВИСНОВКИ.....	42
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44
ДОДАТКИ.....	47

ВСТУП

У сучасних умовах активного розвитку інтелектуальних систем автоматизації особливої актуальності набувають роботизовані маніпулятори, здатні взаємодіяти з фізичним середовищем на рівні, наближеному до людського. Завдяки прогресу в галузі гнучкої пневматики, сучасної електроніки та мікроконтролерів відкриваються нові можливості для створення компактних, легких та безпечних у використанні роботизованих систем. Одним із перспективних напрямів є побудова гібридних маніпуляторів, які поєднують у собі переваги пневматичних м'язів та сервоприводів. Такі рішення мають потенціал застосування як у галузі автоматизованого виробництва, так і в біомедичних або побутових системах – наприклад, у вигляді активного носимого протеза або допоміжної «третьої руки».

Метою роботи є проектування та реалізація фізичного прототипу гібридного роботизованого маніпулятора, який поєднає пневматичні м'язи для пальців і сервоприводи для великих суглобів, з керуванням на базі мікроконтролера ESP32 та підтримкою зворотного зв'язку від одного сенсора тиску (FSR).

Об'єктом дослідження є роботизовані маніпулятори, що поєднують пневматичні й електромеханічні приводи.

Предметом дослідження виступає пневматична система керування рухом пальців та логіка інтеграції з сервомеханікою на базі ESP32 у складі гібридної керованої конструкції.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати такі завдання.

– реалізувати базову пневматичну систему керування рухом одного пальця з використанням соленоїдного клапана, мікроконтролера ESP32 та MOSFET-драйвера;

– спроектувати архітектуру керування усією системою – з урахуванням масштабування до п'яти пальців, керування сервоприводами у ліктьовому та плечовому суглобах, а також організації живлення;

– розробити програмну логіку роботи всієї системи, що забезпечує координацію між пневматичними та електромеханічними приводами та підтримує зворотний зв'язок через сенсор сили натиску;

– змонтувати фізичний стенд, що складається з пневматичних пальців, сервоприводного ліктя та понтографічної платформи, придатної до розширення;

– дослідити працездатність прототипу шляхом тестування поведінки системи у відповідь на зовнішнє натискання, активне згинання пальців, рухи в лікті та відповідь з боку контролера.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СФЕРІ РОБОТИЗОВАНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

Упродовж останніх десятиліть розвиток роботизованих систем набув особливого значення як у промисловості, так і в суміжних галузях, пов'язаних з медициною, побутовою автоматикою, логістикою, аграрним сектором тощо. Виробництво таких систем з кожним роком стає доступнішим, а їхня конструктивна складність – більш адаптованою до потреб користувачів. Особливу роль у цьому процесі відіграє маніпуляторна техніка – як базовий клас роботизованих пристроїв, здатних здійснювати контрольовані рухи та взаємодіяти з об'єктами довкілля. Розмаїття конструкцій, приводів і принципів керування зумовлює необхідність системного огляду сучасного стану цієї галузі для формування обґрунтованого технічного рішення у межах даної роботи.

Цей розділ присвячено узагальненню наукових і технічних джерел щодо класифікації маніпуляторів, специфіки їх приводів, зокрема пневматичних м'язів, а також принципів керування, реалізованих з використанням вбудованих мікроконтролерів. Окрему увагу буде приділено аналізу існуючих прикладних реалізацій, наближених до поставленої в роботі задачі.

1.1 Сучасні класифікації та сфери застосування роботизованих маніпуляторів

Роботизований маніпулятор у найзагальнішому вигляді являє собою багатоелементну механічну структуру, що імітує функціональність руки або її окремих частин, забезпечуючи позиціонування виконавчого органу у визначеному просторі. Залежно від призначення, маніпулятори можуть виконувати широке коло функцій – від простих повторюваних операцій у виробництві до складних адаптивних рухів у динамічному середовищі. Їхня

функціональність визначається кількістю ступенів свободи, видом приводів, типом зворотного зв'язку та способом керування.

Класифікація маніпуляторів за принципом дії охоплює електромеханічні, пневматичні, гідравлічні та комбіновані конструкції. Переважна частина промислових роботів реалізована на базі електромеханічного приводу, що забезпечує високу точність і передбачуваність руху. Однак в останнє десятиліття значного поширення набувають м'які маніпулятори, конструкції яких відходять від жорсткої кінематики та базуються на деформівних структурах, зокрема пневматичних м'язах, полімерних оболонках, силіконових секціях з повітряним наповненням.

З огляду на функціональні можливості, виділяють маніпулятори з відкритою та закритою кінематичною структурою, а також з фіксованою та мобільною основою. У системах з відкритою структурою рух виконавчого органу не зумовлює зміни конфігурації інших частин, тоді як закриті структури передбачають складну взаємозалежність елементів. Найпоширенішими залишаються промислові рукояті з відкритою кінематикою, проте у сфері протезування та побутових маніпуляторів зростає роль більш гнучких і варіативних рішень.

1.2 Пневматичні штучні м'язи: принцип дії та особливості використання

Пневматичні штучні м'язи (ПМ), також відомі як м'язи МакКіббена (рисунок 1.1), є виконавчими елементами, що змінюють довжину під дією тиску повітря, імітуючи принцип скорочення біологічного м'яза. Основу їхньої конструкції становить еластична трубка, поміщена у сітчасту обплетену оболонку. При подачі стисненого повітря внутрішня трубка розширюється в поперечному перерізі, а обплетення перешкоджає радіальному розширенню, перетворюючи тиск у поздовжнє стискання – таким чином досягається лінійне зусилля.

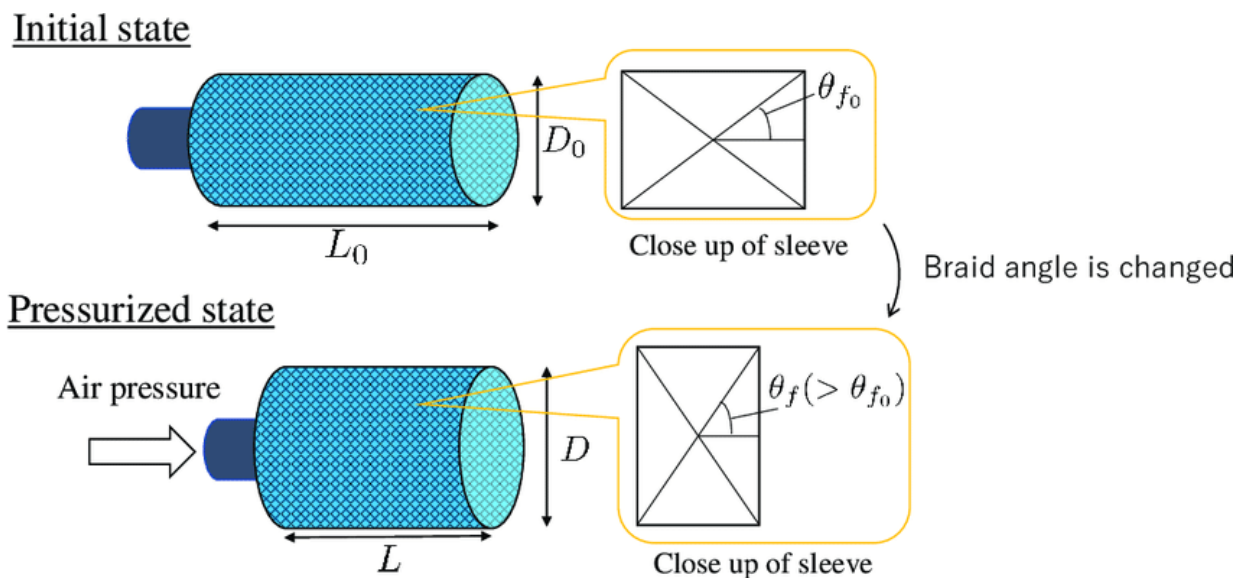


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення пневматичного м'яза МакКіббена [1]

Особливістю таких м'язів є їхня м'якість у пасивному стані, здатність адаптуватися до зовнішніх навантажень без шкоди для конструкції [2], а також низька маса та простота виготовлення. За рахунок цього вони використовуються у сферах, де взаємодія з людиною вимагає підвищеної безпеки: реабілітаційні екзоскелети, біонічні протези, м'яка робототехніка.

Попри зазначені переваги, пневматичні м'язи мають низку обмежень. Зокрема, точне керування їхнім положенням потребує використання датчиків тиску або сили, оскільки залежність між тиском і ступенем скорочення є нелінійною та залежною від навантаження. Крім того, для їх роботи необхідне джерело стисненого повітря та система клапанів, що збільшує загальну складність системи керування.

У рамках цієї роботи пневматичні м'язи використовуються для керування пальцями маніпулятора. Вибір такого рішення зумовлений можливістю створення компактної та безпечної конструкції, що дозволяє досягти природної форми згинання при простому технічному виконанні. Застосування саморобних м'язів на базі полімерних трубок та обплетення забезпечує низьку вартість виробництва та можливість масштабування системи до кількох виконавчих каналів.

