Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____Комп'ютерної інженерії та управління_____
(повна назва)

Кафедра ____Автоматизації проектування обчислювальної техніки_____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

_____перший (бакалаврський)_____
(рівень вищої освіти)
_____Система голосового управління на базі Arduino_____
(тема)

Виконав: студент IV курсу, групи КІУКІ-21-7

_____Гобод В.О._____
(прізвище, ініціали)

Спеціальність *123 _ Комп'ютерна інженерія*

Тип програми ____освітньо-професійна_____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма_____

_____*Комп'ютерна інженерія* _____
(повна назва освітньої прграми)

Керівник _____ Мірошник А.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Чумаченко С.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет_____Комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра_____Автоматизації проектування обчислювальної техніки_____

Рівень вищої освіти____перший (бакалаврський)_____

Спеціальність_____123_Комп'ютерна інженерія _____
(шифр і назва)

Тип програми _____Освітньо-професійна_____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____Комп'ютерна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові_____Гобод Валерію Олександровичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Система голосового управління на базі Arduino_____
_____
_____
затверджена наказом по університету від "21 "____05____2025 р. № _____403Ст_____
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____10.06.2025_____
3. Вихідні дані до роботи (проекту)_____
Технічне завдання на розробку системи голосового управління_____
Специфікації мови програмування C++_____
Специфікації мікроконтролера AVR ATmega328P_____
Інтегроване середовище розробки програмного забезпечення Arduino IDE___
_____
_____
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____
Управління голосом: теоретичні аспекти та аналіз існуючих рішень_____
Реалізація апаратної складової системи_____
Реалізація програмного забезпечення системи_____
Реалізація макетного зразка та результати дослідної експлуатації_____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) __Презентація (16 слайдів)_____
_____
_____

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

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

7. Дата видачі завдання 06.05.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи (проекту)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Видача теми проекту, узгодження і затвердження	06.05.2025 - 10.05.2025	
2	Аналіз проблемної галузі, постановка задачі, вибір інструментальних засобів	10.05.2025 - 17.05.2025	
3	Розробка моделі системи	17.05.2025 - 24.05.2025	
4	Розробка апаратної платформи системи	24.05.2025 - 31.05.2025	
5	Розробка програмного забезпечення системи	31.05.2025 - 05.06.2025	
6	Проведення випробування системи	05.06.2025 - 07.06.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	07.06.2025 - 10.06.2025	
8	Перевірка виконаного проекту керівником	10.06.2025 - 13.06.2025	
9	Захист проекту	13.06.2025 - 23.06.2025	

Студент _____ Гобод В.О.
(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____ старший викладач Мірошник А.М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи містить 56 сторінок, 17 рисунків, 3 таблиці, 4 додатки, 15 джерел за переліком посилань.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, РОЗПІЗНАВАННЯ ГОЛОСУ, ГОЛОСОВЕ УПРАВЛІННЯ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ARDUINO, C++.

Об'єктом розробки є мікроконтролерна система голосового управління, яка дозволяє виконувати керування електронними пристроями за допомогою голосових команд.

Предметом розробки є апаратно-програмний комплекс, що включає мікроконтролер, модуль розпізнавання голосу та периферійні пристрої, необхідні для реалізації функцій голосового управління.

Метою розробки є створення мікроконтролерної системи голосового управління, яка забезпечує ефективне розпізнавання голосових команд, стабільну роботу апаратної частини та інтерактивну взаємодію з користувачем. Система повинна забезпечувати точне виконання команд, можливість адаптації до різних користувачів та гнучке налаштування функцій.

У першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто теоретичні засади розпізнавання голосу та голосового управління, а також проаналізовано існуючі технічні рішення з цієї сфери.

У другому розділі спроектовано апаратну частину системи і наведено аргументований вибір компонентів для її реалізації.

У третьому розділі наведено алгоритм та реалізацію програмного забезпечення системи.

В останньому розділі проведено тестування макетного зразка системи та наведено результати, які показали працездатність проектованої системи.

ABSTRACT

Bachelor’s thesis contains 56 pages, 17 figures, 3 tables, 4 appendices, 15 sources according to the list of references.

AUTOMATED SYSTEM, VOICE RECOGNITION, VOICE CONTROL, NEURAL NETWORKS, MICROCONTROLLER, ARDUINO, C++.

The object of development is a microcontroller-based voice control system that enables control of electronic devices through voice commands.

The subject of development is a hardware-software complex comprising a microcontroller, voice recognition module, and peripheral devices necessary for implementing voice control functions.

The purpose of development is to create a microcontroller-based voice control system that provides efficient voice command recognition, stable hardware operation, and interactive user engagement. The system must ensure accurate command execution, adaptability to different users, and flexible function configuration.

The first chapter of the qualification work examines the theoretical foundations of voice recognition and voice control, as well as analyzes existing technical solutions in this domain.

The second chapter presents the hardware system design and provides a reasoned selection of components for its implementation.

The third chapter outlines the algorithm and implementation of the system software.

The final chapter covers the testing of the system prototype and presents results that demonstrated the functionality of the designed system.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів .. 8

Вступ 9

1 Системи голосового управління 11

1.1 Розпізнавання голосу та голосове управління 11

1.2 Мікроконтролерні автоматизовані системи 17

1.3 Вимоги до системи голосового управління 18

1.4 Технічне завдання на проектування 25

2 Розробка апаратної складової системи голосового управління 26

2.1 Компоненти системи голосового управління 26

2.2 Реалізація апаратної частини системи голосового управління 36

3 Розробка програмного забезпечення 42

3.1 Вибір мови програмування та інструментів для розробки 42

3.2 Реалізація програмного забезпечення для контролера плати Arduino 44

4 Дослідна експлуатація макетного зразка 49

4.1 Опис макетного зразка та методики випробувань 49

4.2 Результати моделювання роботи тестового зразка 51

Висновки 54

Перелік джерел посилання 55

Додаток А 57

Додаток Б 65

Додаток В 66

Додаток Г…….67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ADC – Analog-to-Digital Converter, аналого-цифровий перетворювач.

DSP – Digital Signal Processing, цифрова обробка сигналів.

FFT – Fast Fourier Transform, швидке перетворення Фур'є.

GPIO – General-Purpose Input/Output, універсальні входи/виходи.

PWM – Pulse Width Modulation, широтно-імпульсна модуляція.

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, універсальний асинхронний приймач-передавач.

I2C – Inter-Integrated Circuit, інтерфейс для зв'язку між компонентами.

SPI – Serial Peripheral Interface, послідовний периферійний інтерфейс.

ML – Machine Learning, машинне навчання.

TTS – Text-to-Speech, перетворення тексту в мову.

ASR – Automatic Speech Recognition, автоматичне розпізнавання мовлення.

RTOS – Real-Time Operating System, операційна система реального часу.

dB – Decibel, децибел, одиниця вимірювання рівня звуку.

Hz – Hertz, герц, одиниця частоти.

Мікроконтролер – компактний комп'ютер на одній інтегральній схемі, призначений для управління електронними пристроями.

Голосове управління – метод управління пристроями через розпізнавання голосових команд.

Мікрофон – пристрій для перетворення звукових хвиль в електричний сигнал.

Динамік – пристрій для відтворення звуку з електричного сигналу.

ВСТУП

Голосове управління поступово стає невід'ємною частиною сучасного життя, дозволяючи зручно та інтуїтивно взаємодіяти з різними пристроями і системами. Це технологічне рішення вже активно використовується у побутових системах, «розумних домах», на виробництві, а також в медичних і освітніх установах. Поява доступних мікроконтролерних платформ, таких як Arduino, ESP32 та Raspberry Pi, значно спростила розробку інтерактивних систем голосового управління, дозволяючи реалізувати інноваційні проекти навіть при обмеженому бюджеті.

Актуальність теми даної роботи обумовлена високим попитом на прості та універсальні способи взаємодії користувача з технікою. Голосове управління дозволяє забезпечити більш зручний інтерфейс для людей різних вікових груп, зокрема для літніх осіб та людей з обмеженими фізичними можливостями, для яких традиційні методи управління можуть бути незручними або недоступними. Використання мікроконтролерів для голосового управління має потенціал стати основою для створення нових функціональних рішень у сфері автоматизації та електроніки, здатних зробити техніку більш доступною та інклюзивною.

Метою роботи є розробка мікроконтролерної системи голосового управління, яка дозволяє керувати електронними пристроями, такими як освітлення, системи вентиляції, аудіосистеми тощо. Задля досягнення цієї мети необхідно вивчити можливості розпізнавання та обробки голосових команд на базі мікроконтролерних платформ, а також підібрати відповідні компоненти для реалізації надійної та стабільної системи.

У ході виконання роботи передбачено проведення аналізу існуючих рішень у сфері голосового управління, а також розробку алгоритмів для розпізнавання команд та керування мікроконтролером. Завдяки цьому система

стане гнучкою та легкою у використанні, оскільки дозволятиме користувачам управляти приладами за допомогою природної мови. Результати цієї роботи матимуть широке практичне застосування як у домашньому побуті, так і в умовах промисловості, адже мікроконтролерна платформа може бути легко адаптована під різноманітні потреби та завдання.

Таким чином, розробка мікроконтролерної системи голосового управління сприятиме розширенню функціональних можливостей техніки та підвищенню її зручності для користувачів.

1 СИСТЕМИ ГОЛОСОВОГО УПРАВЛІННЯ

1.1 Розпізнавання голосу та голосове управління

Розпізнавання голосу — це технологія, яка дозволяє системам інтерпретувати та обробляти людське мовлення, перетворюючи звуковий сигнал у текст чи команди, зрозумілі комп’ютеру [1]. Цей процес базується на аналізі та зіставленні акустичних характеристик звукової хвилі з певними еталонами. Як правило, розпізнавання голосу складається з кількох основних етапів: попередньої обробки звуку, виділення характеристик, зіставлення цих характеристик з шаблонами і, власне, генерації текстового результату або виконання дій.

Основні методи, що застосовуються для розпізнавання голосу, включають акустичні та мовні моделі, які використовують лінгвістичні та акустичні дані для забезпечення точності розпізнавання. Наприклад, акустична модель аналізує структуру звуків та відображає їх в параметри, які комп'ютер може розпізнати, тоді як мовна модель допомагає комп’ютеру передбачити, які слова найімовірніше підходять одне до одного. Існують також мовно-лінгвістичні підходи, де система використовує статистичні моделі для аналізу найбільш вірогідних комбінацій слів.

Процес обробки голосового сигналу складається з кількох послідовних етапів, кожен з яких спрямований на перетворення акустичної хвилі в зрозумілу для комп’ютера форму та кінцеве розпізнавання слів. На початковому етапі, коли звуковий сигнал надходить до системи, відбувається попередня обробка звуку. Це включає нормалізацію сигналу для зниження шуму та покращення якості аудіо, видалення фонових шумів, обробку частотних характеристик сигналу та підвищення його якості для подальшого аналізу.

Другий етап стосується перетворення аналогового сигналу на цифровий. Аудіосигнал, який отримується від мікрофона або іншого пристрою, є аналоговим, тому його потрібно дискретизувати та квантувати, тобто перетворити у цифрову форму. Це робиться шляхом семплювання – розділення сигналу на малі інтервали часу та присвоєння кожному з них цифрового значення.

На етапі виділення характеристик із сигналу формуються унікальні ознаки або характеристики, які допомагають системі розпізнавати мовлення. Один із методів для цього – спектральний аналіз, який дозволяє розділити звуковий сигнал на складові частоти. За допомогою технік, таких як перетворення Фур'є або мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (MFCC), формується набір ознак, який передається до наступного етапу.

На етапі розпізнавання та класифікації характеристик використовується модель, що дозволяє зіставити отримані ознаки зі словником можливих слів або команд. Завдяки моделям машинного навчання, наприклад, нейронним мережам, відбувається аналіз та порівняння отриманих характеристик із базою даних відомих зразків. Модель обирає найбільш ймовірне слово або фразу на основі зіставлення з еталонами в базі.

