

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерных систем и сетей
Кафедра электронных вычислительных машин
Дисциплина: Схемотехника

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к курсовому проекту
на тему

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

БГУИР КП 1-40 02 01 002 ПЗ

Студент: группы 250541,
Власов Р. Е.

Руководитель: доцент каф. ЭВМ
Селезнев И. Л.

Минск 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО МИКРОПРОЦЕССОРНОМУ УСТРОЙСТВУ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ.....	4
1.1 Требования к проектируемому устройству	4
1.2 Микроконтроллеры	4
1.3 Микрофоны	6
1.4 Пьезоэлектрические излучатели звука.....	7
1.5 Органы индикации состояния устройства	8
1.6 Органы управления состоянием устройства	9
1.7 Дисплеи для отображения данных	10
2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ.....	12
2.1 Постановка задачи.....	12
2.2 Компоненты проектируемого устройства.....	12
2.3 Взаимодействие компонентов устройства.....	13
3 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ	14
3.1 Обоснование выбора микроконтроллеров.....	14
3.2 Обоснование выбора микрофона	15
3.3 Обоснование выбора пьезоэлектрического излучателя звука	16
3.4 Обоснование выбора органов световой индикации.....	17
3.5 Обоснование выбора органов управления состоянием устройства	17
3.6 Обоснование выбора устройства отображения информации	18
3.7 Формулирование требований к источнику питания	19
3.8 Разработка функциональной схемы	19
4 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ.....	20
СХЕМЫ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕВАТОРА	20
4.1 Микроконтроллер	20
4.2 Микрофон	21
4.3 Пьезоэлектрический излучатель звука	21
4.4 Дисплей.....	22
4.5 Расширитель цифровых входов РСF8574АТ	22
4.6 Органы индикации	23
4.7 Расчет токоограничивающего сопротивления для светодиодов	23
5 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	24
5.1 Требования к разработке программного обеспечения	24
5.2 Схема программы.....	24
5.3 Программа управления устройством	26
5.4 Описание исходного кода программы	26
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	30
ПРИЛОЖЕНИЕ А	32
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	33
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	34

ПРИЛОЖЕНИЕ Г	35
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	36
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	37
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	38

ВВЕДЕНИЕ

Распознавание речи становится все более востребованной технологией в современных устройствах, облегчая взаимодействие человека с техникой, начиная от голосовых помощников и заканчивая системами умного дома. При создании подобных систем возникают задачи по надежному захвату и фильтрации аудиосигнала, анализу спектральных характеристик звука, определению ключевых акустических параметров, таких как мел-кепстральные коэффициенты, спектрограммы или частотные характеристики фонем.

Целью проекта является создание микропроцессорного устройства на базе микроконтроллера, способное распознавать несколько заранее заданных слов и отображать результат на экране. Для достижения цели устройству необходимо выполнять следующие задачи:

- преобразовывать звуковые колебания в электрический сигнал;
- оцифровывать аудиосигнал с помощью встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- извлекать из аудиосигнала ключевые акустические характеристики для выделения фонем;
- сравнивать извлечённые признаки с заранее прописанными эталонными шаблонами для определения распознаваемого слова
- отображать результат распознавания на дисплее

Для выполнения описанных функций в проектируемом устройстве могут присутствовать следующие элементы:

- модуль обработки звуковых колебаний;
- модуль отображения информации;
- органы управления состоянием устройства;
- пьезоэлектрический излучатель звука;
- средства индикации состояния устройства.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО МИКРОПРОЦЕССОРНОМУ УСТРОЙСТВУ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

1.1 Требования к проектируемому устройству

Микропроцессорное устройство распознавания речи должно обеспечивать надежный захват и фильтрацию аудиосигнала, выделение характерных признаков и их последующую классификацию для распознавания заранее заданных слов. Устройство должно корректно обрабатывать и отображать распознанные слова на дисплее. Для решения этих задач в состав устройства должны входить:

- микроконтроллер;
- модуль обработки звуковых колебаний;
- жидкокристаллический дисплей;
- органы управления состоянием устройства;
- пьезоэлектрический излучатель звука;
- органы индикации состояния устройства.