1.3 Архітектура керування роботизованими системами на базі ESP32

Для побудови адаптивних роботизованих систем важливим є розподіл функцій між модулями високого та низького рівня. У сучасних практиках керування маніпуляторами часто застосовують архітектуру, в якій центральна система приймає рішення (на основі зорових або сенсорних даних), а периферійні пристрої виконують команди безпосереднього приводу. У цьому контексті мікроконтролер ESP32 виступає як гнучкий інтерфейсний модуль низького рівня, здатний забезпечувати пряме керування виконавчими механізмами.

Можливості ESP32 дозволяють ефективно реалізувати подачу керувальних сигналів на електромеханічні приводи – зокрема, на соленоїдні клапани пневматичних м'язів і сервоприводи обертання. Контролер підтримує декілька апаратних PWM-каналів, що дає змогу формувати сигнали з високою точністю та стабільністю [3]. До нього можуть бути підключені цифрові та аналогові сенсори, зокрема датчики сили натиску (FSR), що дає змогу реалізувати базовий зворотний зв'язок без потреби у високопродуктивному обчислювальному середовищі.

У рамках даної роботи ESP32 виконує функції вузла низького рівня – керує клапанами та серво за визначеними умовами, які можуть задаватися як локально, так і з зовнішнього середовища, наприклад, через послідовне з'єднання з комп'ютером або іншою обчислювальною платформою. У перспективі до системи може бути інтегровано вищий рівень управління, зокрема Raspberry Pi, який прийматиме рішення на основі складніших алгоритмів чи моделей штучного інтелекту та взаємодіятиме з ESP32 як з периферійним виконавчим модулем.

Такий поділ функцій дозволяє гнучко масштабувати систему відповідно до вимог задачі: від простої демонстраційної логіки до повноцінного інтелектуального керування з навчанням або обробкою сенсорних потоків у реальному часі.

1.4 Аналіз існуючих реалізацій подібних систем

У світовій практиці існує низка технічних рішень, спрямованих на створення роботизованих рук та маніпуляторів із застосуванням пневматичних приводів, зокрема штучних м'язів. Комерційні зразки таких систем, наприклад, роботи серії Festo Bionic Handling Assistant (рисунок 1.2), демонструють можливість точного позиціонування за допомогою гнучких повітряних камер, які дозволяють маніпулятору адаптуватися до форми об'єкта [4]. Водночас ці рішення відзначаються високою вартістю, складною конструкцією та вимогливістю до системи керування.

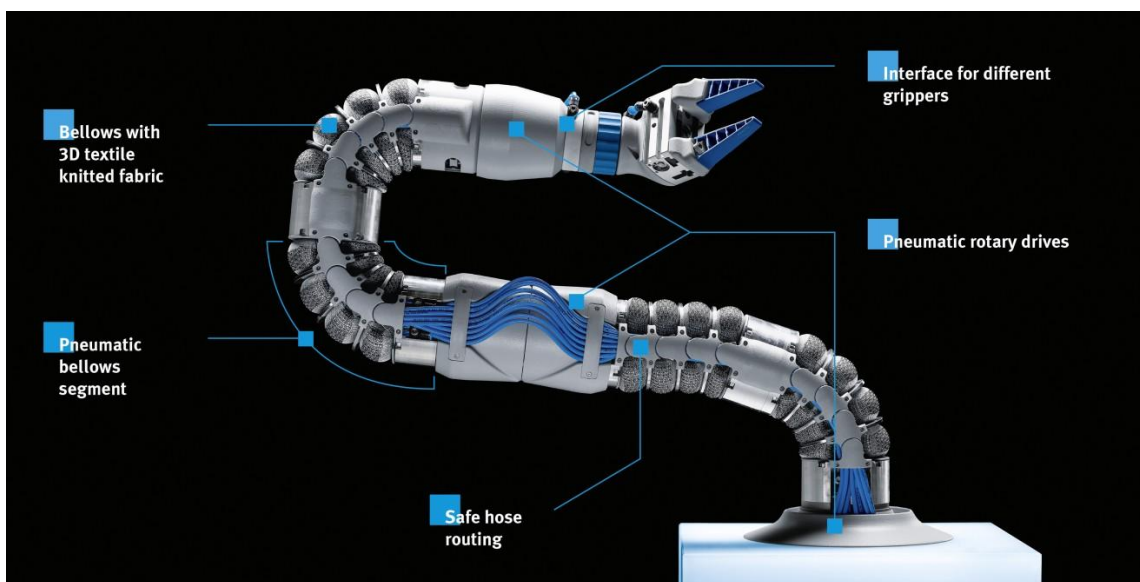


Рисунок 1.3 – М'який маніпулятор Festo BionicSoftArm [5]

У дослідницькому середовищі набули поширення проєкти з використанням саморобних пневматичних м'язів на базі еластичних трубок у нейлоновій або капроновій обмотці. Такі м'язи є суттєво дешевшими у виготовленні, але потребують точного тиску та відповідного калібрування для повторюваної дії. Приклади таких підходів зустрічаються в рамках проєктів м'якої робототехніки, зокрема у проєктах MIT Soft Robotics та різних open-source ініціативах, спрямованих на створення протезів із відкритим апаратним і програмним забезпеченням.

Щодо керування, у багатьох прикладних реалізаціях спостерігається поділ між низькорівневим модулем, що здійснює фізичне керування приводами, та високорівневою системою, яка формує управляючі сигнали на основі зовнішніх або внутрішніх даних [6]. Наприклад, у відкритих проєктах на базі Arduino, ESP32 або STM32, низькорівневе керування часто реалізується без використання складних алгоритмів, але дозволяє швидке прототипування функцій, необхідних для взаємодії з фізичним середовищем. У більш складних системах керування здійснюється з використанням ROS (Robot Operating System) на платформах на кшталт Raspberry Pi або Nvidia Jetson, що дозволяє інтегрувати алгоритми розпізнавання, комп'ютерного зору або моделі нейронного керування.

Порівнюючи зазначені реалізації, можна стверджувати, що підхід, обраний у межах цієї роботи – тобто використання ESP32 для керування саморобними пневматичними м'язами в комбінації з сервоприводами – поєднує низьку собівартість з достатньою функціональністю для створення демонстраційного або навчального зразка. Він також залишає можливість для майбутньої інтеграції з більш складними інтелектуальними системами.

1.5 Проблеми та виклики при побудові гібридних маніпуляторів

Розробка гібридного маніпулятора на основі пневматичних і електромеханічних приводів супроводжується низкою технічних викликів. Одним із основних є узгодження характеристик руху – пневматичні м'язи мають нелінійну залежність між тиском і силою, а серводвигуни – передбачувану лінійну кінематику. Це ускладнює синхронізацію рухів, особливо при реалізації плавної взаємодії між пальцями та великими суглобами.

Ще однією проблемою є стабільність пневмосистеми. При використанні недорогих насосів або ручних компресорів важко підтримувати постійний тиск у магістралі. Це призводить до різної динаміки при однакових командах керування, що ускладнює калібрування системи.

Крім того, пневматичні компоненти (м'язи, шланги, клапани) мають обмежений життєвий цикл та можуть бути вразливими до витоків повітря. Не менш важливим є питання енергоефективності – в той час як серводвигуни споживають струм лише під навантаженням, пневмоклапани можуть тривалий час утримуватись в активному стані, підвищуючи загальне споживання енергії.

Нарешті, інтеграція різних типів приводів вимагає ретельного проектування схеми керування. Особливу увагу слід приділити запобіганню взаємного впливу ліній живлення високої напруги (12 В для клапанів) і низьковольтної логіки ESP32.

Узагальнення проведеного аналізу дозволяє стверджувати, що створення гібридного маніпулятора, в якому поєднуються пневматичні та електромеханічні приводи, є доцільним як з технічної, так і з практичної точки зору. Така система може бути реалізована на основі недорогих і доступних компонентів, зокрема мікроконтролера ESP32, саморобних пневматичних м'язів і стандартних сервоприводів, що забезпечує гнучкість і масштабованість архітектури. Проведений огляд підтверджує вибір технічного підходу, який буде використано в подальшому проектуванні та реалізації керованого роботизованого маніпулятора.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРИ МАНІПУЛЯТОРА

Розроблення керованої роботизованої системи вимагає формування узгодженої архітектури, яка поєднує апаратні й програмні компоненти, забезпечує надійність, масштабованість та відповідність технічним завданням. У цьому розділі описано логіку побудови гібридного маніпулятора на основі пневматичних м'язів для керування пальцями та сервоприводів для реалізації рухів у суглобах вищого порядку. Окрему увагу приділено вибору елементної бази, зокрема мікроконтролера ESP32, виконавчих механізмів, елементів керування тиском, способу живлення та зворотного зв'язку. Запропонована архітектура повинна враховувати технічні обмеження, а також відповідати вимогам простоти реалізації у лабораторних умовах.