Завершальний етап – це перетворення результатів розпізнавання у зрозумілу для системи команду або текст. Тут враховується контекст, граматика та особливості мови, що дозволяє системі правильно інтерпретувати та реагувати на запит користувача.

Голосове управління дозволяє користувачам взаємодіяти з комп'ютерами або пристроями через голосові команди, що значно спрощує виконання багатьох повсякденних завдань. Воно широко використовується у багатьох сферах, таких як побутові прилади, автомобілі та мобільні пристрої. Програмні рішення голосового управління покладаються на алгоритми машинного навчання, які дозволяють системам не лише розпізнавати слова, але й правильно інтерпретувати намір користувача.

Алгоритми розпізнавання голосу забезпечують обробку та інтерпретацію звукових сигналів, перетворюючи їх у текст чи команди, зрозумілі комп'ютеру. Розпізнавання починається з алгоритмів попередньої обробки, які очищують сигнал від шуму, а потім передають його до наступних етапів.

Однією з найважливіших складових розпізнавання є алгоритми обробки ознак. Серед найпоширеніших підходів – методи, що застосовують мел-частотні кепстральні коефіцієнти (MFCC). Цей підхід імітує сприйняття людиною частот голосу, що дозволяє більш точно виділити особливості звуку, відомі як «властивості голосового сигналу». Алгоритм MFCC включає перетворення Фур'є для розподілу сигналу на частоти і подальше обчислення коефіцієнтів, які представляють звукові характеристики.

На етапі розпізнавання та класифікації використовуються такі алгоритми, як приховані марковські моделі (HMM) і нейронні мережі [2]. Приховані марковські моделі (рис.1.1) дозволяють розглядати послідовність мовних одиниць як рядок можливих станів, що розвиваються з імовірностями переходу між ними, як це відбувається у природному мовленні. Завдяки цьому моделі HMM підходять для розпізнавання мовних команд і фраз, навіть якщо сигнал містить шуми чи перекривання звуків.

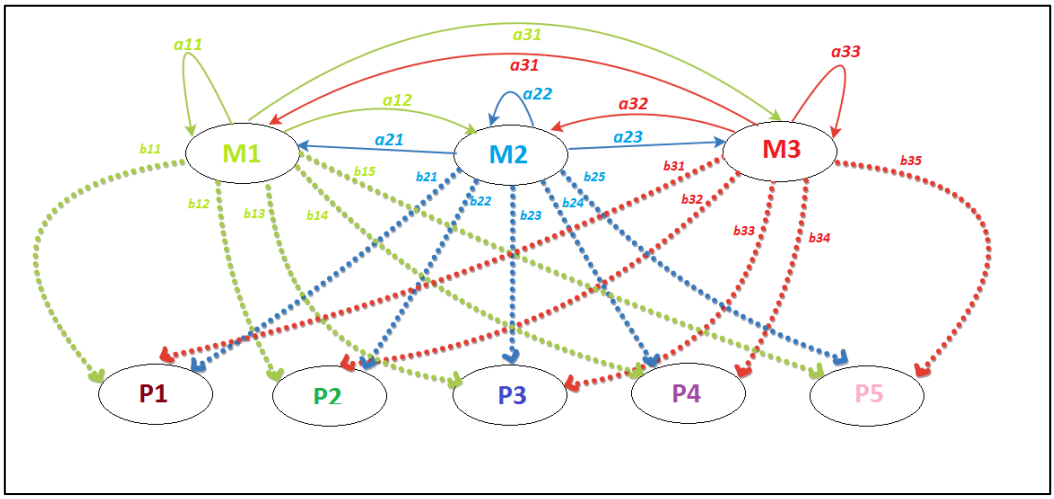

Рисунок 1.1 – Приклад прихованої марковської моделі

З розвитком штучного інтелекту нейронні мережі та глибоке навчання стали ключовими технологіями розпізнавання голосу. Рекурентні нейронні мережі (RNN) та довготривала пам’ять (LSTM) допомагають краще розуміти послідовні залежності в мовленні, що дозволяє точніше інтерпретувати слова і фрази [3]. Завдяки комбінації CNN і RNN системи розпізнавання здатні ефективно обробляти як короткі команди, так і тривалі речення. Структуру рекурентної нейронної мережі наведено на рисунку 1.2.

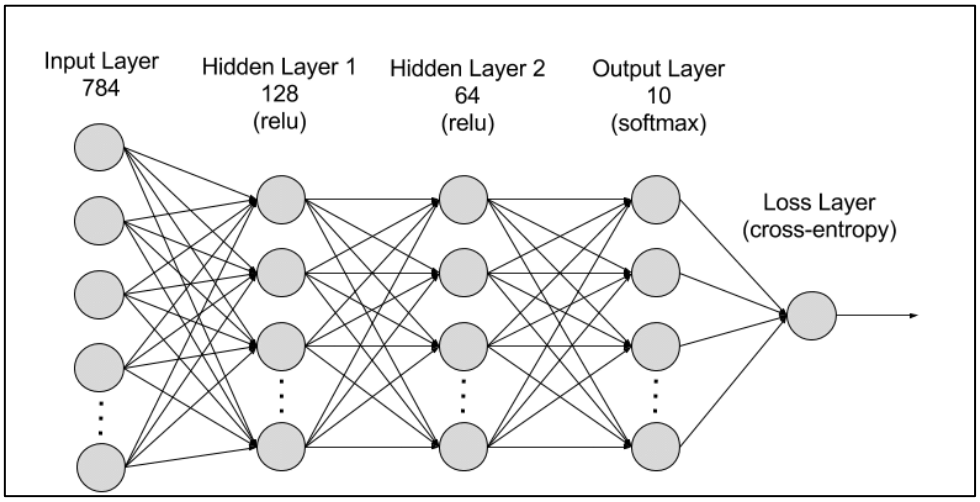

Рисунок 1.2 – Структура рекурентної нейронної мережі

Іншим підходом є алгоритми, що використовують трансформери, наприклад, моделі на основі BERT і GPT. Трансформери здатні одночасно обробляти довготривалі залежності та паралельно аналізувати послідовності слів, що значно підвищує точність розпізнавання та дозволяє працювати з великою кількістю даних.

Результати роботи алгоритмів розпізнавання використовуються для побудови мовних моделей, які враховують частотність слів, граматичні структури та контекст, що додатково підвищує точність системи розпізнавання. Такий підхід дозволяє створювати адаптивні моделі, здатні навчатися з часом, що особливо важливо для персоналізованих систем розпізнавання голосу.

Ці технології сприяють розвитку персоналізованих систем голосового управління, які здатні навчатися і враховувати акценти, індивідуальні особливості голосу і навіть емоційний стан користувача.

Голосове управління надає значні переваги різним категоріям користувачів, особливо тим, хто має обмежені фізичні можливості, труднощі з зором або моторикою, а також людям похилого віку. Завдяки голосовим командам вони отримують можливість повністю контролювати техніку, не використовуючи фізичні кнопки або сенсорні екрани, що значно підвищує доступність технологій.

Для осіб з обмеженими можливостями, які мають труднощі з моторикою або порушеннями рук, голосове управління є зручним способом взаємодії з електронними пристроями. Наприклад, голосові команди дозволяють їм виконувати такі дії, як вмикання освітлення, налаштування температури, активація побутової техніки або дзвінки, що сприяє підвищенню їхньої автономності та самостійності. Це також важливо в екстрених ситуаціях, коли потрібно швидко викликати допомогу чи включити сигнал тривоги.

Для людей із порушеннями зору голосове управління забезпечує простий і ефективний спосіб отримувати інформацію та взаємодіяти з електронними системами. Наприклад, голосові асистенти можуть читати тексти вголос, допомагати в навігації або надавати інформацію про погоду та новини, що значно спрощує виконання повсякденних завдань. Голосові інтерфейси дозволяють обходити необхідність використання візуальних елементів, що робить систему інклюзивною.

Переваги голосового управління також є значущими для людей похилого віку, які часто мають обмежену мобільність або труднощі в освоєнні нових технологій. Інтуїтивне голосове управління надає їм доступ до функцій розумного дому, полегшує взаємодію з медичними пристроями, нагадує про прийом ліків, а також спрощує зв'язок із рідними. Це сприяє покращенню якості життя, забезпечуючи можливість старшим людям довше залишатися незалежними.

Крім того, голосові команди можуть стати в пригоді й для інших користувачів, наприклад, у професіях, що потребують одночасного виконання кількох завдань. Голосове управління дає змогу виконувати команди без фізичного контакту з пристроєм, що зручно, наприклад, для лікарів, інженерів та інших фахівців, яким необхідно залишати руки вільними для роботи.

Сучасні голосові технології активно розвиваються і знаходять застосування як у повсякденному житті, так і в промислових умовах. У побутовій сфері голосові асистенти, такі як Amazon Alexa, Google Assistant та Apple Siri, широко використовуються для автоматизації повсякденних завдань. Користувачі за допомогою голосових команд можуть управляти освітленням, термостатами, побутовою технікою, а також налаштовувати нагадування та отримувати інформацію. Ці технології дозволяють не тільки спростити взаємодію з пристроями, а й забезпечити їхню інтеграцію з розумними будинками, що підвищує комфорт і безпеку для користувачів. Серед цікавих тенденцій є поява голосових інтерфейсів з адаптивними можливостями, які навчаються перевагам користувача і можуть надавати персоналізовані послуги.

У промисловій сфері голосові технології також набувають значної популярності, особливо у виробництві, логістиці та охороні здоров’я. Наприклад, у логістиці системи голосового управління дозволяють працівникам виконувати замовлення швидше, оскільки руки залишаються вільними для виконання інших завдань. У виробничих умовах голосові команди використовуються для контролю обладнання та забезпечення безперервного моніторингу процесів, що підвищує продуктивність і знижує ризик людських помилок. У медичній сфері голосові технології застосовуються для полегшення взаємодії медичних працівників з інформаційними системами, що дозволяє зосередитися на догляді за пацієнтами, а не на документації.

Одним з новітніх напрямків є використання голосових технологій у безконтактному управлінні та у сфері безпеки. У поєднанні зі штучним

інтелектом вони допомагають у розпізнаванні аномалій або небезпечних ситуацій на виробництві, а також можуть використовуватися для ідентифікації осіб на основі голосу, що підвищує рівень безпеки.

1.2 Мікроконтролерні автоматизовані системи

Мікроконтролерні автоматизовані системи — це системи, які використовують мікроконтролери (рис.1.3) як основні обчислювальні модулі для управління різними процесами та пристроями в реальному часі [4]. Мікроконтролери, оснащені вбудованими пам'яттю та периферійними інтерфейсами, є основою таких систем, надаючи змогу інтегрувати обробку даних, управління сенсорами, та виконання команд. Відмінною особливістю мікроконтролерних систем є їх здатність до високої автоматизації завдяки вбудованим програмам, які працюють незалежно від зовнішнього втручання.

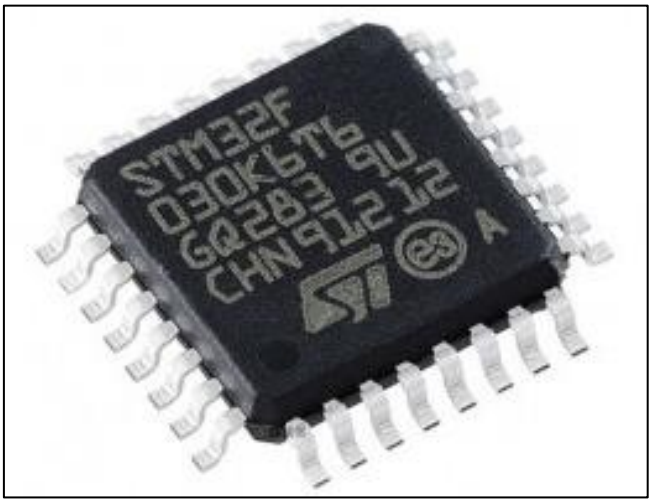

Рисунок 1.3 – Мікроконтролер

Ключова особливість мікроконтролерних автоматизованих систем полягає в їх високій енергоефективності, оскільки більшість мікроконтролерів споживають мінімальну кількість енергії. Це дозволяє використовувати їх у

пристроях з обмеженими джерелами живлення, таких як портативні гаджети та автономні сенсорні вузли. Крім того, вони забезпечують оперативне виконання команд, що важливо в системах, де критичною є затримка, наприклад, у медичних або безпекових системах.