1.2 Микроконтроллеры

Микроконтроллеры представляют собой специализированные интегральные схемы, разработанные для управления электронными системами и устройствами. Они выполняют функции сбора, обработки и передачи данных, контролируют механизмы и электронные компоненты, а также обеспечивают реализацию разнообразных задач и функциональных возможностей в современных устройствах.

На сегодняшний день существует большое количество различных микроконтроллеров, различающихся по размеру, архитектуре и функциональным возможностям. Некоторые из них перечислены в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Сравнение микроконтроллеров

Параметр	ATmega328	nRF52840	RP2040
Архитектура	AVR	ARM Cortex-M4	ARM Cortex-M0+
Количество регистров общего назначения	32	16	16
Тактовая частота	16 МГц	64 МГц	133 МГц
Разрядность	8 битов	32 бита	32 бита
Flash-память	32 КБ	1 МБ	16 МБ
SRAM-память	2 КБ	256 КБ	264 КБ
EEPROM-память	1 КБ	2 КБ	-
Количество циклов перезаписи Flash-памяти	10 тысяч	10 тысяч	10 тысяч

Продолжение таблицы 1.1

Количество циклов перезаписи EEPROM -памяти	100 тысяч	100 тысяч	100 тысяч
Таймер/счетчик 8 битный	2	-	-
Таймер/счетчик 16 битный	1	-	-
Счетчик реального времени	1	1	1
Количество каналов ШИМ	6	4	16
Количество АЦП	8	1	4
Разрядность АЦП	10	12	12
Поддержка USART	Да	Да	Да
Поддержка SPI	Да	Да	Да
Поддержка I2C	Да	Да	Да
Поддержка Wi-Fi 802.11	Нет	Да	Нет
Входное напряжение	1,8-5,5 В	1,7-3,6 В	1,8-3,3 В
Максимальный потребляемый ток	200 мА	25 мА	90 мА
Рабочий диапазон температур	-40 °С...+ 105 °С	-40 °С...+ 85 °С	-40 °С...+85 °С

АТmega328 представляет собой один из наиболее распространённых 8-битных микроконтроллеров семейства AVR, отличающийся сбалансированной производительностью и низким энергопотреблением. Он оснащён 32 килобайтами встроенной Flash-памяти для хранения кода программы, 2 килобайтами ОЗУ (SRAM) и 1 килобайтом EEPROM для долговременного хранения данных [1]. АТmega328 содержит 23 программно-настраиваемых цифровых ввода/вывода, а также аппаратные модули USART (UART), SPI и I²C, упрощающие взаимодействие с различными периферийными устройствами.

nRF52840 – это 32-битный микроконтроллер от компании Nordic Semiconductor с ядром ARM Cortex-M4 и аппаратной поддержкой плавающей точки. Исходя из источника [2], он ориентирован преимущественно на решения с беспроводной связью, поддерживая Bluetooth Low Energy (BLE), Thread и Zigbee. МК обладает 1 МБ встроенной Flash-памяти и 256 КБ ОЗУ, что позволяет хранить довольно обширные программы и обрабатывать

значительные объёмы данных, включая программы машинного обучения, связанные с распознаванием речи. При этом nRF52840 работает на тактовой частоте до 64 МГц, имеет низкое энергопотребление и гибкую конфигурацию периферии (SPI, I²C, UART и прочие). Благодаря наличию встроенного радиомодуля BLE нередко используется в носимых устройствах, IoT-проектах и смарт-системах.

RP2040 – это микроконтроллер, разработанный Raspberry Pi, основанный на двухъядерном ядре ARM Cortex-M0+. Он не имеет встроенной Flash-памяти, но поддерживает внешнюю QSPI-Flash (в зависимости от реализации платы может достигать нескольких мегабайт). RP2040 оснащён 264 КБ высокоскоростной SRAM, поддерживает широкий набор интерфейсов (SPI, I²C, UART и др.) и может работать на частоте до 133 МГц. Особенностью данного МК является наличие 8 «срезов» для аппаратного ШИМ (всего до 16 каналов) и гибкая система ввода-вывода (PIO), позволяющая программно эмулировать различные протоколы и настраивать взаимодействие с периферией практически под любые задачи. Также, имеет возможность хранить емкие программы с машинным обучением для распознавания речи [3].