2.1 Постановка задачі на проєктування

Основним завданням проєктування є створення системи, яка забезпечує керування рухами антропоморфної маніпуляторної конструкції з урахуванням обмеженого бюджету, часових рамок та наявної елементної бази. Конструктивна частина повинна включати п'ять пальців з пневматичним приводом, що відтворюють базову функцію захоплення, а також два ступені свободи для імітації згинання в ліктьовому та плечовому суглобах.

Система керування має бути побудована таким чином, щоб забезпечити можливість задання команд як з боку самого контролера, так і з зовнішнього пристрою наприклад, персонального комп'ютера або обчислювального модуля типу Raspberry Pi [7]. Такий підхід дозволяє використовувати ESP32 не лише як автономний виконавчий пристрій, а й як частину більш складної ієрархічної системи, в якій логіка прийняття рішень може бути делегована вищому рівню.

З огляду на те, що керування маніпулятором на основі штучного інтелекту реалізується в межах суміжного програмного забезпечення на Raspberry Pi, архітектура цієї системи має забезпечити повну технічну готовність до такого типу взаємодії. Це передбачає незалежне керування кожним з п'яти пневматичних каналів через окремі інтерфейси комутації, можливість прийому зовнішніх команд, а також зворотній зв'язок із сенсорних елементів.

Постановка задачі також передбачає забезпечення сумісності між модулями керування пневматичними м'язами та сервоприводами. При цьому необхідно врахувати відмінності у типі приводів, режимах роботи та вимогах до живлення. Особливу увагу слід приділити вибору компонентів керування, які дозволяють безпечно і надійно комутувати навантаження, а також реалізувати зворотний зв'язок з принаймні одного пальця, що дозволить у подальшому розвивати адаптивні стратегії керування.

2.2 Архітектура маніпулятора

Розроблена система маніпулятора побудована за модульним принципом із поєднанням пневматичних м'язів для реалізації згинання пальців та електромеханічних приводів для контролю суглобів вищого рівня. Такий підхід дозволяє адаптувати конструкцію до різних сценаріїв використання, масштабувати кількість каналів, а також забезпечити гнучкість у виборі логіки керування.

2.2.1 Загальна структура системи

У конструкції передбачено окремі функціональні зони: п'ять пальців, що керуються пневматичними м'язами; сегмент «лікоть», в якому реалізовано обертання за допомогою серво; а також модуль «плече», що зарезервований для подальшої розробки. Така топологія дозволяє відокремити керування дрібною моторикою (пальці) від грубих рухів, що відповідають за положення маніпулятора у просторі.

Кожен палець оснащено індивідуальним пневматичним м'язом, підключеним до окремого соленоїдного клапана [8]. Це забезпечує незалежне керування каналами – необхідну умову для реалізації адресного захоплення та точного контролю сили.

Фізично маніпулятор закріплюється на телескопічному понтографі, який виконує функцію стійки та дозволяє зручно позиціонувати систему для досліджень або демонстрації. Каркасна частина реалізована з ПВХ-труб і силіконових гнучких елементів, що знижує вагу та зменшує навантаження на приводи.

2.2.2 Пневматичний модуль

Пневматична частина є основою керування пальцями. Кожен палець змонтовано з використанням силіконової трубки діаметром 4×6 мм, що вставлена у синтетичну обплетку [9]. Така конструкція дозволяє створити штучний м'яз за принципом МакКіббена: при подачі повітря м'яз скорочується, імітуючи згинання.

Соленоїдні клапани типу CHUKA 3V210-08-NC керують подачею тиску у відповідні м'язи. Кожен клапан комутує повітряний канал незалежно, а його нормально закритий режим забезпечує безпечне розвантаження системи при втраті живлення.

Подача повітря може здійснюватись як від стаціонарного компресора, так і від портативного насоса. Для базового функціоналу достатньо 0,5–1 бару тиску, що дозволяє використовувати навіть велосипедний насос з резервуаром.

Пневматичні шланги з'єднують клапани з м'язами через латунні або пластикові фітинги, що гарантують герметичність і ремонтпридатність системи. Стиснене повітря розподіляється по каналах згідно сигналів керування з ESP32.

2.2.3 Сервоприводи та живлення

Для реалізації рухів в «лікть» та потенційно в «плечі» використовуються стандартні сервомеханізми типу MG996R. Ці серво забезпечують крутний момент до 10 кг·см, чого достатньо для обертання легких модулів конструкції.

Сигнал на серво формується через PWM-виходи ESP32, які можуть одночасно керувати кількома каналами з високою точністю. Конфігурація дозволяє задавати кути повороту в межах 0-180°, забезпечуючи плавний контроль положення.

Живлення системи розділено на логічну та силову частини. ESP32 та сенсори працюють на 3,3-5 В, отриманих через стабілізатор або USB. Силові компоненти – клапани та серво – отримують живлення від джерела постійного струму на 12 В. Поділ ліній дозволяє уникнути перешкод при одночасній роботі силових елементів і мікроконтролера.

У разі розширення системи до п'яти повноцінних каналів і двох сервоприводів, рекомендовано використовувати окреме джерело живлення зі стабілізацією на 3-5 А.

2.2.4 Комунікація з ESP32

Мікроконтролер ESP32 виконує функції керуючого модуля низького рівня. Він приймає команди від зовнішніх систем – зокрема, Raspberry Pi або ПК – через UART-інтерфейс [10], або може працювати автономно із попередньо заданими сценаріями.

Кожен цифровий вихід ESP32 керує окремим транзистором (MOSFET), що комутує клапан. Аналогові входи використовуються для зчитування сигналів з сенсорів сили (FSR) – це дозволяє реалізувати базовий зворотний зв'язок.

Архітектура системи підтримує двосторонню передачу даних: значення з сенсорів можуть передаватись на високорівневу AI-систему для аналізу, а у відповідь – надходять нові команди. Така взаємодія дозволяє реалізовувати сценарії з адаптивним керуванням, наприклад, регулювання сили захоплення залежно від матеріалу об'єкта.

Сигнали передаються у формалізованому вигляді – наприклад, JSON або CSV. Протокол обміну не зафіксовано жорстко, що забезпечує гнучкість при зміні середовища керування або розширенні функціоналу.

2.3 Вибір елементної бази

Основним критерієм при виборі компонентів для створення гібридного маніпулятора стала необхідність забезпечення функціональності при мінімальних витратах, із використанням доступної в побутових умовах елементної бази. У роботі застосовано поєднання нових і вторинно використаних матеріалів, які в сукупності дозволяють реалізувати як пневматичні, так і електромеханічні функціональні вузли.

В якості виконавчого контролера обрано мікроконтролер ESP32, який поєднує достатню обчислювальну потужність із великою кількістю портів введення/виведення, апаратною підтримкою PWM-сигналів та можливістю розширення логіки керування. Його ресурсу цілком достатньо для керування кількома соленоїдними клапанами і сервоприводами, а також для зчитування аналогових сигналів від сенсорів зворотного зв'язку. Окрім того, ESP32 дозволяє реалізувати у перспективі базові алгоритми на основі умовних переходів або навіть спрощених логічних правил [11].

Зведені технічні характеристики основних компонентів системи подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні компоненти системи

Компонент	Позначення	Напруга/Сила	Призначення
Мікроконтролер	ESP32	3,3 В	Керування системою
Клапан соленоїдний	CHUKA 3V210-08-NC	12 В, ~120 мА	Комутація повітря в м'язах
Транзистор MOSFET	IRFZ44N	до 100 В, 33 А	Комутація навантаження
Сенсор тиску	FSR	0-5 В (ADC)	Зворотний зв'язок
Живлення	Побутовий адаптер 12 В	12 В, $\geq 1,5$ А	Силове живлення клапанів і сервоприводів

Пневматичний привід реалізовано за допомогою трубки 4×6 мм із силікону, що поміщена в обплетення для кабелів. Така структура імітує класичну конструкцію м'яза МакКіббена та забезпечує стискання при подачі повітря. Як виконавчий пристрій для подачі повітря використано соленоїдний клапан CHUKA 3V210-08-NC типу 3/2 на 12 В постійного струму. Він дозволяє комутувати потік стисненого повітря з високою швидкістю та надійністю, а його конструкція з нормально закритим режимом гарантує безпечний стан при знеструмленні системи.

Для комутації керувального сигналу з ESP32 на обмотку клапана застосовано дискретний n-канальний MOSFET IRFZ44N, що має достатній запас струму для надійного керування навантаженням. У ланцюг увімкнено діод типу M7 з метою придушення індуктивних перенапруг. В якості лінії живлення використано побутовий блок живлення на 12 В постійного струму, призначений для живлення роутера, який має відповідний струмовий запас для одноканальної системи. У разі розширення кількості каналів буде потрібне підсилення джерела живлення або його заміна.

Зворотний зв'язок реалізовано через сенсор сили натиску типу FSR, який змонтовано на одному з пальців [12]. Його сигнал зчитується через аналоговий вхід ESP32, що дозволяє реалізувати просту логіку типу «об'єкт затиснуто – зняти тиск».