Ще однією важливою характеристикою є здатність мікроконтролерних систем обробляти сигнали від різних сенсорів, виконувати математичні розрахунки та приймати рішення на основі отриманих даних. Завдяки вбудованим інтерфейсам мікроконтролери підтримують роботу з різними типами датчиків і виконавчих пристроїв, таких як двигуни, світлодіоди, екрани тощо. Це робить такі системи універсальними для застосувань у різних галузях, включаючи промисловість, побутову техніку, сільське господарство та розумні будинки.

Програмування мікроконтролерів дозволяє реалізувати алгоритми керування різної складності, від найпростіших логічних умов до складних алгоритмів, таких як контролери PID. Це дає змогу системі адаптуватися до різних умов роботи та виконувати функції з високою точністю. Завдяки вбудованим периферійним засобам (UART, SPI, I2C тощо) мікроконтролери можуть легко взаємодіяти з іншими електронними модулями або навіть іншими мікроконтролерними системами, що дозволяє створювати масштабовані та гнучкі архітектури.

Таким чином, мікроконтролерні автоматизовані системи відзначаються гнучкістю, енергоефективністю та здатністю до швидкої адаптації під специфічні вимоги, що робить їх ключовими компонентами сучасних технологічних рішень.

1.3 Вимоги до системи голосового управління

Система голосового управління потребує певного набору вимог для забезпечення надійності, точності та зручності використання [5]. Основними

вимогами є точність розпізнавання мовлення, швидкість реакції системи, здатність до адаптації та налаштування, сумісність із апаратною частиною, а також стабільність та стійкість до шуму. Розглянемо детальніше ці вимоги.

1. Точність розпізнавання — це ключовий показник ефективності будь-якої системи голосового управління, який визначає, наскільки точно система розпізнає команди, що їй надходять. Висока точність важлива, оскільки від неї залежить якість взаємодії користувача з системою: чим точніше система інтерпретує команди, тим природніше й ефективніше стає управління. Вимірюється точність зазвичай як відсоток правильно розпізнаних слів або команд від загальної кількості команд, які подані в системі [6].

Для забезпечення високої точності розпізнавання важливо враховувати кілька факторів. Перш за все, важливу роль відіграє обробка акустичних характеристик мовлення. Голосовий сигнал може суттєво змінюватись в залежності від тембру голосу, акценту, швидкості мовлення, навколишнього шуму і відстані до мікрофона. Сучасні системи використовують методи глибинного навчання для аналізу великої кількості акустичних даних і розробки моделей, які враховують ці відмінності. Такі моделі, наприклад, глибинні нейронні мережі (DNN), рекурентні нейронні мережі (RNN) та трансформери, здатні поліпшити точність навіть у несприятливих умовах.

Важливо також враховувати і лексичний аспект точності. Система має «знати» якомога більше слів і виразів, які можуть бути використані користувачем. Це досягається через розширення мовного корпусу, а також завдяки алгоритмам, які можуть адаптуватися до конкретного словникового запасу чи стилю мовлення користувача. Наприклад, системи можуть вчитися на даних конкретного користувача, збільшуючи свою точність шляхом постійної адаптації.

Визначальним для точності є також якість та обсяг навчальних даних. Більший обсяг та різноманітність даних дають змогу системі вивчити більш широкий спектр голосових сигналів, що сприяє кращій адаптації до нових

умов і голосів. У випадку з багатомовними системами точність значною мірою залежить від здатності системи розрізняти різні мови і адаптуватися до кожної з них, що включає вивчення специфічних фонетичних і лексичних характеристик.

Додаткові стратегії покращення точності включають використання систем шумопригнічення, фільтрів та спеціальних алгоритмів для роботи у шумних середовищах, що дозволяє системі відокремити мовлення від фонових звуків і правильно інтерпретувати команди.

2. Швидкість реакції системи голосового управління — це час, необхідний для обробки голосової команди та виконання відповідної дії. Швидка реакція є критично важливою для забезпечення ефективної та зручної взаємодії користувача із системою, адже затримки можуть суттєво знизити її ефективність і викликати розчарування у користувача [6].

Основні чинники, що впливають на швидкість реакції, включають обчислювальну потужність мікроконтролера або процесора, на якому працює система, а також ефективність алгоритмів розпізнавання мови. Для досягнення максимальної швидкості сучасні системи використовують оптимізовані нейронні мережі або моделі машинного навчання, які дозволяють значно зменшити обсяг обчислень, необхідних для розпізнавання голосу. Інші підходи, такі як часткова обробка сигналу на апаратному рівні або використання спеціалізованих мікропроцесорів для обробки звуку, також можуть зменшити затримки.

Часто для досягнення оптимальної швидкості системи розподіляють обробку між локальними пристроями і хмарними сервісами. Локальна обробка може забезпечити швидшу реакцію для простих команд, зменшуючи залежність від інтернет-з'єднання, тоді як складніші запити можуть оброблятися в хмарі.

Важливим аспектом є також оптимізація інтерфейсу та додавання функцій прогнозування команд користувача, що можуть частково зменшити затримку і покращити враження від використання.

3. Стійкість до зовнішнього шуму є критично важливою характеристикою для систем голосового управління, оскільки навколишні звукові перешкоди можуть значно впливати на точність розпізнавання голосових команд та загальну ефективність роботи системи. У реальних умовах, де присутні різноманітні джерела шуму — від автомобільного руху до розмов у великих приміщеннях або електронних пристроїв — забезпечення високої стійкості до шуму стає викликом, який потребує застосування комплексних технічних рішень [6].

Одним із основних підходів до підвищення стійкості до зовнішнього шуму є використання спеціалізованих мікрофонів, таких як напрямлені або багатомікрофонні системи. Напрямлені мікрофони здатні фокусуватися на звуках, що надходять з певного напрямку, мінімізуючи при цьому вплив шуму з інших напрямків. Це дозволяє системі голосового управління чітко сприймати команди користувача навіть у шумних середовищах. Багатомікрофонні системи, у свою чергу, використовують декілька мікрофонів для обробки звукових сигналів з різних точок простору, що дозволяє здійснювати більш точне розділення корисного сигналу від фонових шумів за допомогою алгоритмів просторової обробки сигналів.

Крім того, важливим елементом є використання передових методів цифрової обробки сигналів (DSP), які дозволяють ефективно фільтрувати шум та підсилювати корисний голосовий сигнал. Фільтрація може здійснюватися за допомогою різних типів фільтрів, таких як низькочастотні, високочастотні або смугові фільтри, які видаляють небажані частоти, що не належать до голосового діапазону. Крім того, адаптивні фільтри можуть динамічно змінювати свої параметри в залежності від умов навколишнього середовища, що дозволяє більш ефективно реагувати на зміни рівня шуму.

Іншим важливим аспектом є використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для покращення розпізнавання голосу в умовах шуму. Наприклад, нейронні мережі, треновані на великих обсягах даних з різними рівнями шуму, можуть краще ідентифікувати голосові

команди, навіть коли фонова шумова активність висока. Ці алгоритми здатні відокремлювати корисний голосовий сигнал від шуму, враховуючи контекст та особливості мовлення користувача, що значно підвищує точність розпізнавання.

Додатково, системи голосового управління можуть використовувати техніки шумоприглушення, які аналізують вхідні звукові сигнали та активно зменшують рівень фонових шумів. Це досягається шляхом генерації антифонових сигналів, які нейтралізують небажані звуки, залишаючи тільки голосові команди в чистій формі. Такий підхід особливо ефективний у середовищах з постійним шумом, наприклад, у виробничих цехах або офісах з великою кількістю співрозмовників.

Важливо також враховувати якість та розміщення мікрофонів у системі голосового управління. Правильне розташування мікрофонів може суттєво знизити вплив зовнішніх шумів, забезпечуючи чітке сприйняття голосових команд. Наприклад, мікрофони можуть бути розміщені ближче до користувача або використовуватися з шумоізоляційними панелями, які зменшують проникнення фонових звуків.

Таким чином, забезпечення стійкості до зовнішнього шуму в системах голосового управління вимагає інтеграції різноманітних технічних рішень — від вибору спеціалізованих мікрофонів до застосування складних алгоритмів обробки сигналів та машинного навчання. Ці заходи дозволяють створити ефективні та надійні системи, які здатні працювати у різних умовах, забезпечуючи високу точність розпізнавання голосу та комфортну взаємодію користувача з технологіями.

4. Сумісність із апаратною частиною є важливим аспектом для будь-якої системи голосового управління, оскільки вона визначає можливість і ефективність її функціонування на обраній апаратній платформі. Відповідно до структури та потреб проекту, сумісність системи з апаратною частиною охоплює низку аспектів, зокрема обробку звукових сигналів, здатність

підтримувати необхідні обчислювальні потужності, наявність відповідних інтерфейсів для зв’язку та енергетичні потреби [6].

Одним із ключових факторів сумісності є наявність обчислювальних ресурсів у мікроконтролері чи процесорі для якісного оброблення голосового сигналу. Система голосового управління, що використовує технології машинного навчання або алгоритми фільтрації та аналізу сигналів, потребує достатньої кількості оперативної пам’яті та швидкодії процесора. Наприклад, деякі мікроконтролери можуть не підтримувати ресурсоємні алгоритми для розпізнавання голосу в реальному часі, тому для таких завдань обирають спеціалізовані DSP-чіпи (цифрові сигнальні процесори) або потужніші мікроконтролери з підтримкою нейронних обчислень.

Система також повинна мати надійні інтерфейси зв'язку, такі як I2C, UART, SPI або USB, для ефективної інтеграції з іншими компонентами, такими як мікрофони, підсилювачі або динаміки. Інтерфейси дозволяють передавати і отримувати сигнали, забезпечуючи надійну комунікацію між різними елементами апаратної частини. Наприклад, мікрофонні модулі, що підключаються до системи, мають бути сумісні з мікроконтролером для якісного збору голосового сигналу та передачі його до модуля обробки.

Енергетичні потреби також відіграють важливу роль, адже обробка голосу часто є ресурсомістким завданням. Вибір апаратних компонентів, які не перевантажують систему й підтримують ефективне споживання енергії, є важливим кроком при проєктуванні систем голосового управління. Це особливо актуально для портативних пристроїв, які працюють від батарей і мають обмежений ресурс енергії.

Крім того, сумісність системи голосового управління повинна забезпечувати можливість оновлення апаратної частини, щоб підвищити її функціональність або додати нові функції у майбутньому. Це передбачає можливість легкого підключення додаткових модулів, мікрофонів чи інших периферійних пристроїв.

5. Надійність і стабільність є ключовими вимогами для системи голосового управління, адже вони забезпечують її довготривалу і безперебійну роботу навіть за інтенсивного використання або в екстремальних умовах. Під надійністю мається на увазі здатність системи коректно виконувати свої функції, зводячи до мінімуму випадки несправностей чи помилок. Стабільність, у свою чергу, забезпечує, що система працюватиме без втрати продуктивності чи збоїв протягом довгого часу [6].

Для досягнення цих характеристик необхідно дотримуватися певних технічних принципів. По-перше, важливим є тестування на стійкість до зовнішніх перешкод, таких як зміни у навколишньому середовищі, електромагнітні коливання, перепади напруги та інші фактори, що можуть впливати на роботу обладнання. Наприклад, для забезпечення стабільності система має бути захищена від раптових змін температури, що особливо важливо у промислових умовах.