1.3 Микрофоны

На сегодняшний день существует множество различных модулей обработки звуковых колебаний. Для сравнения были выбраны три модели электретных микрофонов: EM6050P, EM9767 и НМО0603В-65. В таблице 1.3 приведены их сравнительные характеристики.

Таблица 1.2 — Сравнение электретных микрофонов

Параметр	EM6050P	EM9767	НМО0603В-65
Диапазон напряжения питания	от 1,5 до 3 В	от 1,5 до 3 В	от 1,5 до 3 В
Шум	60 дБА	58 дБА	58 дБА
Диапазон частот	20-20000 Гц	50-20000 Гц	30-16000 Гц
Чувствительность	32-44 мВ/Па	32-44 мВ/Па	32-44 мВ/Па
Рабочее напряжение	1.5 или 3В	1.5 или 3В	1.5 или 3В

EM6050P – это электретный микрофон общего применения, разработанный для широкого спектра аудиозаписывающих устройств. Он обеспечивает приемлемое качество захвата звука для большинства бытовых и промышленных применений. Позволяет эффективно записывать как низкие, так и высокие звуки, а чувствительность 32-44 мВ/Па обеспечивает хорошую реакцию на звуковые сигналы [4].

EM9767 – это высокочувствительный электретный микрофон, предназначенный для устройств, требующих более высокой чувствительности

и низкого уровня шума. Микрофон позволяет эффективно улавливать как средние, так и высокие частоты [5].

НМО0603В-65 – это электретный микрофон, оптимизированный для использования в малогабаритных электронных устройствах. Исходя из источника [6], он работает при напряжении 3 В и имеет низкий уровень шума 58 дБА, что обеспечивает чистоту захвата аудиосигналов. Подходит для устройств, требующих точного и четкого звука. Малые размеры позволяют легко интегрировать его в компактные устройства, такие как смартфоны и носимые гаджеты.

1.4 Пьезоэлектрические излучатели звука

Для формирования звуковых сигналов в начале работы устройства применяется пьезоэлектрический излучатель звука. В таблице 1.5 приведены основные параметры рассматриваемого излучателя МН-FMD и двух его аналогов:

Таблица 1.4 – Параметры пьезоэлектрических излучателей

Параметр	МН-FMD	PKM17EPP4001-B0	СЕВ35R-14Z
Резонансная частота	4 кГц	3,5 кГц	3 кГц
Уровень звукового давления	78 дБ	84 дБ	81 дБ
Входное напряжение	От 3 до 20 В	От 3 до 20 В	От 3 до 20 В
Встроенный генератор	-	-	-
Потребляемый ток менее	5 мА	6 мА	6 мА

МН-FMD – это компактный пьезоэлектрический излучатель звука, широко применяемый в бытовой и промышленной электронике для индикации событий, сигнализации и генерации простых тонов. Диапазон рабочей частоты 4 кГц обеспечивает хорошую слышимость при минимальном энергопотреблении. Излучатель способен генерировать звуковое давление до 85 дБ на расстоянии 10 см при напряжении 5 В. Благодаря простоте конструкции (три выводных контакта) и возможности работы от широкого диапазона напряжений от 3 В до 20 В он легко интегрируется в системы контроля, сигнализации, а также бытовые приборы [7].

PKM17EPP4001-B0 – пьезоэлектрический излучатель от Murata с резонансной частотой 3,5 кГц и повышенной эффективностью за счёт оптимизированной конструкции пьезокерамики. При напряжении 5 В выдает уровень звукового давления до 88 дБ на 10 см. Потребление тока в режиме генерации не превышает 6 мА, что делает его пригодным для портативных устройств и

систем автономного питания. Прочный корпус и рекомендованный монтаж через сквозное отверстие обеспечивают надежность при вибрационных нагрузках, что важно в промышленных сенсорах и охранных системах [8].