Розводка логіки та комутаційних елементів спроектована з урахуванням масштабування до п'яти незалежних каналів [13], що забезпечує можливість реалізації повноцінного адресного керування пальцями при подачі команд з високорівневого модуля керування.

2.4 Схеми керування та програмна логіка

Побудова логіки керування виконавчими елементами здійснена на основі мікроконтролера ESP32, який виконує функції комутації, аналізу зворотного зв'язку та обробки команд з зовнішніх систем. Для реалізації повного циклу

керування необхідно враховувати відмінності між типами приводів (пневматичні м'язи й серво), а також забезпечити стійку взаємодію із зовнішніми модулями – зокрема, системами штучного інтелекту.

2.4.1 Логіка керування пневматичними каналами

У схемі керування кожному пневматичному м'язу відповідає окремий соленоїдний клапан, підключений через транзисторний драйвер до ESP32. Клапани активуються за допомогою цифрових сигналів, які подаються на затвори MOSFET-ключів. Таким чином реалізується адресне керування кожним каналом, що дозволяє подавати повітря на конкретний палець незалежно від інших. Кожен канал працює в одному з двох режимів: «захоплення» (активація клапана, подача повітря) або «відпускання» (вимкнення клапана, скидання тиску).

Після активації ESP32 виконує зчитування сигналу з FSR-сенсора, розміщеного на пальці маніпулятора. Як тільки сигнал перевищує заданий поріг, що вказує на контакт з об'єктом або досягнення необхідного зусилля, клапан вимикається, фіксуючи стан «захоплено». Така стратегія дозволяє зменшити споживання повітря і запобігти надмірному тиску в системі.

Кожен палець керується ізольовано, а логіка передбачає можливість масштабування до п'яти каналів без конфліктів у керуванні або зворотному зв'язку. Поточна реалізація вже містить усі необхідні інтерфейси для обробки зворотного сигналу, що дозволяє реалізовувати адаптивну поведінку. Окрім того, алгоритм можна модифікувати для впровадження динамічного керування тиском, змінюючи його в реальному часі на основі даних сенсорів.

Для наочності процес керування одним пневматичним каналом подано на блок-схемі (рисунок 2.1), яка ілюструє послідовність активації клапана, зчитування сигналу з FSR-сенсора та умову завершення циклу дії. У майбутньому можливе розширення логіки на основі машинного навчання для оптимізації зусиль захоплення відповідно до типу об'єкта.

Блок-схема логіки керування одним пальцем

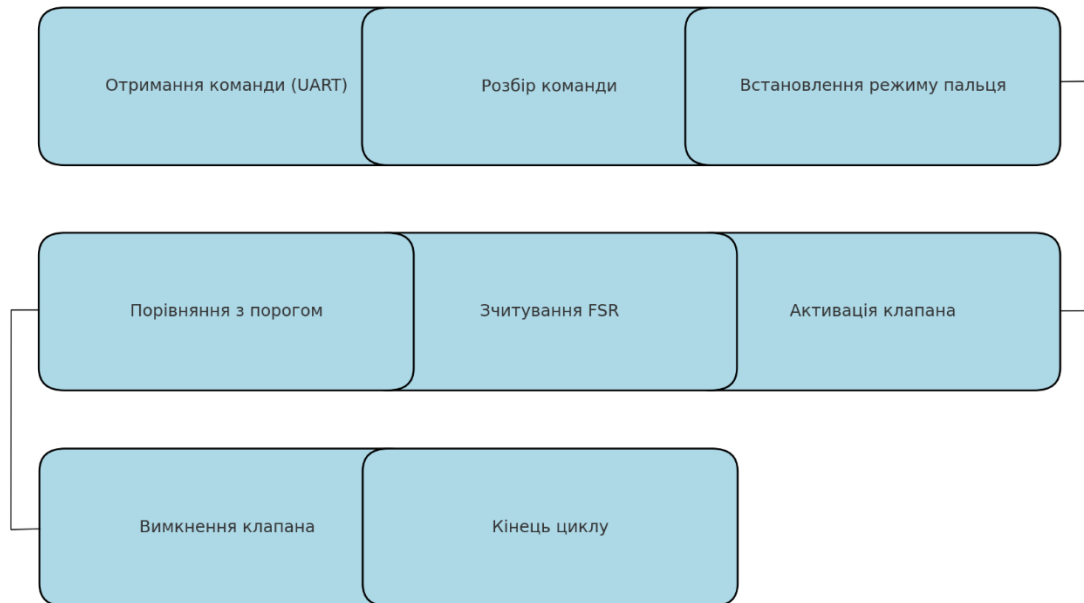


Рисунок 2.1 – Блок-схема логіки керування одним пневматичним каналом

2.4.2 Керування сервоприводами

Сегменти «лікоть» та «плече» реалізовані на базі стандартних сервоприводів типу MG996R. ESP32 керує цими сервомеханізмами через свої PWM-виходи, які дозволяють формувати сигнал із заданим робочим циклом і частотою. Таким чином задається кут обертання – у межах від 0 до 180 градусів.

Прошивка мікроконтролера передбачає можливість паралельного керування кількома сервоприводами. Кожен з них може приймати окрему команду на зміну положення, що дозволяє гнучко змінювати конфігурацію руки відповідно до задачі.

Силова частина сервоелементів живиться від джерела постійного струму 12 В, відокремленого від логіки ESP32. Такий поділ ліній дозволяє уникнути перешкод, що виникають при значних струмових сплесках, які можуть викликати перезапуск мікроконтролера.

2.4.3 Обробка команд та запобігання помилкам

У рамках програмної реалізації було враховано потенційні ризики, пов'язані з нестабільним зв'язком, некоректними вхідними даними або паралельною активацією декількох каналів. Щоб уникнути непередбачуваних станів системи, розроблена логіка включає механізми перевірки, фільтрації та захисту.

Кожна команда, що надходить по UART, проходить попередню валідацію: перевіряється довжина пакету, відповідність формату (наприклад, наявність необхідних полів), а також допустимість значень. У разі виявлення помилок система ігнорує таку команду та зберігає попередній стан, запобігаючи хаотичній поведінці виконавчих елементів.

Для захисту від одночасного спрацьовування надто багатьох клапанів, що може викликати просідання напруги або перезавпуск ESP32, реалізовано лімітуючу логіку. У прошивці задано максимальну кількість активних каналів у певному циклі (наприклад, не більше двох), а решта команд ставляться в чергу.

Крім того, для уникнення передчасного спрацювання FSR-сенсора одразу після відкриття клапана (коли м'яз ще не досяг об'єкта), застосовується невелика програмна затримка (delay ~100-150 мс) перед першим зчитуванням сигналу. Це дозволяє нівелювати інерційні коливання та забезпечити стабільність зворотного зв'язку.

Щоб зменшити вплив шумів на аналогові входи, реалізовано усереднення кількох значень за ковзним вікном. Наприклад, ESP32 зчитує 5-10 вимірювань поспіль і бере середнє значення, що знижує чутливість до випадкових коливань сигналу та покращує точність реакції.

У майбутньому передбачається розширення логіки обробки на основі системи подій або автоматичних таймерів, а також реалізація зворотного протоколу підтвердження прийняття команди, що зробить комунікацію більш надійною в умовах складного середовища або віддаленого керування.

2.5 Зворотний зв'язок у системі керування

У більшості сучасних роботизованих систем реалізація зворотного зв'язку є необхідною умовою для досягнення адаптивності, безпечної взаємодії з середовищем і точності виконання команд. У межах цієї роботи зворотний зв'язок реалізовано через сенсор сили натиску типу FSR (Force Sensitive Resistor), розташований на одному з пальців маніпулятора. Його основною функцією є фіксація моменту контакту з об'єктом або визначення досягнення граничної сили захоплення.

FSR-сенсор змінює свій опір залежно від прикладеного тиску, і тому дозволяє вимірювати зусилля у вигляді аналогового сигналу, що зчитується через ADC-порт мікроконтролера ESP32. У реалізованій схемі контролер активує клапан відповідного каналу й починає зчитування сигналу з FSR. Як тільки значення перевищує заздалегідь встановлений поріг, ESP32 деактивує клапан, припиняючи подачу повітря. Таким чином досягається базовий рівень тактильного контролю, що дозволяє уникнути надмірного стискання або затискання об'єкта.

На поточному етапі використовується лише один сенсор для демонстрації принципу роботи [14]. Проте програмна й апаратна архітектура дозволяє масштабування до п'яти незалежних сенсорних каналів – по одному на кожен палець. Такий підхід дозволить реалізувати більш складні сценарії захоплення, у яких кожен палець буде реагувати на свою локальну сенсорну інформацію.

Наявність зворотного зв'язку є важливим елементом при реалізації інтерактивного керування на основі штучного інтелекту [15]. Дані з FSR можуть бути використані в AI-моделях як вхідні параметри для аналізу ефективності захоплення, корекції рухів у реальному часі або навіть навчання моделі через зворотне підкріплення. Таким чином, система має потенціал для розвитку в напрямі автономного керування з адаптацією до умов середовища.