Другою важливою характеристикою є надмірність або резервування системи. Використання резервних компонентів або модулів може допомогти уникнути повного збою у випадку виходу з ладу одного з них. Це може включати як дублювання фізичних елементів, так і підтримку альтернативних алгоритмів для обробки команд у разі непередбачених обставин.

Також необхідно реалізувати систему захисту від можливих помилок користувача, що особливо актуально для голосових систем управління, які активно взаємодіють з користувачем. Це включає обробку некоректних або нечітких команд, можливість повторного запиту або додаткового уточнення команди. Такі заходи знижують ймовірність неправильного спрацьовування, зокрема, якщо система використовується у критичних процесах, де навіть незначні помилки можуть мати значний вплив.

Третім важливим аспектом є використання надійного програмного забезпечення, яке має захист від переповнення пам'яті, витоків ресурсів та забезпечує оптимізовану обробку голосових команд. Регулярні оновлення та можливість самодіагностики підвищують загальну стійкість системи,

забезпечуючи стабільну роботу навіть в умовах змінюваного середовища або оновлення технологій.

Таким чином, система голосового управління має відповідати ряду технічних та функціональних вимог, які забезпечують її ефективність, гнучкість та зручність для кінцевого користувача, незалежно від умов застосування.

1.4 Технічне завдання на проектування

Метою кваліфікаційної роботи є проектування і розробка програмно-технічного комплексу системи голосового управління.

Предмет дослідження – голосове управління. Об’єкт дослідження – алгоритми розпізнавання голосу та голосового управління.

Апаратно проектована система складається з мікроконтролера, мікрофона, модуля розпізнавання голосу та об’єкту управління.

Алгоритм роботи проектованої системи наступний:

1. Після запуску система перевіряє підключення компонентів до плати.
2. У разі виникнення збоїв при перевірці, система сигналізує про це.
3. Якщо проблем підключення компонентів не виявлено, система знаходиться в режимі очікування.
4. Як тільки користувач говорить у мікрофон команду, система розпізнає її та виконує її, якщо команда є у переліку прописаних у системі команд.
5. У разі відсутності команди у переліку команд, система сигналізує про це.
6. У разі нерозпізнавання команди через зовнішні фактори чи нечіткість самої команди, система сигналізує про це.

Система повинна бути зручною та інтуїтивно зрозумілою для користувача, забезпечувати достатній рівень безпеки і не вимагати значних витрат на реалізацію та впровадження.

2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ СКЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ГОЛОСОВОГО УПРАВЛІННЯ

У першому розділі кваліфікаційної роботи було розглянуто основні аспекти голосового управління, досліджено принципи розпізнавання голосу та обробки аудіосигналів, а також вивчено можливості мікроконтролерних платформ для реалізації подібних рішень. Це дозволило зробити висновок про актуальність та ефективність голосового управління для різних категорій користувачів, зокрема осіб з обмеженими можливостями, а також виділити вимоги, які повинна задовольняти система, щоб бути надійною та доступною.

У цьому розділі буде описано етапи розробки апаратної частини мікроконтролерної системи голосового управління. Окрему увагу буде приділено вибору необхідних інструментів та технологій, що забезпечують точність розпізнавання голосових команд, стійкість системи до зовнішнього шуму та швидкість обробки команд.

2.1 Компоненти системи голосового управління

Основні компоненти системи голосового управління включають апаратні й програмні елементи, які взаємодіють для розпізнавання, обробки та виконання голосових команд. Кожен із цих компонентів має певну функцію, яка дозволяє системі функціонувати ефективно, забезпечуючи швидкість реакції, точність розпізнавання та адаптивність до навколишніх умов.

1. Мікрофон є основним пристроєм збору звуку для системи голосового управління, перетворюючи звукові хвилі на електричні сигнали, які система далі обробляє. Мікрофони зазвичай працюють за принципом перетворення звукового тиску, що створюється звуковими хвилями, у змінну електричну напругу. Зазвичай для систем голосового управління

використовують два типи мікрофонів: електретні та MEMS-мікрофони, які мають високу чутливість і хорошу здатність до усунення фонових шумів.

Електретні мікрофони — це різновид конденсаторних мікрофонів, які містять діелектричний матеріал (електрет), що створює постійне електричне поле [7]. Завдяки цьому такі мікрофони мають стабільний вихідний сигнал, що зберігає свою якість навіть при тривалому використанні. Електретні мікрофони здатні захоплювати широкий діапазон частот, що робить їх зручними для розпізнавання різних типів команд. Їх недоліком є чутливість до електромагнітних перешкод, тому для їх застосування інколи потрібне додаткове екранування. Приклад електретного мікрофона наведено на рисунку 2.1.

Рисунок 2.1 – Електретний мікрофон

MEMS-мікрофони (мікроелектромеханічні системи) є сучаснішими пристроями, які використовуються в більшості портативних і мобільних пристроїв [7]. Вони мають високу чутливість і малі розміри, що дозволяє вбудовувати їх у компактні системи, як-от пристрої інтернету речей (IoT). MEMS-мікрофони забезпечують відмінну стійкість до фонових шумів і мають

відносно низьке споживання енергії, що є важливим для автономних систем. Їхня особливість — це здатність до точного захоплення навіть тихих голосових команд, що робить їх придатними для середовищ із високим рівнем шуму.

У системах голосового управління важливими параметрами мікрофона є чутливість, співвідношення сигнал-шум та частотний діапазон. Чутливість визначає, наскільки добре мікрофон може уловлювати звукові сигнали низького рівня. Співвідношення сигнал-шум є критичним, оскільки воно впливає на точність розпізнавання, особливо в умовах з високим рівнем фонових шумів. Частотний діапазон мікрофона має відповідати частотам людського голосу (зазвичай 300-3400 Гц) і водночас захоплювати більше частот, щоб забезпечити точне розпізнавання команд.

Також, для роботи мікрофона в системах голосового управління часто використовують технологію придушення шуму та реверберації, що дозволяє значно покращити якість отриманого сигналу.

2. Другим важливим компонентом є аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Він перетворює аналоговий сигнал, що надходить від мікрофона, у цифровий формат, зручний для подальшої обробки мікроконтролером. Якість АЦП впливає на точність і швидкість передачі даних, що особливо важливо для реального часу роботи.

АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) є пристроєм, який перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму [8]. Це критичний компонент багатьох електронних систем, особливо мікроконтролерних, де необхідно обробляти дані від аналогових датчиків, таких як температурні або звукові сенсори. Основне завдання АЦП — взяти безперервний аналоговий сигнал (наприклад, напругу) і представити його у вигляді цифрового коду, який може обробляти мікропроцесор або мікроконтролер.

Процес роботи АЦП складається з кількох етапів. Перший етап — це семплювання, під час якого сигнал береться з певною частотою (частотою семплювання), яка має бути вдвічі вищою за частоту сигналу, що

обробляється, відповідно до теореми Котельникова. Потім відбувається квантування, коли значення сигналу розбивається на дискретні рівні. Кожен рівень відповідає певному діапазону напруги, і АЦП "присвоює" вхідному сигналу найближче значення, яке доступне в цьому діапазоні.

Наступним етапом є кодування, де кожному квантованому рівню присвоюється унікальний цифровий код, що є виходом АЦП. Цей код може передаватися в цифрову систему для подальшої обробки або аналізу.

Серед основних характеристик АЦП важливо зазначити розрядність (глибину бітів), яка визначає точність квантування, тобто кількість дискретних рівнів, на які розбивається сигнал. Наприклад, АЦП з 8-бітною розрядністю має 256 рівнів, а 10-бітний — 1024 рівні. Чим більше бітів, тим точніше представлення сигналу, але це також вимагає більше пам’яті та часу обробки.

Швидкість перетворення або швидкість семплювання визначає, скільки разів за секунду АЦП здатний виконати перетворення. Це критичний параметр у системах, де необхідно обробляти високочастотні сигнали, як, наприклад, у звукових системах або радіозв'язку.

Також важливим параметром є співвідношення сигнал-шум (SNR), яке вказує, наскільки добре АЦП здатний відокремити сигнал від шуму. Високе співвідношення сигнал-шум свідчить про якісну передачу сигналу без втрат і спотворень. Це особливо актуально для медичних, наукових та аудіо застосувань.

Сучасні АЦП можуть бути побудовані за різними принципами, серед яких послідовне наближення (SAR), дельта-сигма (ΔΣ) та флеш-архітектура. SAR-типи АЦП забезпечують хороший баланс між швидкістю та розрядністю і широко використовуються у вбудованих системах. ΔΣ-типи АЦП мають високу точність і використовуються для обробки сигналів з низькою частотою. Флеш-типи АЦП є найшвидшими, однак мають меншу точність і частіше застосовуються у відео та високочастотних сигнальних обробках.

АЦП є необхідним компонентом у багатьох сферах: від мікроконтролерних пристроїв до аудіообладнання, медичних апаратів,

наукових досліджень, де точність і швидкість обробки аналогових сигналів мають критичне значення.

3. Мікроконтролер — це основний обчислювальний блок системи, який обробляє дані, отримані від АЦП. Він аналізує цифрові сигнали, використовуючи алгоритми розпізнавання мови, розпізнає команди та передає інструкції на інші компоненти системи. Мікроконтролер виконує всі основні розрахунки та рішення, тому його обчислювальна потужність і сумісність із іншими компонентами мають важливе значення.

Мікроконтролер (МК) — це компактний обчислювальний пристрій, що включає центральний процесор (ЦП), пам'ять та периферійні модулі в єдиному корпусі [4]. Основна функція мікроконтролера — обробка інформації від зовнішніх сенсорів і пристроїв та керування виконавчими компонентами, такими як реле, світлодіоди чи мотори, відповідно до запрограмованих команд. Завдяки невеликим розмірам і низькому енергоспоживанню мікроконтролери використовуються у величезній кількості застосувань, від побутових пристроїв до складних систем автоматизації та контролю.

Основні компоненти мікроконтролера складаються з процесора, пам'яті, портів вводу/виводу та таймерів. Процесор виконує інструкції, закодовані в програмі, яка зберігається в пам'яті. Пам'ять у мікроконтролерах поділяється на кілька типів: ROM або флеш-пам'ять для постійного зберігання програмного коду, RAM для тимчасового зберігання даних під час виконання програми, та EEPROM для зберігання налаштувань, які повинні зберігатися навіть після вимкнення живлення.

Порти вводу/виводу (I/O) дозволяють мікроконтролеру взаємодіяти з периферійними пристроями, такими як сенсори, кнопки або дисплеї. Вони можуть працювати у цифровому режимі для вводу чи виводу станів 0 або 1, а також в аналоговому, якщо вбудовані в мікроконтролер ADC (аналогово-цифрові перетворювачі). Деякі мікроконтролери мають також широтно-імпульсну модуляцію (PWM), що дозволяє керувати аналоговими сигналами

на виході, наприклад для регулювання яскравості світлодіодів або швидкості моторів.

Однією з важливих особливостей мікроконтролерів є переривання. Це механізм, який дозволяє мікроконтролеру тимчасово припинити виконання основної програми для обробки важливої події, наприклад натискання кнопки або сигналу від таймера. Переривання значно підвищує ефективність роботи мікроконтролера, оскільки дозволяє йому реагувати на події в реальному часі, не виконуючи постійний моніторинг всіх входів.

Мікроконтролери поділяються на різні типи залежно від архітектури, розрядності процесора та доступних периферій. 8-бітні мікроконтролери є простими й економічними, але їхні можливості обмежені. Вони застосовуються в основному в простих пристроях, таких як годинники або прилади з основними функціями. 16-бітні та 32-бітні мікроконтролери мають більшу обчислювальну потужність і використовуються в більш складних системах, таких як медичне обладнання, пристрої зв'язку, та промислові контролери.