Same Sky CMT-1604-SMT-TR – SMD-пьезоизлучатель с компактным размером. Номинальное напряжение 3 В, ток потребления 5 мА, частота 4 кГц и уровень звука 81 дБ на 10 см делают его оптимальным для компактных приборов, медицинской техники и встраиваемых систем, где важны низкий профиль и невысокое энергопотребление.

1.5 Органы индикации состояния устройства

Для отображения состояния в устройстве распознавания речи можно использовать светодиоды различных форм-факторов. Ниже в таблице 1.6 представлены одни из самых распространенных дисплеев и их параметры:

Таблица 1.5 – Параметры органов индикации состояния устройства

Параметр	3 мм LED (Kingbright WP7113ID)	5 мм LED (Lite-On LTL-307EE)	OLED1 SMD LED 0805 (Osram OSL-80S) 28x64
Рабочая температура	от -45 до 85 °C	от -40 до 85 °C	от -40 до 85 °C
Количество выводов	40–60 мкд	60–80 мкд	15–25 мкд
Прямое напряжение	2.0–2.2В	2.0–2.2В	2,8-3,2 В
Максимальный ток	20 мА	20 мА	20 мА

Светодиоды для индикации состояния устройства представляют собой компактные и энергоэффективные элементы, позволяющие просто и наглядно сигнализировать о работе системы. Они не отображают сложную текстовую или графическую информацию, как дисплеи, но благодаря своей высокой надежности и быстродействию идеально подходят для индикации различных режимов работы. Например, в рассматриваемом устройстве могут использоваться следующие типы светодиодов:

3 мм LED (Kingbright WP7113ID) – характеризуется рабочим температурным диапазоном от –45 до 85 °C, имеет световой поток 40–60 мкд, прямое напряжение 2.0–2.2 В и максимальный ток 20 мА. Такой светодиод подходит для применения в большинстве условиях и используется в большом количестве устройств [10].

5 мм LED (Lite-On LTL-307EE) – работает в диапазоне от –40 до 85 °C, обеспечивает световой поток 60–80 мкд, при прямом напряжении 2.0–2.2 В и максимальном токе 20 мА. Он отличается большей яркостью, что делает его удобным для использования в более освещенных средах [11].

SMD LED 0805 (Osram OSL-80S) – обладает рабочей температурой от – 40 до 85 °С, световой поток составляет 15–25 мкд, при этом требуется прямое напряжение 2,8–3,2 В и максимальный ток также 20 мА. Такой тип светодиода компактен и удобен для монтажа на печатных платах с ограниченным пространством [12].

1.6 Органы управления состоянием устройства

Для отображения состояния в устройстве распознавания речи можно использовать светодиоды различных форм-факторов. Ниже в таблице 1.6 представлены одни из самых распространенных дисплеев и их параметры:

Таблица 1.6 – Параметры органов индикации состояния устройства

Параметр	KCD1-11	DIPSW-68-5	Omron D2FC-F-7N
Количество контактов	2	6 или 8	2
Рабочая температура	от -20 до 70 °С	от -20 до 85 °С	от -25 до 70 °С
Рабочее напряжение	5 В	5 В	5 В
Максимальный ток	1000 мА	100 мА	50 мА

Переключатели – это механические элементы, предназначенные для выбора режимов работы и запуска процесса распознавания речи. Они обеспечивают стабильное и надежное переключение между заданными положениями, позволяя пользователю интуитивно управлять устройством.

Переключатель KCD1-11 – это стандартный механический переключатель, рассчитанный на высокую нагрузку (до 1000 мА). Он реализует простую схему переключения между двумя состояниями (ON/OFF), что делает его идеальным выбором для систем, где важна долговечность и устойчивость к частым переключениям. Этот переключатель широко используется в промышленной электронике, где надежность элементов управления имеет первостепенное значение [13].