2.6 Моделювання поведінки системи у віртуальному середовищі

До початку збирання фізичного прототипу було виконано базове моделювання ключових компонентів у середовищах Fritzing та Tinkercad. Основною метою моделювання було перевірити працездатність логіки комутації між мікроконтролером ESP32, MOSFET-драйверами та соленоїдними клапанами.

На віртуальному етапі було реалізовано схему з одним каналом керування: логічний рівень на GPIO керує затвором MOSFET-транзистора IRFZ44N, що, у свою чергу, комутує живлення до віртуального клапана. Для перевірки зворотного зв'язку використовувався симулятор аналогового сигналу з FSR-сенсора, підключеного до ADC ESP32 через подільник напруги.

Хоча симуляція не дозволяє повністю передати пневматичну динаміку, вона була корисною для перевірки конфігурації логіки керування, усунення можливих коротких замикань у ланцюгах та оцінки часових затримок в керуванні.

2.7 Безпека використання системи

Проектування роботизованого маніпулятора потребує врахування аспектів безпеки як для користувача, так і для самого пристрою. У цій роботі реалізовано базовий рівень безпеки відповідно до характеру лабораторного середовища та цільового прототипування. Зокрема, передбачено низку технічних рішень для мінімізації ризиків:

По-перше, усі виконавчі елементи працюють на низьких напругах: логіка ESP32 – 3,3 В, клапани й сервоприводи – 12 В. Це значно знижує ризик ураження електричним струмом та дозволяє використовувати побутові джерела живлення без додаткової ізоляції.

По-друге, у схемі передбачено захисні елементи – діоди типу M7, що запобігають виникненню імпульсних перенапруг при вимиканні індуктивного

навантаження. Також застосовано резистори для обмеження струму в затворах MOSFET, що запобігає перегріву елементів при частій комутації.

По-третє, конструкція маніпулятора реалізована з використанням гнучких силіконових трубок у синтетичному обплетенні. У разі перенавантаження такі м'язи не спричиняють жорсткого впливу на об'єкти, що робить систему безпечною у взаємодії з людиною або крихкими предметами.

Окрім того, реалізовано зворотний зв'язок через FSR, що дозволяє фіксувати контакт із об'єктом і автоматично припинити подачу повітря при досягненні порогового тиску. Це унеможливорює надмірне стиснення й підвищує безпеку експлуатації.

У підсумку, система відповідає базовим вимогам до безпеки в умовах дослідницької лабораторії та може бути адаптована до використання в більш критичних середовищах за рахунок розширення захисних засобів і фізичних бар'єрів.

2.8 Етапність реалізації проєкту та подальші дії

Розробка гібридного роботизованого маніпулятора здійснювалася в умовах обмежених ресурсів, стиснених термінів і необхідності забезпечення сумісності з суміжними дипломними проєктами. Тому впровадження було поділено на послідовні етапи з чітким розмежуванням завдань і пріоритетів.

На першому етапі було зосереджено зусилля на створенні фізичного прототипу одного керованого пальця з пневматичним приводом, соленоїдним клапаном та сенсором зворотного зв'язку FSR. Саме цей канал слугував базовою одиницею для перевірки працездатності ключових апаратних рішень і розробки програмної логіки на базі ESP32. Здійснено тестування циклів «захоплення – відпускання» з урахуванням зворотного зв'язку, що підтвердило ефективність архітектури.

У рамках другого етапу заплановано масштабування системи до п'яти незалежних пневматичних каналів для реалізації повноцінного захоплення, а

також впровадження сервоприводів у компоненти «лікоть» та «плече». Удосконалення також передбачає стабілізацію живлення, розведення окремих плат керування та впровадження простого користувачького інтерфейсу для керування жестами маніпулятора.

Оскільки керування на основі штучного інтелекту реалізується в межах суміжної дипломної роботи, усі апаратні та логічні елементи даної системи вже підготовлені до інтеграції в спільне середовище. Це передбачає обмін командами через UART, а також можливість отримання сигналів з FSR у форматі, придатному для аналізу з боку AI-модулів.

Таким чином, у результаті етапу проектування сформовано технічну структуру маніпулятора, яка поєднує пневматичні та електромеханічні виконавчі елементи під керуванням мікроконтролера ESP32. Архітектура системи забезпечує незалежне керування кожним пальцем, підтримку зворотного зв'язку, а також готовність до інтеграції із зовнішньою AI-системою через інтерфейс команд. Обрані компоненти й логіка керування відповідають поставленим вимогам і можуть бути реалізовані у лабораторних умовах з обмеженим бюджетом і часом.

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ

На цьому етапі було здійснено практичну реалізацію роботизованого маніпулятора відповідно до розробленої архітектури. Реалізація охоплює виготовлення фізичної частини прототипу, монтаж пневматичних та електронних компонентів, створення прошивки для мікроконтролера ESP32 (рисунок 3.1) та перевірку працездатності системи. У процесі виконання враховано обмеження за часом, бюджетом і доступністю матеріалів, що вплинуло на вибір конкретних технічних рішень. Особливу увагу приділено забезпеченню стабільної роботи окремих виконавчих вузлів, їх сумісності з логікою керування та подальшій інтеграції з модулями високого рівня, які реалізують інтелектуальні алгоритми.

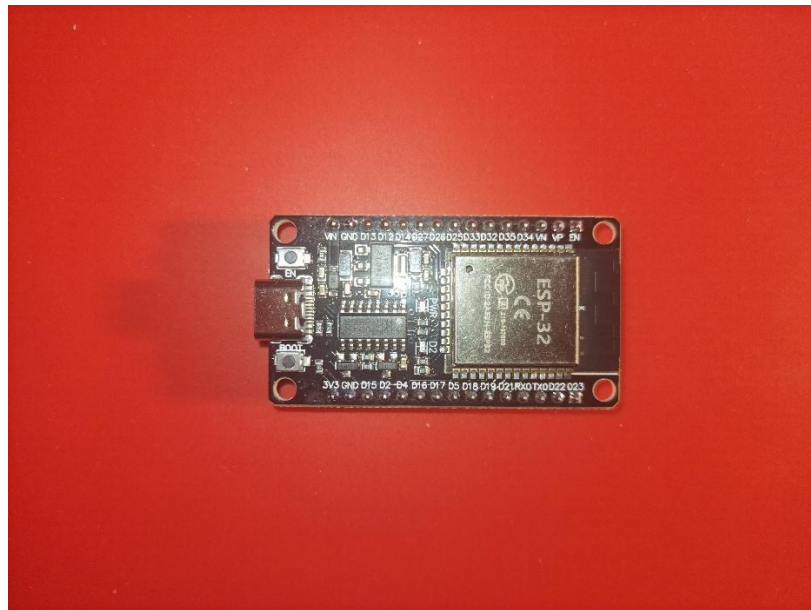


Рисунок 3.1 – Мікроконтролер ESP32

3.1 Монтаж фізичної конструкції

Фізичну реалізацію маніпулятора розпочато зі створення прототипу одного пальця (рисунок 3.2) з використанням пневматичного м'яза на базі

силіконової трубки діаметром 4*6 мм, вставленої в синтетичне обплетення для підвищення міцності й обмеження розширення.

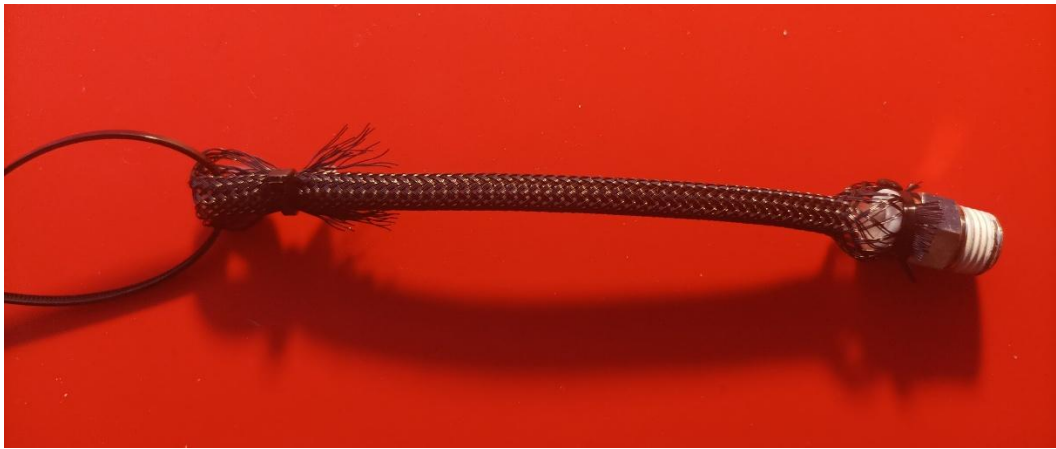


Рисунок 3.2 – Саморобний пневматичний м'яз

Один кінець трубки з'єднано з фітингом, підключеним до соленоїдного клапана CHUKA 3V210-08-NC типу 3/2 (рисунок 3.3), призначеного для комутації потоку повітря. Інший кінець герметично заглушено для формування закритої камери.