Серед популярних платформ мікроконтролерів — Arduino (рис 2.2), Raspberry Pi Pico (рис 2.3), STM32, ESP8266, що відрізняються потужністю, інтерфейсами та екосистемами підтримки. Наприклад, мікроконтролери Arduino популярні серед ентузіастів і використовуються в багатьох проектах завдяки легкому освоєнню та широкій підтримці.

Рисунок 2.2 – Сімейство плат Arduino

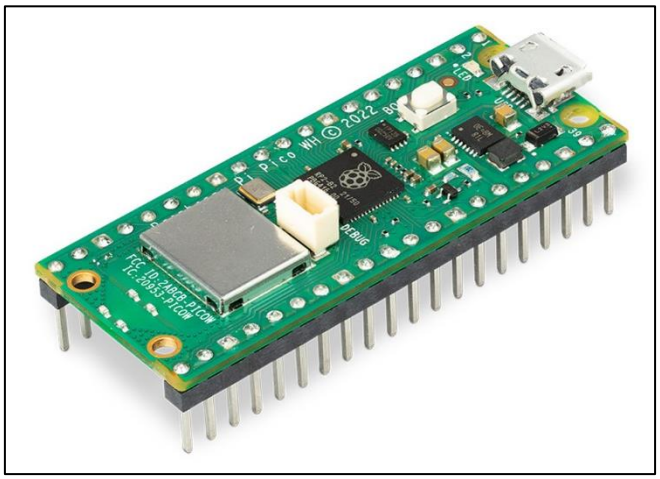

Рисунок 2.3 – Raspberry Pi Pico

Таким чином, мікроконтролери є універсальним і ефективним рішенням для побудови інтегрованих систем, які можуть працювати автономно, реагувати на змінні умови та виконувати конкретні завдання. Їх гнучкість дозволяє використовувати їх у широкому спектрі застосувань, від розумних будинків і носимих пристроїв до промислових систем та робототехніки.

4. Модуль обробки голосу — це компонент системи голосового управління, який відповідає за розпізнавання, інтерпретацію та обробку мовного сигналу [9]. Основна функція цього модуля — перетворити вхідний звуковий сигнал на текст або команди, які система може зрозуміти та виконати. Робота цього модуля складається з кількох етапів, що включають аналіз акустичних особливостей, розпізнавання мовних команд, розуміння контексту та семантичну обробку. Приклад модуля обробки голосу наведено на рисунку 2.4.

Перший етап — попередня обробка мовного сигналу. Цей етап включає фільтрацію та очищення звуку від шуму, що дозволяє поліпшити якість сигналу для подальшого розпізнавання. Часто застосовуються методи спектрального аналізу, такі як короткочасне перетворення Фур'є, що дозволяє виявити частотні компоненти сигналу. Крім того, для підвищення точності

розпізнавання, використовується нормалізація та вирівнювання рівня звукового сигналу.

Рисунок 2.4 – Модуль обробки голосу

Другий етап — аналіз мовного сигналу. На цьому етапі алгоритм обробляє звуковий потік, розбиваючи його на окремі фрагменти — фонеми або склади. Використовуються спеціалізовані моделі для розпізнавання звуків мовлення, такі як моделі Гауссових сумішей або приховані моделі Маркова (HMM), а також нейронні мережі, зокрема глибинні рекурентні мережі (RNN) та згорткові нейронні мережі (CNN). Ці моделі дозволяють розпізнавати мовні патерни навіть у складних умовах, таких як наявність фонових шумів або варіації в інтонації голосу.

На наступному етапі, перетворення звуку в текст, мовний сигнал перетворюється на текстовий формат за допомогою моделей автоматичного розпізнавання мовлення (ASR). Моделі ASR, що застосовують машинне навчання, здатні ідентифікувати слова та фрази. Поширеними підходами для реалізації ASR є нейронні мережі типу Transformer (наприклад, модель BERT) та архітектури на основі довгої короткочасної пам'яті (LSTM).

Далі текстовий формат обробляється на рівні семантичного аналізу та розпізнавання інтенцій. Модуль намагається зрозуміти зміст фрази, щоб визначити, яку команду має виконати система. На цьому етапі використовуються технології обробки природної мови (NLP), такі як аналіз намірів (intent analysis) та розпізнавання сутностей (entity recognition). Це дозволяє системі витягувати ключові команди з тексту, як-от «увімкнути світло» або «поставити таймер».

Останній етап — виконання команди. Після визначення наміру система голосового управління формує відповідні команди для апаратної частини, ініціюючи необхідні дії. Наприклад, у смарт-системах команда може передаватися іншим пристроям через протоколи передачі даних, такі як Bluetooth або Wi-Fi, для безпосереднього управління компонентами.

5. Комунікаційний модуль (наприклад, Wi-Fi, Bluetooth) забезпечує зв'язок з іншими пристроями або центральною системою, якщо система голосового управління є частиною розумного дому чи інтегрована з іншими IoT-пристроями. За допомогою цього модуля можна керувати різними пристроями або передавати інформацію про стан системи користувачеві.

Комунікаційний модуль у системі голосового управління є елементом, який забезпечує передачу даних між мікроконтролером і зовнішніми пристроями, а також між окремими модулями самої системи. Основна функція комунікаційного модуля — обмін інформацією про команди та статуси компонентів системи для злагодженої роботи. Це може включати передачу голосових команд, контроль виконання дій, відправлення даних про стан компонентів і зворотний зв’язок з користувачем. Залежно від завдань та умов роботи системи, комунікаційний модуль може включати різні способи і протоколи зв’язку, такі як дротовий зв'язок (UART, SPI, I2C) або бездротовий зв’язок (Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee).

Комунікаційні модулі можуть бути реалізовані на різних рівнях. У системах з локальною обробкою даних (коли голос розпізнається та обробляється на самому мікроконтролері) комунікаційний модуль забезпечує

передачу команд безпосередньо іншим модулям системи, таким як керування виконавчими пристроями. У більш складних системах, де обробка голосу відбувається на віддаленому сервері, комунікаційний модуль відповідає за надсилання аудіоданих до сервера для розпізнавання та отримання зворотного сигналу з командою. У таких випадках часто використовується Wi-Fi або мобільний зв'язок, якщо система повинна працювати поза межами домашньої мережі.

Для забезпечення стійкості та надійності зв'язку комунікаційний модуль повинен підтримувати кілька рівнів захисту, як-от шифрування даних (наприклад, AES або RSA), а також протоколи безпечного з'єднання (наприклад, HTTPS). Це особливо актуально для систем, які передають дані через інтернет або зберігають особисту інформацію користувача, оскільки уразливості можуть призвести до витоку конфіденційної інформації.

Комунікаційний модуль також має відповідати вимогам енергоефективності, оскільки системи голосового управління часто застосовуються в автономних пристроях з обмеженими джерелами живлення. Наприклад, бездротові модулі з підтримкою технології Bluetooth Low Energy (BLE) або енергоефективні компоненти Zigbee можуть бути оптимальним вибором для таких задач.

6. Для забезпечення зручного інтерфейсу з користувачем також може бути включено індикатори або дисплей, які надають зворотний зв'язок про поточний стан системи (наприклад, підтвердження прийому команди або індикацію помилки). Інколи використовують звуковий чи світловий сигнал, щоб інформувати користувача про успішне виконання команди або про проблеми під час обробки.

Завдяки взаємодії всіх цих компонентів, система голосового управління стає здатною приймати, розпізнавати й обробляти голосові команди, а також виконувати відповідні дії, забезпечуючи при цьому точність і зручність використання.

2.2 Реалізація апаратної частини системи голосового управління

Для реалізації апаратної частини системи голосового управління необхідно обрати конкретні технічні рішення для кожного з компонентів системи. Структурна схема системи голосового управління наведена на рисунку 2.5.

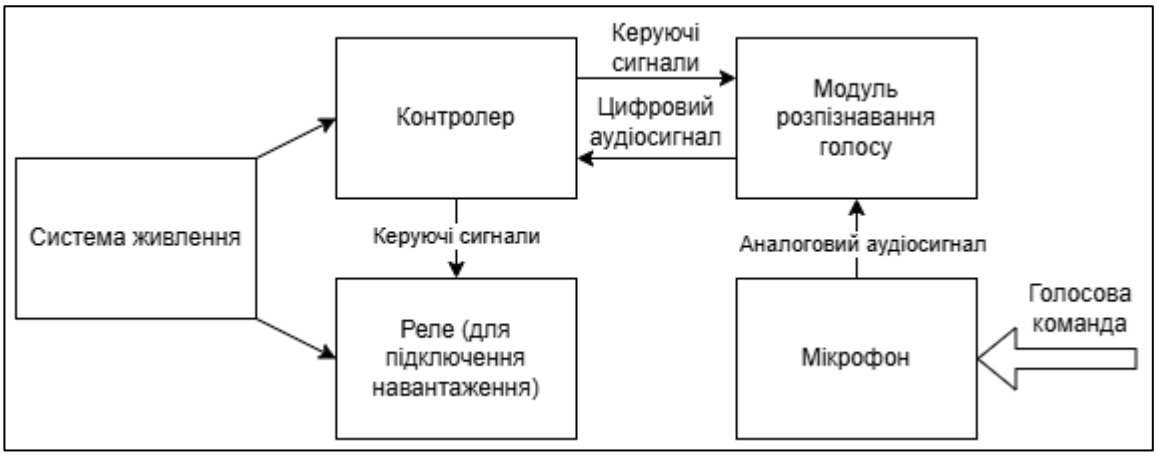

Рисунок 2.5 – Структурна схема системи голосового управління

Як видно з рисунка 2.5, голосова команда від користувача надходить до мікрофона, після чого аналоговий аудіосигнал з мікрофона, який несе інформацію про звукові коливання, передається на модуль розпізнавання голосу. Цей аналоговий сигнал змінюється у відповідь на звуки, які вловлює мікрофон, і відповідає акустичному тиску звукових хвиль, які створюють слова, тональність, гучність та інші особливості голосу.

Для подальшої обробки модулем розпізнавання голосу аналоговий сигнал з мікрофона перетворюється в цифровий вигляд за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Після перетворення сигнал стає цифровою послідовністю, тобто серією бітів, що відображають амплітуду звукових коливань у певні моменти часу. Цифровий сигнал забезпечує можливість

алгоритмічної обробки, фільтрації шуму та виділення ключових параметрів звуку, що використовуються для ідентифікації мовлення.

Далі «відцифрований» аудіосигнал передається до контролеру, де за здалегідь прописаним алгоритмом перетворюється на керуючий сигнал для об’єкту управління.

Доцільно у якості об’єкту управління обрати реле, за для того, щоб можна було підключати різне навантаження, від системи освітлення до системи кліматконтролю.

Враховуючи те, що мікрофон та модуль розпізнавання голосу працюють тільки «разом», як єдина підсистема, доцільним буде обрати таке технічне рішення, в якому обидва компоненти будуть об’єднані. Одним з таких технічних рішень може бути модуль «Voice Recognition Module V3» з електретним мікрофоном, зовнішній вигляд та технічні характеристики якого наведено на рисунку 2.6 та у таблиці 2.1 відповідно [10].