Переключатель DIPSW-68-5 – это компактный механический элемент, характеризующийся наличием 6 или 8 контактов и возможностью выбора нескольких положений (обычно 2, 3 или 4 позиции) [14]. Он широко применяется в микроконтроллерных схемах, позволяя пользователю легко выбирать различные режимы работы или функции устройства. Благодаря своей компактности и множеству позиций, переключатель типа DIP является удобным решением для настройки и конфигурации параметров работы системы.

Кнопочный переключатель Omron D2FC-F-7N – это микро-кнопка с моментальным замыканием, предназначенная для быстрого и кратковременного переключения состояний. Она имеет всего 2 контакта и обеспечивает мгновенную реакцию на нажатие, что делает полезным для активации функций, требующих быстрого отклика, например, для запуска процесса распознавания речи. Благодаря своему компактному размеру и простоте использования, такой переключатель часто применяется в пользовательских интерфейсах электронных устройств [15].

1.7 Дисплеи для отображения данных

Для отображения распознанных слов пользователю в устройстве распознавания речи можно использовать жидкокристаллический или OLED-дисплей. Ниже в таблице 1.7 представлены одни из самых распространенных дисплеев и их параметры:

Таблица 1.7 – Параметры жидкокристаллических и светодиодных дисплеев

Параметр	LCD2004	LCD1602	OLED128x64
Входное напряжение	4.7–5.3В	5 В	3,0-4,2 В
Максимальный потребляемый ток	180 мА	150 мА	50 мА
Рабочая температура	от -25 до 70 °С	от -20 до 70 °С	от -40 до 85 °С
Количество выводов	4	4	4
Количество символов для отображения	80	32	128x64 пикс.
Контроллер	HD44780	HD44780	SH1106
Количество градаций яркости	1	1	256
Тип интерфейса	I2C, SPI	I2C, SPI	I2C, SPI

LCD2004 – это жидкокристаллический дисплей с четырьмя строками по 20 символов в каждой, что позволяет отображать до 80 символов одновременно. Данный модуль оснащён интерфейсом I2C, что сокращает количество подключаемых проводов, облегчая интеграцию в проект. Особенности:

- возможность отображения текстовой информации;
- подсветка заднего фона, что обеспечивает комфортное чтение данных в условиях недостаточной освещенности.

Используется в проектах, где требуется вывод большого объема данных, например, в промышленных контроллерах, системах мониторинга и сложных микроконтроллерных устройствах [16].

LCD1602 – это жидкокристаллический дисплей с двумя строками по 16 символов. Данный модуль также оснащён интерфейсом I2C, что упрощает подключение и сокращает число задействованных пинов микроконтроллера [17]. Особенности:

- компактный размер и простота в использовании;
- отображение текстовой информации с базовыми параметрами.

Широко применяется в простых электронных устройствах, таких как умные дома, часы.

OLED128x64 – монохромный дисплей с матрицей из органических светодиодов (OLED) с диагональю экрана 33 мм (1,3 дюйма). Дисплей построен на базе контроллера SH1106. Дисплей способен отображать как текстовую информацию, так и графическую. Разрешение экрана составляет 128 на 64 точки. К преимуществам этого дисплея относится большой угол обзора, высокая контрастность, низкое энергопотребление, небольшой вес и габариты. Дисплей работает по шинам I²C, SPI. Информация взята из источника [18].

2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

2.1 Постановка задачи

В курсовом проекте необходимо разработать микропроцессорное устройство распознавания речи. Данное устройство должно выполнять следующие функции:

1) Преобразование звуковых колебаний в электрический сигнал. Устройство с помощью микрофона должно захватывать звуковые волны и преобразовывать их в аналоговый сигнал. Этот сигнал затем оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя. Необходимо применять алгоритмы фильтрации для удаления фонового шума. Дополнительно выполняется нормализация и подавление помех по энергетическому порогу, что позволяет отделить участки, содержащие речь