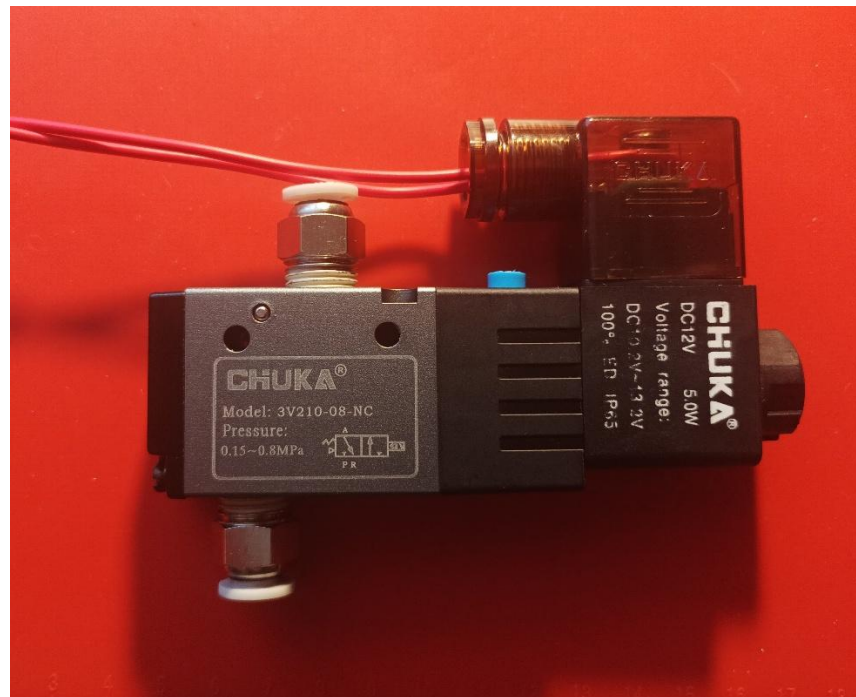


Рисунок 3.3 – Соленоїдний клапан CHUKA 3V210-08-NC

Клапан закріплено на спрощеній панелі монтажу й підключено до джерела живлення 12 В постійного струму через n-канальний MOSFET IRFZ44N (рисунок 3.4), що дозволяє комутувати навантаження під керуванням ESP32. Для захисту від імпульсних перенапруг у схемі передбачено діод типу M7, увімкнений паралельно до обмотки клапана у зворотній полярності.



Рисунок 3.4 – MOSFET-транзистор IRFZ44N

Сенсор сили натиску (FSR) (рисунок 3.5) змонтовано на внутрішній поверхні пальця й під'єднано до аналогового входу ESP32. Це дозволяє зчитувати зміну тиску під час стиснення об'єкта та використовувати ці дані для зворотного зв'язку. Проведено початкове калібрування порогового значення напруги, яке інтерпретується як контакт із об'єктом.

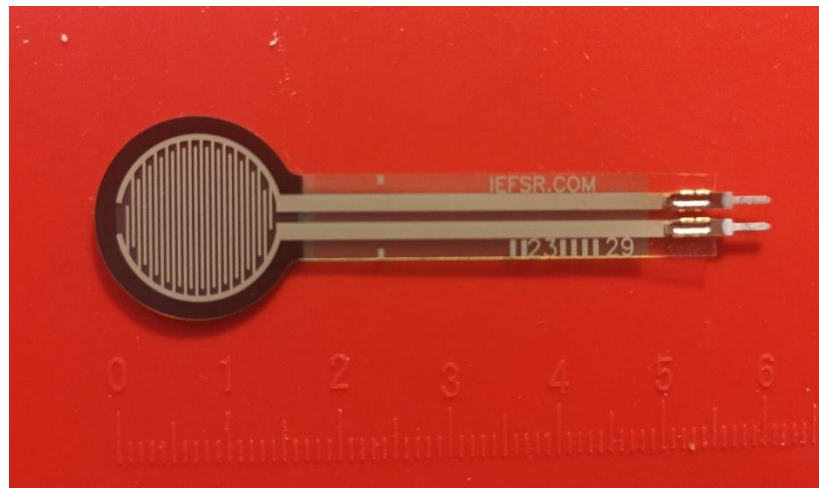


Рисунок 3.5 – Сенсор сили натиску типу FSR (Force Sensitive Resistor)

Для побудови носійної конструкції застосовано понтографічну стійку для мікрофона, яка дозволяє змонтувати робочу частину маніпулятора у просторі та регулювати її положення (рисунок 3.6). Використано ПВХ-трубки для створення опорних елементів, а також одножильний дріт перерізом 0,35 мм для з'єднання електронних компонентів.

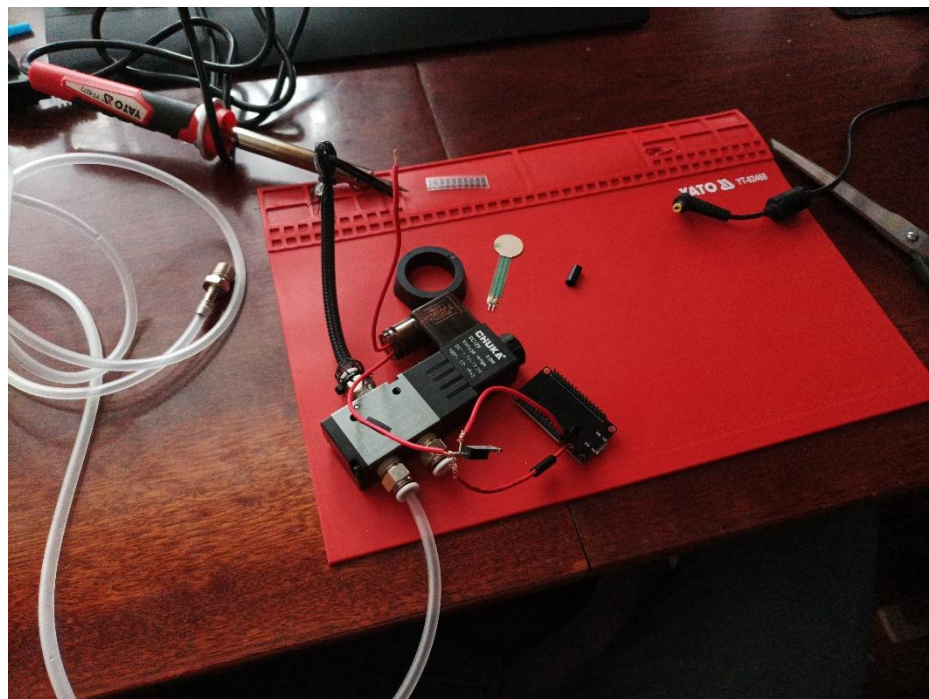


Рисунок 3.6 – Фото вузла збирання системи

Під час монтажу особливу увагу приділено надійності контактів, ізоляції силових ланцюгів та зручності доступу до вузлів для подальшого розширення – зокрема, підключення додаткових пальців, сенсорів і сервоприводів. На основі зібраної конструкції було проведено первинну перевірку функціональності клапана, м'яза й зворотного зв'язку з FSR, що підтвердило працездатність одного повного каналу керування.

3.2 Реалізація електричної схеми

Електрична схема реалізованої системи побудована з урахуванням вимог до розділення логічних і силових рівнів, забезпечення безпечного комутування виконавчих пристроїв, а також підтримки масштабування до п'яти каналів керування. Основу керуючої частини становить мікроконтролер ESP32, що здійснює цифрове керування виконавчими елементами та зчитування аналогових сигналів зі зворотного зв'язку.

Кожен пневматичний канал включає соленоїдний клапан, який потребує подачі 12 В для активації. Безпосереднє керування клапанами здійснюється через n-канальні MOSFET-транзистори IRFZ44N. Затвор кожного MOSFET підключено до окремого цифрового виходу ESP32 через резистор обмеження струму, що забезпечує надійне перемикання та знижує ризик шумових перешкод. Сток підключено до мінуса живлення клапана, а витік – до загальної шини 12 В. У зворотній полярності до обмотки кожного клапана паралельно підключено діод типу M7, який виконує функцію придушення зворотних імпульсів при вимиканні індуктивного навантаження.

Живлення системи реалізовано від побутового адаптера 12 В постійного струму. Логічна частина (ESP32 та сенсори) живиться через перехідник або стабілізатор напруги, що забезпечує 3,3 В на виводах ESP32. Такий поділ живлення дозволяє уникнути навантаження на логічну шину в момент одночасного вмикання декількох клапанів.

Для забезпечення зворотного зв'язку в системі використано сенсор сили натиску типу FSR [16], підключений до одного з ADC-портів ESP32 через подільник напруги. Опір FSR змінюється пропорційно до прикладеної сили, що дозволяє у програмному середовищі встановити поріг спрацьовування й реалізувати реакцію на контакт із об'єктом. При перевищенні порогу відповідний цифровий вихід деактивується, і подача повітря припиняється.