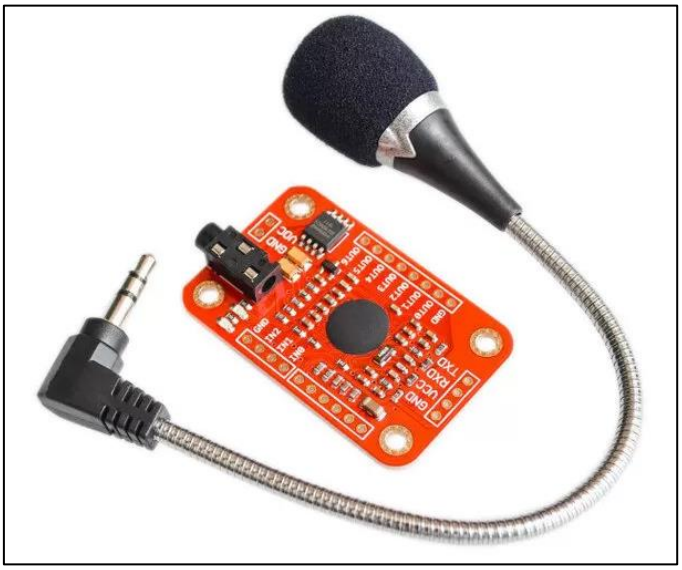

Рисунок 2.6 - Voice Recognition Module V3

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики модуля розпізнавання голосу

Характеристика	Значення
Voltage	4.5-5.5V

Current	<40mA
Digital Interface	5V TTL level for UART interface and GPIO
Analog Interface	3.5mm mono-channel microphone connector + microphone pin interface
Size	31mm x 50mm
Recognition Accuracy	99% (under ideal environment)
Voice Commands Support	Maximum of 80 commands, each lasting up to 1500ms (one or two words)
Effective Commands	Maximum of 7 voice commands active simultaneously
Control Methods	UART/GPIO
General Pin Output	User-controlled
Recognizer	Container holding up to 7 active voice commands
Recognizer Index	Supports indexing for 7 voice commands (regions 0~6)
Train Process	Records user voice commands
Load Function	Copies trained voice commands to recognizer
Voice Command Record	Trained commands stored in flash, indexed from 0 to 79
Signature	Text comment for each record
Group Management	Organizes records into groups of 7 (supports system and user groups)

Для реалізації компактної та енергоефективної системи буде доцільним реалізувати головний контролер системи за допомогою мікроконтролера. Проте дуже важливим є правильно підібрати мікроконтролер, спираючись на його характеристики.

Найрозповсюдженішим технічним рішенням зі сфери мікроконтролерів є сімейство плат Arduino, які реалізують компромісне рішення між продуктивністю, вартістю та доступністю у використанні [11]. Враховуючи технічні характеристики, які наведено на рисунку 2.7, різних план з сімейства Arduino, було прийнято рішення про використання плати Arduino UNO, технічні характеристики та зовнішній вигляд якої наведено у таблиці 2.2 та на рисунку 2.8.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики плати Arduino UNO

Характеристика	Значення
Microcontroller	ATmega328
Operating output voltage	5В
Input voltage (recommended)	7-12В
Input voltage (limit)	6-20В
Digital inputs/outputs	14 (6 – виходи ШІМ)
Analog inputs	6
Direct current through inputs/outputs	40мА
Direct current for output 3.3 V	50мА
Flash memory	32Кб (ATmega328)
RAM	2Кб (ATmega328)
EEPROM	1Кб (ATmega328)
Clock frequency	16МГц
Interface support	SPI, I2C, Serial

Board		Arduino Uno R3	Arduino Nano	Arduino Pro Mini	Leonardo	Micro	Nano Every	Mega2560 Rev3
Microcontroller		ATmega328p	ATmega328p	ATmega328p	ATmega32u4	ATmega32u4	ATMega4809	ATmega2560
FPGA		No	No	No	No	No	No	No
USB connector		USB-B	Mini-B USB	Mini-B USB	Micro USB (USB-B)	Micro USB	Micro USB	USB-B
I/O	Digital only I/O pin	14	14	14	20	20	14	54
	Analog input pins	6	8	8	12	12	8	16
	Analog output pins	0	0	0	0	0	0	0
	PWM Pins	6	6	6	7	7	5	15
Communication	UART	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes, 4
	I2c	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
	SPI	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
	CAN	No	No	No	No	No	No	No
	Bluetooh	No	No	No	No	No	No	No
	WIFI	No	No	No	No	No	No	No
Power	I/O voltage	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5V
	Input nominal volta	7-12V	7-12V	7-12V	7-12V	7-12V	7-21V	7-12V
	DC Current per I/O	20mA	20mA	20mA	10mA	10mA	20mA	20mA
	Powersupply conn	Barrel Jack	GPIO header	GPIO header	Barrel Jack	GPIO header	GPIO header	Barrel Jack
	Battery Powered	No	No	No	No	No	No	No
Clock speed	Main processor	ATmega328P 16MHz	ATmega328P 16MHz	ATmega328P 16MHz	ATmega32u4 16MHz	ATmega32u4 16MHz	20MHz	16MHz
RTC		No	No	No	No	No	No	No
USB to Serial		ATmega16U2 16MHz	FT232RL	No onboard USB-TTL Converter	Native	Native	ATSAMD11D14A	ATmega16U2 16MHz
Memmory	Flash	32KB	32KB	32KB	32KB	32KB	48KB	256KB
	SRAM	2KB	2KB	2KB	2.5KB	2.5KB	6KB	8KB
	EEPROM	1KB	1KB	1KB	1KB	1KB	256B	4KB
Dimensions	Weight	25 g	5 g	5 g	20 g	13 g	5 g	37 g
	Width	53.4 mm	18mm	18mm	53.3 mm	18 mm	18 mm	53.3 mm
	Length	68.6 mm	45mm	45mm	68.6 mm	48 mm	45 mm	101.5 mm

Рисунок 2.7 – Технічні характеристики плат сімейства Arduino

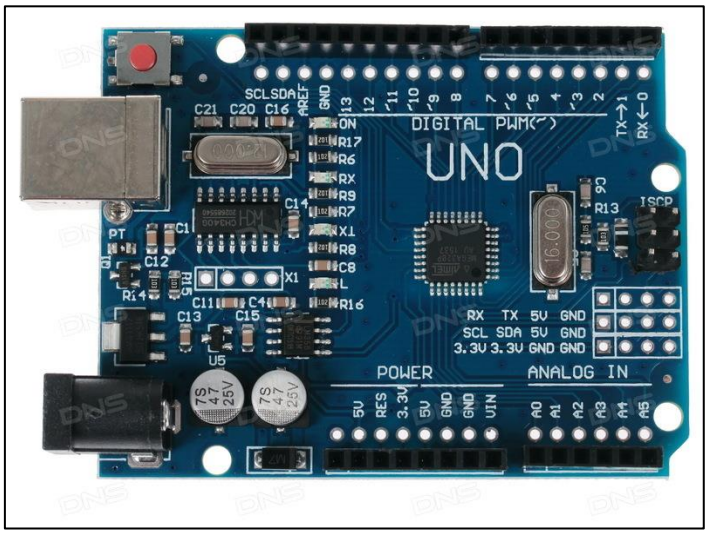

Рисунок 2.8 – Arduino UNO

Для реалізації можливості підключення різних пристроїв до системи голосового керування доцільним буде використання реле. Реле — це електричний компонент, який дозволяє замикати та розмикати електричні кола за допомогою керуючого сигналу. Основною особливістю реле є його здатність використовувати слабкий електричний сигнал для керування набагато потужнішими ланцюгами. Це досягається завдяки конструкції реле: всередині знаходиться котушка, яка при подачі струму створює електромагнітне поле, що притягує або відштовхує контакти. Зміна положення цих контактів викликає розмикання або замикання керованого кола.

Реле часто застосовуються у системах, де необхідно ізолювати керуючий ланцюг від виконавчого, наприклад, коли контролер або мікроконтролер подає команду на реле, а реле вже замикає чи розмикає потужніший ланцюг. Завдяки цьому реле широко використовуються у різних галузях, від побутової техніки до промислових автоматизованих систем, де потрібна надійна передача керуючих сигналів до обладнання високої потужності або приладів, які працюють під високою напругою. Зовнішній вигляд та технічні характеристики реле SRD-05VDC-SL-C наведено на рисунку 2.9 та у таблиці 2.3 відповідно.

Рисунок 2.9 – Реле SRD-05VDC-SL-C

Таблиця 2.3 – Основні характеристики реле SRD-05VDC-SL-C

Характеристика	Значення
Nominal operating voltage of the coil	5 V
Nominal operating current of the coil	71 mA
Coil resistance	70 Om
Power consumption	0,36 W
Maximum switched current	10 A
Maximum switching voltage (DC)	30 V
Maximum switching voltage (AC)	250 V
Working temperature	-25 … +70 °C

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У попередньому розділі було детально висвітлено розробку апаратної частини системи голосового управління, а також обґрунтовано вибір відповідних технічних рішень для реалізації цієї складової. Однак апаратні компоненти самі по собі не забезпечать виконання функцій системи — для того, щоб система могла приймати і розпізнавати голосові команди користувача, а також коректно виконувати їх, необхідно створити відповідне програмне забезпечення, яке забезпечить увесь функціонал.

Цей розділ присвячено розробці програмного забезпечення системи. Програмне забезпечення (ПЗ) включає набір програм для обробки інформації та супровідну документацію, що потрібна для правильного функціонування і експлуатації цього програмного коду [4].

3.1 Вибір мови програмування та інструментів для розробки

Структуру програмного забезпечення представлено на рисунку 3.1.

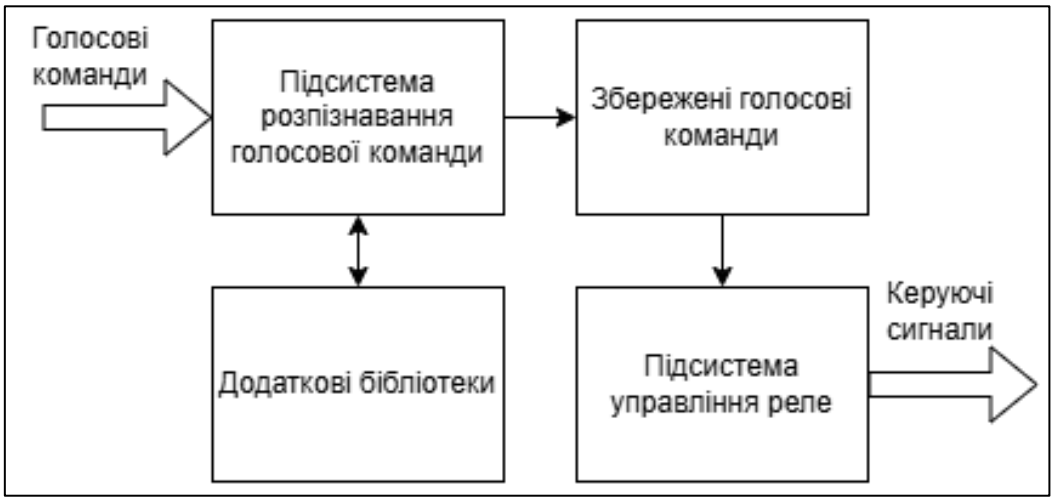

Рисунок 3.1 – Структура ПЗ проектованої системи

З рисунка 3.1 видно, що як тільки мікрофон «вловлює» голосову команду, підсистема розпізнавання одразу «відцифровує» сигнал та перетворює його на текстову команду (або у бітовій формі). Далі отримана команда порівнюється з тими, які було заздалегідь записано до системи. Якщо команда є у системі, тоді вона виконується і передає керуючі сигнали на об’єкт управління, а якщо такої команди не має у системі, тоді виводиться спеціальне повідомлення про відсутність команди. Також може бути ситуація коли команду не можливо розібрати, в цьому випадку також виводиться спеціальне повідомлення.

Оскільки в якості основного контролера для розроблюваної системи обрано плату Arduino, програмне забезпечення створюється спеціально для неї. Це зумовлює використання мови програмування C++ та офіційного середовища розробки Arduino IDE [12-15].

Мова програмування C++ є компільованою та статично типізованою, що робить її універсальною для різних завдань. Вона підтримує кілька програмних парадигм, зокрема процедурну, об'єктно-орієнтовану та узагальнену. Окрім цього, C++ має широку стандартну бібліотеку, яка містить інструменти для роботи з алгоритмами, контейнерами, введенням-виведенням, регулярними виразами, багатопоточністю та іншими функціями. Завдяки цьому мова забезпечує ефективне поєднання властивостей як високорівневих, так і низькорівневих мов програмування [12].