2) Извлечение акустических характеристик. Далее необходимо анализировать энергию и амплитуда сигнала, что позволит определить наличие речи и выделить активные речевые сегменты. Определяется фонетическая структура речи посредством выделения отдельных фонем – минимальных звуковых единиц, из которых состоят слова, что позволяет проводить сопоставление с эталонными шаблонами. Сигнал анализируется блоками по 32 выборки: вычисляются энергия, сложность, максимальная амплитуда и отношение сигнал/шум. Полученные показатели сравниваются с набором порогов, в результате чего каждой выборке присваивается символ одной из фонем e, o, v, h, s или f, а при отсутствии активности фиксируется пауза

3) Распознавание слова. Накопленная строка фонем сравнивается с тремя эталонными шаблонами словаря при помощи расстояния Левенштейна; если минимальная стоимость не превышает установленный предел, определяется наиболее вероятная команда. Такой алгоритм компенсирует различия в темпе и неточности анализа фонем.

4) Отображение распознанного слова на дисплее.

2.2 Компоненты проектируемого устройства

Компоненты структуры устройства необходимо выбирать исходя из функций, которые были описаны в постановке задачи. Компоненты проектируемого устройства представлены ниже.

1) Микроконтроллер – центральный элемент, который осуществляет обработку поступающих цифровых данных, реализует алгоритмы распознавания речи и управляет обменом информацией между всеми компонентами устройства.

2) Блок питания – источник стабилизированного напряжения для обеспечения необходимым напряжением элементов на схеме.

3) Модуль обработки звуковых колебаний – включает электретный микрофон с усилительным каскадом, которые преобразуют звуковые волны в аналоговый сигнал.

4) Пьезоэлектрический излучатель звука – преобразует цифровые управляющие импульсы микроконтроллера в акустические колебания на своей резонансной частоте, обеспечивая звуковую индикацию.

5) Модуль отображения информации – LCD-дисплей, предназначенный для вывода распознанного слова.

6) Средства визуальной индикации – светодиоды, которые используются для индикации состояния устройства.

7) Органы управления состоянием устройства – переключатель, обеспечивающий возможность управления режимами работы и запуска процесса распознавания.

2.3 Взаимодействие компонентов устройства

Работа устройства организована последовательным образом, обеспечивая плавное и надежное взаимодействие всех компонентов.

Сначала модуль захвата аудиосигнала, состоящий из микрофона с усилителем и фильтрующими элементами, преобразует звуковые волны в аналоговый электрический сигнал.

Полученный аналоговый сигнал поступает на вход АЦП микроконтроллера, где он оцифровывается с учетом заданной частоты дискретизации и разрешения, обеспечивая сохранение всех существенных характеристик исходного сигнала.

Далее цифровой сигнал передается в микроконтроллер, который посредством реализованных алгоритмов обработки сначала выделяет акустические признаки (энергию, максимальную амплитуду, отношению сигнал/шум, динамику сигнала), а затем выполняет сравнение извлеченных параметров с заранее прописанными эталонными шаблонами для определения наиболее вероятного слова.

Результат распознавания передается на модуль отображения, где он выводится на LCD-дисплей, а также индицируется с помощью светодиодов.

При отсутствии новых команд в течение пяти секунд индикаторы выключаются, на дисплее снова появляется приглашение к произношению слов.

Весь процесс работы устройства поддерживается стабильным питанием от блока питания, который распределяет необходимое напряжение по всей схеме.

Структурная схема устройства представлена в приложении А.

3 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

3.1 Обоснование выбора микроконтроллеров

Для выбора подходящего микроконтроллера устройству распознавания важно учитывать следующие ключевые требования:

1) вычислительная производительность – алгоритмы обработки аудиосигнала требуют значительных вычислительных ресурсов, поэтому микроконтроллер должен обладать ресурсом для реализации вычислительно интенсивных алгоритмов в реальном времени;

2) поддержка необходимых периферийных интерфейсов – устройство должно иметь достаточное количество аналоговых входов для подключения модуля захвата аудиосигнала (микрофона) и внешнего аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а также цифровых интерфейсов для связи с модулем отображения (LCD-дисплей) и средствами визуальной индикации (светодиоды);

3) достаточный объем памяти – микроконтроллер должен обладать достаточным объемом флеш-памяти для хранения алгоритмов распознавания и эталонных шаблонов;

4) программируемость и поддержка – микроконтроллер должен легко программироваться и иметь качественную документацию.