Кожен з каналів протестовано окремо на відповідність очікуваній логіці перемикачів, поведінці клапанів і реакції FSR на тиск.

Передбачена можливість розширення схеми до п'яти каналів керування шляхом дублювання типових елементів: MOSFET, клапан, FSR, GPIO-порт ESP32. Загальна структура схеми залишатиметься незмінною, що забезпечує простоту масштабування.

3.3 Програмна реалізація та налаштування ESP32

Програмне забезпечення для ESP32 реалізовано мовою програмування C++ у середовищі Arduino IDE. Структура прошивки побудована за принципом поділу на функціональні блоки: ініціалізація, обробка команд, керування клапанами, зчитування зворотного зв'язку та оновлення станів.

Під час ініціалізації визначаються всі необхідні порти: цифрові виходи для керування MOSFET (по одному на кожен клапан), аналогові входи для зчитування значень з FSR-сенсора, а також конфігурується UART-порт для прийому команд з зовнішнього пристрою. Для кожного клапана створено окрему змінну стану, яка зберігає поточний режим роботи – активний чи пасивний.

Основна логіка реалізована у вигляді нескінченного циклу [17], в межах якого контролер перевіряє наявність вхідних даних через UART. Якщо виявлено команду, вона розбирається як словник значень (наприклад, у форматі JSON або простий CSV), після чого для кожного пальця встановлюється відповідний режим. Команда на «захоплення» активує клапан, і паралельно запускається перевірка сигналу з FSR. Якщо сигнал перевищує встановлений поріг, клапан

вимикається автоматично. Команда «відпустити» миттєво відкриває канал скидання тиску.

Порогове значення для FSR встановлюється експериментально та зберігається як константа в коді. Його можна відкоригувати в ході калібрування для кожного пальця окремо у випадку масштабування системи. Принцип зворотного зв'язку реалізовано без складної обробки – лише через порівняння аналогового сигналу з фіксованим значенням.

Програма передбачає обробку некоректних або неповних команд [18]: у разі виявлення помилки команда ігнорується, а система зберігає попередній стан. Для наочності роботи та налагодження передбачено виведення поточних подій у серійний монітор, що дозволяє контролювати активність кожного каналу, рівень сигналу з FSR та реакцію системи.

У перспективі структура коду дозволяє реалізацію розширених режимів, зокрема таймерне згинання, адаптивне дозування повітря або логіку «запам'ятовування» комбінацій захоплення. Базова прошивка забезпечує стабільну й передбачувану роботу системи в рамках поточної архітектури, а також сумісність з алгоритмами керування на Raspberry Pi.

3.4 Тестування працездатності та налагодження

Після завершення монтажу й прошивки системи було проведено комплексне тестування працездатності маніпулятора в режимі одного активного пневматичного каналу. Метою випробувань стало підтвердження правильності роботи електричної частини, логіки керування, реакції зворотного зв'язку, а також стабільності взаємодії між ESP32 та виконавчими пристроями.

У початковому тесті перевірено активацію клапана при подачі цифрового сигналу з ESP32. Візуально фіксувалось наповнення пневматичного м'яза повітрям, що призводило до його скорочення та вигинання пальця. Вимірювання виконувались у статичних умовах із контрольованою подачею повітря від компресора. Після завершення подачі сигналу відбувалось повернення м'яза до

вихідного положення, що підтвердило правильну роботу клапана та герметичність конструкції.

Окрему увагу приділено тестуванню сенсора сили натиску. При натисканні на палець з FSR фіксувалося зростання аналогового сигналу на вході ESP32. У прошивці було встановлено порогове значення, при перевищенні якого контролер автоматично вимикав клапан. Це дозволило реалізувати базовий зворотний зв'язок: м'яз стискався до досягнення контакту з об'єктом і потім фіксував положення без надлишкового тиску.

Додатково перевірено стабільність UART-зв'язку між комп'ютером і ESP32. Під час тестування відправлялися команди у форматі керування окремими пальцями (умовно – одним активним каналом), що дозволяло відслідковувати зміну станів у режимі реального часу. Система стабільно реагувала на команди, забезпечуючи очікувану логіку вмикання і вимикання клапана.

У ході налагодження виявлено незначні сплески напруги під час одночасної активації клапана і зчитування аналогового сигналу [19], що вирішено за рахунок додаткових фільтрувальних ємностей і коригування затримок у коді. Також перевірено правильність роботи діодів захисту, що успішно запобігали перенапругам під час вимикання індуктивного навантаження.

Результати тестування свідчать про правильність побудови схеми, працездатність основної логіки керування та ефективність використання сенсора зворотного зв'язку. Також було успішно забезпечено повну технічну готовність до імплементації інтелектуального керування з використанням зовнішньої AI-системи [20]. Усі виявлені відхилення були усунуті в процесі налагодження, і система в поточному вигляді придатна до масштабування на п'ять незалежних каналів.

3.5 Взаємодія з AI-системою: архітектурні основи

У реалізованій системі передбачено повноцінну взаємодію між мікроконтролером ESP32 та високорівневою AI-підсистемою, що функціонує на базі Raspberry Pi. Ця підсистема виконує роль аналітичного модуля – здійснює розпізнавання об'єктів або жестів користувача через камеру в режимі реального часу та формує керувальні команди для ESP32 [21].

Зокрема, реалізовано комп'ютерний зір із використанням попередньо натренованої нейромережевої моделі, що дозволяє ідентифікувати типові жести руки (наприклад, стиснення в кулак, розкрити долоню, вказівний жест) або присутність конкретного об'єкта. Відповідно до розпізнаного образу формуються текстові команди у вигляді простих інструкцій (наприклад, «захопити», «відпустити», «помахати»), які передаються до ESP32 через UART-інтерфейс.

На стороні ESP32 реалізовано обробку цих команд шляхом активації відповідних виконавчих механізмів – пневматичних м'язів або сервоприводів. Таким чином досягається інтерактивна поведінка маніпулятора на основі візуального аналізу середовища або дій користувача [22].

Подібна архітектура забезпечує чітке розмежування функціональних рівнів: інтелектуальна обробка та прийняття рішень виконується на Raspberry Pi, а фізичне виконання команд – на ESP32. Це відповідає сучасним підходам до побудови гібридних роботизованих систем і дозволяє гнучко масштабувати функціональність без зміни базової структури керування [23].

Система також передбачає можливість розширення: у разі підключення нових сенсорів або впровадження додаткових алгоритмів керування, необхідна логіка може бути додана до AI-підсистеми без потреби в апаратних змінах.

Таким чином, реалізована взаємодія з AI-системою забезпечує інтелектуальне керування маніпулятором у режимі реального часу, підвищує рівень автономності та дозволяє реалізовувати взаємодію з користувачем через

природні канали, що є важливим кроком до створення роботизованих систем нового покоління.

3.6 Технічні складнощі, виявлені під час налаштування

Під час збирання та тестування першого пневматичного каналу було виявлено кілька критичних моментів, які потребували додаткових рішень на етапі реалізації. Зокрема, початкове підключення MOSFET без обмежувального резистора в затворі призводило до імпульсних завад і некоректного перемикання транзистора. Це проявлялось у вигляді затримок або переривчастого відкриття клапана при комутації. Усунення проблеми здійснено шляхом додавання резистора на 220 Ом у ланцюг затвора, що стабілізувало роботу при частій комутації.

Ще одним суттєвим викликом стало забезпечення надійного контакту FSR-сенсора із внутрішньою частиною пальця. У перших ітераціях монтажу сенсор розміщувався недостатньо щільно, що призводило до хибних спрацьовувань або нестабільного зчитування сигналу. Було вирішено помістити сенсор у м'який гумовий прошарок, який передавав тиск рівномірно та запобігав вібраційному шуму. Також застосовано програмне усереднення сигналу для згладжування швидких коливань напруги.

Проблема герметизації м'яза на заглушеному кінці трубки також викликала труднощі – звичайна механічна обтискна заглушка пропускала повітря при підвищеному тиску. Було знайдено компромісне рішення: використано термоусадку в поєднанні з клеєм на основі силікону, що забезпечило герметичність при робочому тиску до 1 бару.

Крім того, виявлено нестабільність живлення при запуску кількох вузлів одночасно. Особливо це проявлялось у випадку спільного запуску клапана та сервоприводу: коротке просідання напруги впливало на роботу ESP32, спричиняючи перезавантаження. Для вирішення проблеми було введено тимчасове

програмне обмеження на одночасну активацію каналів, а також додано ємності фільтрації на 470 мкФ до силової шини.

На етапі налаштування програмної логіки важливим було врахування часової затримки між активацією клапана і реакцією м'яза. Вона становила в середньому 80-150 мс, що змусило змінити підхід до читання зворотного сигналу. Замість миттєвої перевірки зчитування FSR, було реалізовано затримку перед зчитуванням, що дозволило уникнути хибних спрацьовувань одразу після відкриття клапана.