Arduino IDE, що є інтегрованим середовищем розробки, забезпечує програмістів усіма необхідними інструментами для створення програмного забезпечення для мікроконтролерів, встановлених на платі Arduino. Воно дозволяє легко писати, тестувати та завантажувати код на мікроконтролер, забезпечуючи зручність у роботі з апаратними компонентами [15]. Вигляд Arduino IDE з прикладом програмного коду можна побачити на рисунку 3.2.

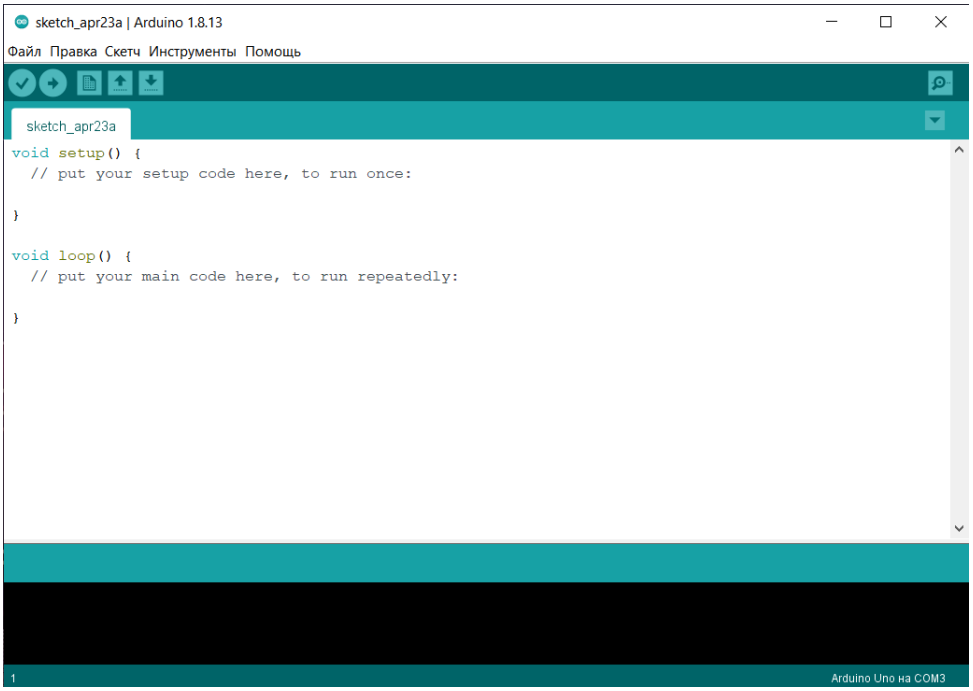

Рисунок 3.2 – ArduinoIDE

3.2 Реалізація програмного забезпечення для контролера плати Arduino

Нижче наведено декілька лістингів коду програмного забезпечення для контролеру плати Arduino. Повний код цієї частини ПЗ наведено у додатку Г.

Лістинг 3.1 – Код функції для перетворення голосової команди у текстову форму

```
void printSignature(uint8_t *buf, int len)
{
  int i;
  for(i=0; i<len; i++){
    if(buf[i]>0x19 && buf[i]<0x7F){
      Serial.write(buf[i]);
    }
    else{
```

```
    Serial.print("[");
    Serial.print(buf[i], HEX);
    Serial.print("]"); } } }
```

У лістингу 3.1 представлено код функції, яка «відцифровує» голосову команду і перетворює її у текстову форму (або у бітову форму). Команда у текстовій формі виводиться у монітор Serial порту.

Лістинг 3.2 – Код функції для відображення усіх голосових команд та їх статусів

```
void printVR(uint8_t *buf)
{
  Serial.println("VR Index\tGroup\tRecordNum\tSignature");
  Serial.print(buf[2], DEC);
  Serial.print("\t\t");
  if(buf[0] == 0xFF){
    Serial.print("NONE");
  }
  else if(buf[0]&0x80){
    Serial.print("UG ");
    Serial.print(buf[0]&(~0x80), DEC);
  }
  else{
    Serial.print("SG ");
    Serial.print(buf[0], DEC);
  }
  Serial.print("\t");
  Serial.print(buf[1], DEC);
  Serial.print("\t\t");
  if(buf[3]>0){
    printSignature(buf+4, buf[3]);
  }
  else{
```

```
      Serial.print("NONE");
    }
    Serial.println("\r\n"); }
```

У лістингу 3.2 представлено код функції, що ідентифікує усі команди від користувача та виводить їх у монітор Serial порту. Кожна команда має текстову форму, індекс, групу та статус. Таким чином, можна проводити моніторинг роботи системи розпізнавання і виявляти помилки чи збої.

Лістинг 3.3 – Код функції setup()

```
void setup()
{
  myVR.begin(9600);
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Voice Recognition\r\nControl relay
sample");
  pinMode(relay, OUTPUT);
  if(myVR.clear() == 0){
    Serial.println("Recognizer cleared.");
  }else{
    Serial.println("Not find VoiceRecognitionModule.");
    Serial.println("Please check connection and restart
Arduino.");
    while(1);
  }
  if(myVR.load((uint8_t)onRecord) >= 0){
    Serial.println("onRecord loaded");
  }
  if(myVR.load((uint8_t)offRecord) >= 0){
    Serial.println("offRecord loaded");
  }
}
```

У лістингу 3.3 представлено код функції setup(), у якій ініціалізуються усі об’єкти та інтерфейси, а також у систему записуються голосові команди, з якими далі будуть порівнюватися команди від користувача.

Лістинг 3.4 – Код функції loop()

```
void loop()
{
  int ret;
  ret = myVR.recognize(buf, 50);
  if(ret>0){
    switch(buf[1]){
      case onRecord:
        digitalWrite(relay, HIGH);
        break;
      case offRecord:
        digitalWrite(relay, LOW);
        break;
      default:
        Serial.println("Record function undefined");
        break;
    }
    printVR(buf);
  }
}
```

У лістингу 3.4 представлено код основної функції loop(), яка працює у нескінченному циклі та запускає усі інші функції, і функцію для розпізнавання голосової команди, функцію для моніторингу усіх команд, і порівнює команду від користувача з тими, що записано у систему, і відповідно до команди передає керуючі сигнали на об’єкт керування, і відловлює помилки у системі, передаючі повідомлення про них на монітор Serial порту.

Принцип роботи програмного забезпечення системи голосового управління наступний: після запуску програми на екран виводиться повідомлення про ініціалізацію системи і перевірку працездатності усіх компонентів. Після ініціалізації система знаходиться у режимі очікування допоки користувач не використає голосову команду. Як тільки користувач проговорив в голос команду, система активується та починається розпізнавання команди. У разі успішного розпізнавання команди, система порівнює її з записаними заздалегідь у пам’ять контролера командами і якщо команди збігаються, тоді система передає керуючі сигнали на об’єкт управління. У разі неможливості розпізнавання команди чи якщо команда відсутня в пам’яті контролера, у монітор Serial порту виводиться повідомлення про це. Так само повідомлення виводяться при виникненні якихось нестандартних ситуацій та збоїв. Після відпрацювання однієї команди система переходить в режим очікування наступної команди.

Програма являє собою нескінчений цикл, тобто вона буде виконуватися до тих пір, поки користувач «власноруч» її не закінчить, або не відключить систему від енергоживлення.

4 ДОСЛІДНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА

У попередніх розділах було проаналізовано основи предметної області та теоретичні принципи, необхідні для створення системи. Було досліджено методики й технології розпізнавання голосу, спроектовано функціональну схему апаратної частини, а також обґрунтовано вибір компонентів для її реалізації. Крім цього, розроблено програмне забезпечення, що реалізує всі необхідні функції системи. Для перевірки працездатності та ефективності запропонованої системи необхідно провести тестування макетного зразка, включаючи запуск апаратної частини та оцінку роботи програмного забезпечення в умовах, наближених до реального використання.

4.1 Опис макетного зразка та методики випробувань

Моделювання роботи макетного зразка проектованої системи необхідно проводити в умовах, наближених до умов експлуатації кінцевим користувачем, отже спочатку необхідно реалізувати апаратну складову системи, а далі запускати програмне забезпечення та проводити тестування.

Апаратна складова системи реалізується на основі готових технічних рішень, як це описано у розділі 2. Усі компоненти з’єднуються між собою за допомогою дротів, а за для запобіганню плутанини у дротах і виключення необхідності паяти, доцільним буде використання макетної плати «breadboard». Так як система не має конкретного об’єкта управління, а має підключене реле, це означає, що є можливість підключення різних пристроїв від освітлення до системи кондиціонування повітря. Для спрощення демонстрації працездатності системи було прийнято рішення використовувати світлодіод в якості об’єкта управління. Збірку системи голосового управління представлено на рисунку 4.1.

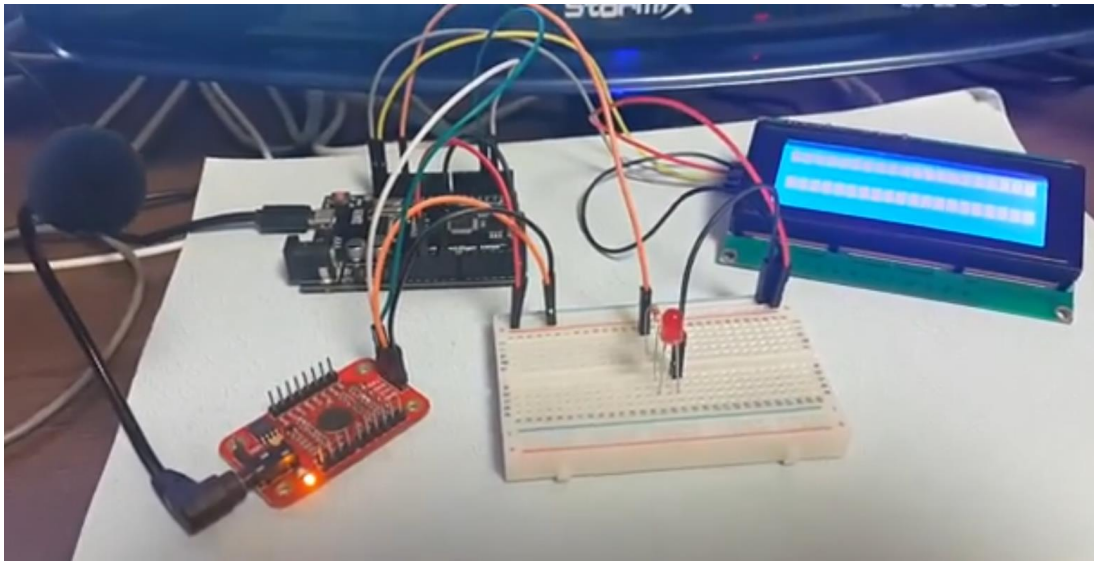

Рисунок 4.1 – Збірка системи голосового управління

Після того, як апаратна складова системи реалізована, необхідно до мікроконтролеру плати Arduino «зашити» програмне забезпечення, яке описувалося у розділі 3. Далі необхідно провести тестування розробленої системи, яке складається з наступних етапів:

1. Запуск системи;
2. Перевірка працездатності усіх компонентів;
3. Запис голосових команд до пам’яті контролера;
4. Перевірка роботи системи в режимі очікування;
5. Перевірка реакції системи на голосові команди:
    a. Перевірка роботи правильних голосових команд;
    b. Перевірка роботи неправильних голосових команд;
    c. Перевірка роботи нечітких голосових команд;
6. Перевірка часу відгуку системи та таймаутів;
7. Перевірка відпрацювання нестандартних ситуацій, за яких виникають помилки у системі.

Результати тестування макетного зразка проектованої системи представлені у наступному підрозділі.

4.2 Результати моделювання роботи тестового зразка

Після підключення системи до живлення необхідно перевірити працездатність її компонентів (рис.4.2). Далі необхідно зробити запис голосових команд до пам’яті контролера. Стандартна версія прошивки може розрізняти до 7 голосових команд. Враховуючи простоту макетного зразка, було прийнято рішення записати 2 команди – «ON» і «OFF», для включення і виключення світлодіода відповідно.

Далі необхідно перевірити реакцію системи на голосові команди користувача. Може бути 3 випадки – правильна голосова команда, тобто та, яку було записано до пам’яті контролера; неправильна голосова команда; нечітка голосова команда, тобто та, яку неможливо розпізнати. Результати перевірки наведено на рисунках 4.3 та 4.4.

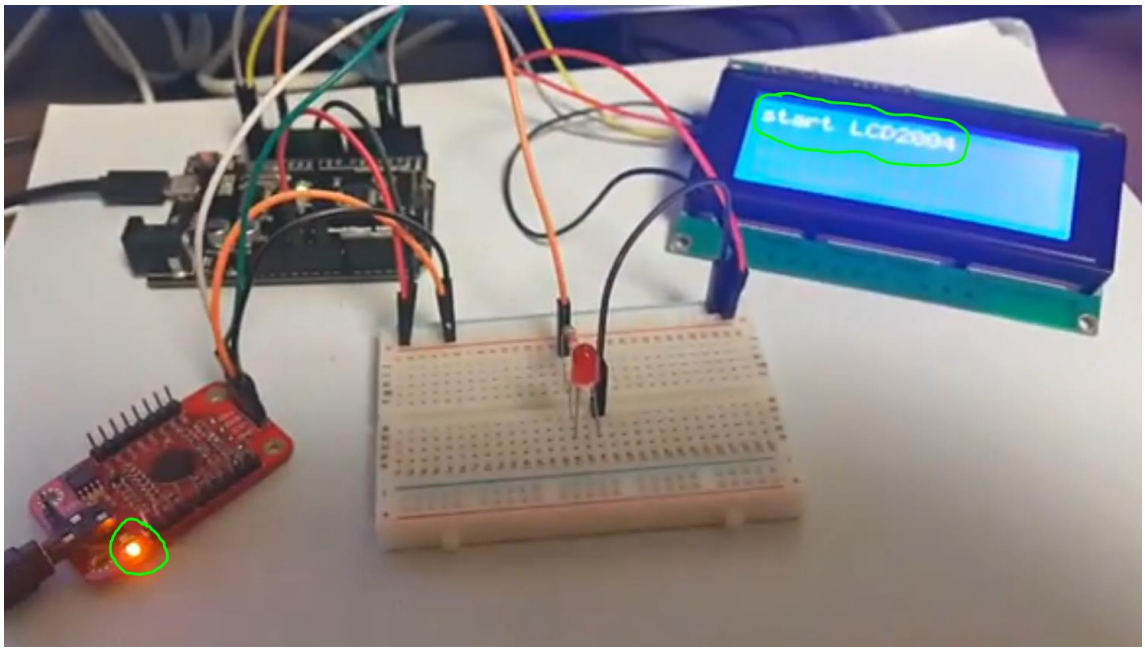

Рисунок 4.2 – Перевірка працездатності усіх компонентів системи

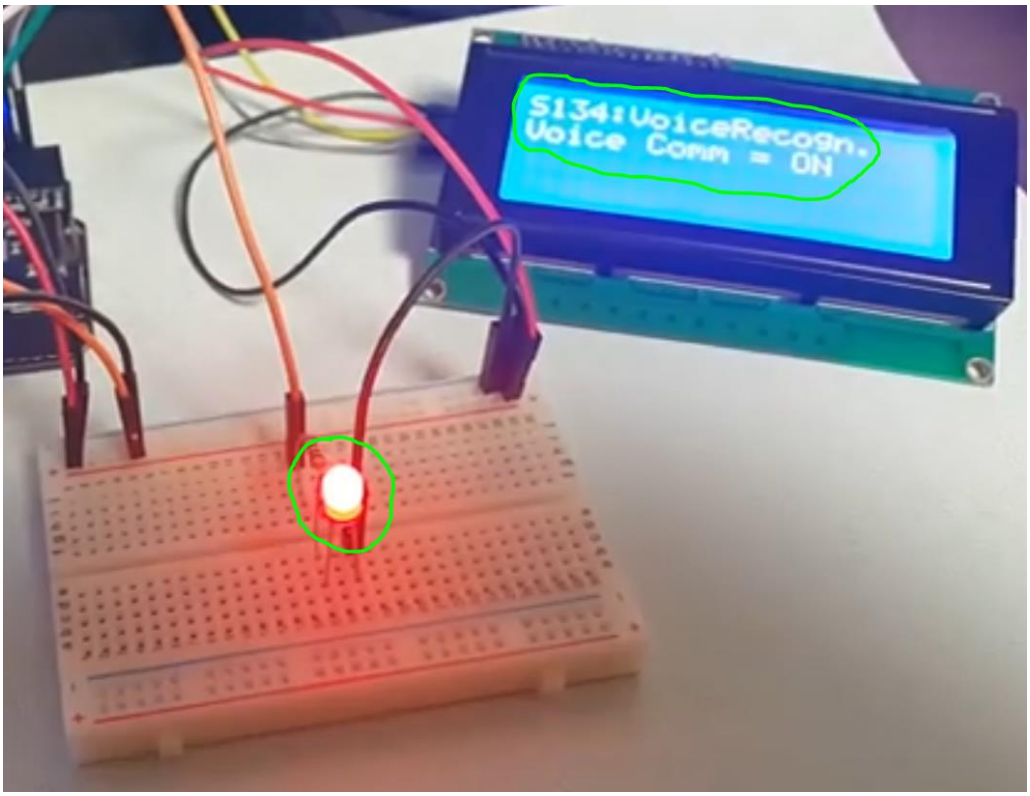

Рисунок 4.3 – Розпізнавання системою голосової команди «ON»

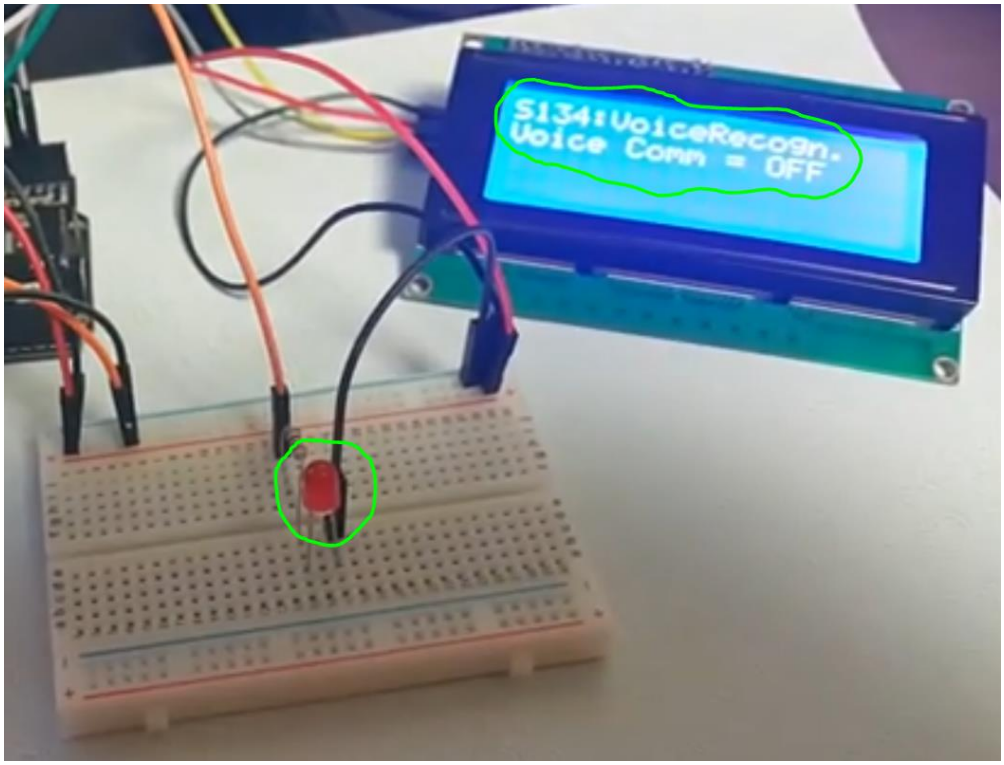

Рисунок 4.4 – Розпізнавання системою голосової команди «OFF»

Згідно з результатами проведеного тестування, розроблена система виконує свої функції відповідно до програмного забезпечення. Усі голосові команди розпізнаються правильно, а система реагує відповідно до заданого алгоритму. Час відгуку відповідає встановленим у програмі таймаутам. Поведінка системи в умовах нестандартних ситуацій, які можуть спричиняти збої, також є коректною та відповідає очікуванням. Протягом часу проведення тестувань збоїв у роботі системи не зафіксовано.

Варто зазначити, що продуктивність системи в реальних умовах може відрізнятися через технічні обмеження макетного стенду.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було розроблено мікроконтролерну систему голосового управління, яка забезпечує зручний спосіб керування периферійними пристроями за допомогою голосових команд. Для реалізації системи використано апаратну платформу на основі Arduino UNO, модуля розпізнавання голосу Voice Recognition V3 Module та реле для управління навантаженням.

Кваліфікаційна робота складається з чотирьох розділів. У першому розділі проведено дослідження предметної області, включаючи аналіз сучасних технологій голосового управління та їх застосування. У другому розділі було детально описано розробку апаратної складової системи та обґрунтовано вибір конкретних технічних компонентів. У третьому розділі представлено розробку програмного забезпечення для контролера системи голосового управління, створеного за допомогою мови програмування C++. У завершальному розділі описано моделювання роботи системи, наведено методику тестування та аналіз результатів.

Тестування показало, що система коректно розпізнає голосові команди, працює стабільно та відповідає вимогам, визначеним у технічному завданні. Реалізація такого проекту демонструє перспективність застосування голосових технологій у автоматизованих системах та їхню ефективність у спрощенні взаємодії користувача з технікою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Розпізнавання голосу [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Розпізнавання_голосу

2. Марковські моделі [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Марковські_моделі

3. Нейронні мережі [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Нейронні_мережі

4. Півняк Г. Г., Бусигін Б. С., Дівізінюк М. М. Тлумачний словник з інформатики. — Д.: Національний гірничий університет, 2010. — 392 с. — ISBN 978-966-350-306-0.

5. Graves, A., & Schmidhuber, J. (2021). Voice recognition using recurrent neural networks: Principles and applications. Neural Networks, 88, 25-42. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.02.015

6. Петренко О. М., Іванов С. В., Коваль М. П. Методи та засоби розпізнавання мовлення в системах штучного інтелекту : монографія. Київ : Наукова думка, 2022. 286 с. ISBN 978-966-00-1234-5.

7. Мікрофон [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Мікрофон

8. ADC [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/ADC

9. Модуль обробки голосу [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Модуль_обробки_голосу

10. *Voice Recognition Module V3 Manual*. [Електронний ресурс] // ELECHOUSE: офіційний сайт – Електронні данні. – Режим доступу: https://www.elechouse.com/elechouse/images/product/VR3/VR3_manual.pdf

11. Arduino [Електронний ресурс] // Arduino: офіційний сайт. – Електронні данні. – Режим доступу: https://www.arduino.cc/

12. C++ Programming: Principles and Practice Using C++ / Bjarne Stroustrup. — Addison-Wesley Professional, 2014. — 1312 p. — ISBN 978-0321992789.

13. Elliot Williams. Make: AVR Programming: Learning to Write Software for Hardware. — Maker Media, Inc., 2014. — 472 p. — ISBN 978-1449355784.

14. Julien Bayle. C Programming for Arduino. — Packt Publishing, 2013. — 512 p. — ISBN 978-1849517584.

15. Simon Monk. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. — McGraw-Hill Education, 2016. — 192 p. — ISBN 978-1259641633.