У результаті вирішення технічних труднощів вдалося досягти стабільної роботи одного повного каналу – від прийому команди до фізичного виконання руху із зворотним контролем. Отриманий досвід формує основу для масштабування системи до багатоканального режиму.

3.7 Варіанти розвитку системи та можливості модернізації

Після реалізації базового функціонального каналу та перевірки його працездатності виникла низка ідей щодо розвитку системи у напрямку підвищення її функціональності, надійності та гнучкості. Один із ключових напрямів модернізації полягає в переході від фіксованої логіки керування до сценаріїв із динамічним налаштуванням поведінки маніпулятора, що передбачає розширення інтерфейсу команд до підтримки комплексних шаблонів захоплення.

Також перспективним виглядає додавання енкодерів або потенціометричних датчиків у вузли з сервоприводами для реалізації позиційного контролю суглобів. Наявна реалізація передбачає лише пряме керування через PWM, проте розширення апаратної бази дозволить впровадити замкнені петлі керування з контролем положення та швидкості.

З технічної точки зору, модернізація також може охопити перехід до цифрових клапанів із підтримкою пропорційного регулювання потоку. Це дозволить плавно змінювати ступінь наповнення пневматичного м'яза і,

відповідно, силу або амплітуду згинання. Для реалізації такого сценарію доведеться вдосконалити як апаратну, так і програмну частину системи.

Іншим важливим напрямом розвитку є створення графічного інтерфейсу користувача, який дозволить керувати маніпулятором у режимі реального часу, змінювати параметри, переглядати дані з сенсорів і тестувати сценарії керування без перепрошивки. Це може бути реалізовано як вебінтерфейс на базі ESP32 з Wi-Fi-модулем або як десктоп-додаток на Python із передачею команд через послідовний порт.

Крім того, система має потенціал для інтеграції з технологіями розпізнавання образів. Завдяки вбудованим камерам та попередньо навченим моделям можлива ідентифікація об'єктів, формування сценаріїв захоплення відповідно до форми чи положення предмета. Таке керування може бути реалізовано на платформі Raspberry Pi із використанням TensorFlow Lite.

На більш прикладному рівні подальший розвиток проекту може полягати у створенні повністю автономного протезу кисті, навчального набору для вивчення робототехніки або системи допомоги людям з порушеннями моторики. Завдяки низькій вартості компонентів, система може стати основою для open-source проектів або стартап-розробок у сфері м'якої робототехніки.

У результаті реалізації сформовано працездатний прототип одного каналу маніпулятора, що включає пневматичний м'яз, керований клапаном через мікроконтролер ESP32, із підтримкою зворотного зв'язку та прийому команд із зовнішнього джерела. Вибрані компоненти, електрична схема та програмна логіка забезпечують стабільну роботу системи й дозволяють масштабувати її до повноцінного керування п'ятьма пальцями з інтеграцією в інтелектуальне середовище.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження варто зробити відповідні висновки:

У ході роботи спроектовано роботизовану систему керування антропоморфною конструкцією маніпулятора, в основі якої закладено поєднання пневматичних м'язів і сервоприводів. Архітектура побудована за модульним принципом, що дозволяє незалежне керування кожним пневматичним каналом та масштабування системи без зміни базової структури.

Здійснено вибір елементної бази з урахуванням бюджетних і часових обмежень. Для реалізації керування обрано мікроконтролер ESP32, який забезпечує достатній обсяг апаратних ресурсів для паралельного керування клапанами, зчитування аналогових сигналів із сенсорів та комунікації з високорівневими модулями на основі штучного інтелекту.

Розроблено та реалізовано програмну логіку для ESP32, що підтримує адресне керування пальцями через UART, обробку зворотного зв'язку з сенсора сили натиску (FSR) та виконання команд у реальному часі. Логіка роботи побудована за принципом керованих режимів, що забезпечує гнучкість у реалізації схоплення та відпускання з урахуванням зворотного сигналу.

Спроектовано та зібрано фізичну частину одного повноцінного каналу маніпулятора, до складу якого входить пневматичний м'яз, соленоїдний клапан, драйвер на MOSFET-транзисторі, сенсор FSR та логічні з'єднання з ESP32. Проведено монтаж на базі понтографічної стійки з використанням побутових і лабораторних компонентів.

Виконано початкове тестування працездатності: підтверджено правильність роботи одного каналу керування, реакцію системи на команди, стабільність зчитування даних з FSR та відповідність роботи логіки очікуваній поведінці. Реалізовану логіку перевірено в умовах лабораторної моделі із застосуванням реального джерела стисненого повітря.

Розроблена система повністю відповідає вимогам щодо підготовки до інтеграції з модулями штучного інтелекту. Завдяки підтримці UART-комунікації та адресного керування каналами, вона може бути використана як виконавча частина розумного маніпулятора в рамках суміжного проєкту, що реалізує AI-керування на Raspberry Pi.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kawamura, S., Sudani, M., Deng, M., Wakimoto, S. Структура штучного м'яза МакКіббена S. Kawamura, M. Sudani, M. Deng, S. Wakimoto. URL: <https://surl.li/vdhwhh> (дата звернення: 01.03.2025).
2. Li M. *Microrobotic Biomedical Systems*. URL: <https://surl.li/zlgfhf> (дата звернення: 01.03.2025).
3. Technical Documents | Espressif Systems. *Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT Solutions | Espressif Systems*. URL: <https://surl.li/zwnwnl> (дата звернення: 06.03.2025).
4. Bionic Handling Assistant | Festo USA. *Festo.com*. URL: <https://surl.li/iqwrfy> (дата звернення: 07.03.2025).
5. Festo. BionicSoftArm Festo. URL: <https://surl.li/ibubow> (дата звернення: 09.03.2025).
6. Data-driven Methods Applied to Soft Robot Modeling and Control: A Review. *arXiv.org*. URL: <https://surl.li/cjvlvo> (дата звернення: 14.03.2025).
7. IoT based Web controlled Robotic Arm using ESP32. *IoT Design Pro - IoT Projects, Articles & News*. URL: <https://surl.li/uwlwmc> (дата звернення: 16.03.2025).
8. The PneumaticBox control system for soft hand control - TU Berlin. *Technische Universität Berlin - TU Berlin*. URL: <https://surl.li/fmevjb> (дата звернення: 19.03.2025).
9. Hyperboloidal Pneumatic Artificial Muscle With Braided Straight Fibers. *IEEE Xplore*. URL: <https://surl.li/lkeams> (дата звернення: 24.03.2025).
10. A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots - PubMed. *PubMed*. URL: <https://surl.li/eipnfj> (дата звернення: 26.03.2025).
11. A Step-by-Step Guide on Building an IoT-Based Home Automation System with Google Assistant & Alexa Using ESP32 - IoT Hobbyist. *IoT Hobbyist*. URL: <https://surl.li/ikfgrz> (дата звернення: 28.03.2025).
12. Lady Ada. Force Sensitive Resistor (FSR). *Adafruit Learning System*. URL: <https://surl.li/klcavi> (дата звернення: 1.04.2025).

13. IoT P. Communication Between ESP32 and Raspberry Pi Using UART. Medium. URL: <https://surl.li/mjjixk> (дата звернення: 07.05.2025).
14. FSR 400. Interlink Electronics: Electronic Sensors, Custom Solutions, FSRs. URL: <https://surl.li/nioazf> (дата звернення: 2.04.2025).
15. Multimodal tactile sensing fused with vision for dexterous robotic housekeeping - Nature Communications. Nature. URL: <https://surli.cc/awbzhq> (дата звернення: 03.04.2025).
16. Staff L. E. ESP32 Basics - Analog-to-digital Converter (ADC). Last Minute Engineers. URL: <https://surl.li/pvhbgc> (дата звернення: 05.04.2025).
17. Language Reference loop(). docs.arduino.cc. URL: <https://surl.li/quysza> (дата звернення: 07.04.2025).
18. Solving UART Reception Lock Issues on STM32 Microcontrollers – devgem.io. devgem.io. URL: <https://surl.li/nieato> (дата звернення: 08.04.2025).
19. The Art of Electronics 3rd Edition. The Art of Electronics 3rd Edition. URL: <https://surl.lu/cjgewv> (дата звернення: 10.04.2025).
20. Hladun I. Integrating AI/ML in Embedded Systems: A Full Guide - Waverley. Waverley. URL: <https://surl.li/gdazyf> (дата звернення: 12.04.2025).
21. Angelidis G., Vampis L. Gesture-Controlled Robotic Arm for Small Assembly Lines. www.mdpi.com. URL: <https://surl.li/nqhaxe> (дата звернення: 14.04.2025).
22. Buckley I. Train AI Models with an ESP32 Camera and Edge Impulse. Electromaker.io - Unleash Your Creativity with DIY Electronics & Maker Projects. URL: <https://surl.lu/rmqidq> (дата звернення: 15.04.2025).
23. Instructables. AI Powered Robot Using ESP32 and Arduino. Instructables. URL: <https://surl.li/ednzfc> (дата звернення: 19.04.2025).