В рамках разработки микропроцессорного устройства распознавания речи важно правильно выбрать микроконтроллер, который станет основой системы.

В пункте 1.2 были рассмотрены микроконтроллер ATmega328 и наиболее популярные аналоги других производителей – nRF52840 и RP2040, которые отвечают задачам проектирования устройства.

В данном проекте была выбрана плата Arduino UNO. Изображение платы представлено на рисунке 3.1, а параметры данной платы представлены в таблице 3.1 Для составления таблицы были взяты данные из источника [19].

Таблица 3.1 – Параметры платы Arduino UNO

Параметр	Arduino Uno
Микроконтроллер	ATmega328
Поддерживаемые интерфейсы	SPI, I2C, UART, USB
Количество цифровых входов	14
Количество аналоговых входов	6
ШИМ	6
Флеш-память	32 КБ
ОЗУ	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Тактовая частота	16 МГц

Продолжение таблицы 3.1

Входное напряжение	7-12 В
Максимальный ток потребления	410 мА
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Рабочая температура	От -40 до +105 °С

Микроконтроллер ATmega328 имеет требуемую высокую производительность, низкое энергопотребление для проектируемого устройства. Кроме того, он имеет достаточное количество входов/выходов для подключения различных устройств и сенсоров, а также поддерживает различные интерфейсы связи, такие как UART, SPI и I2C. Благодаря хорошему сочетанию вычислительной мощности, простоты использования, низкому энергопотреблению и надёжности, ATmega328 является оптимальным выбором для реализации проекта. Изображение платы представлено на рисунке 3.1.

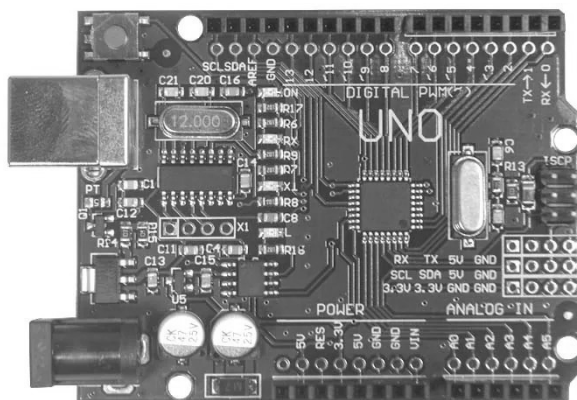


Рисунок 3.1 – Плата Arduino UNO

3.2 Обоснование выбора микрофона

Для сравнения были выбраны три модели электретных микрофонов: EM6050P, EM9767 и HMO0603B-65. В таблице 1.3 приведены их сравнительные характеристики.

Рассмотрев сравнительные характеристики микрофонов, представленных в таблице 1.3 обзора литературы. Был выбран EM6050P благодаря широкому частотному диапазону и сбалансированной чувствительности.

Микрофон способен эффективно захватывать как низкие, так и высокие частоты, что обеспечивает точное распознавание речевых сигналов. Чувствительность в диапазоне 32–44 мВ/Па позволяет устройству адекватно реагировать на голосовые команды.

EM6050P разработан для широкого спектра аудиозаписывающих устройств, что подтверждает его универсальность и устойчивость к эксплуатационным нагрузкам. Это особенно важно для систем распознавания

речи, где стабильность работы микрофона напрямую влияет на качество обработки звука.

Изображение EM6050P представлено на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Микрофон EM6050P

3.3 Обоснование выбора пьезоэлектрического излучателя звука

Для сравнения были выбраны три модели: МН-FMD, РКМ17ЕРР4001-В0 и СМТ-1604-SMT-TR. В таблице 1.4 приведены их сравнительные характеристики.

В качестве звукового индикатора в микропроцессорном устройстве распознавания речи был выбран МН-FMD. Рассмотрение её аналогов находится в пункте 1.4, а их параметры приведены в таблице 1.4.

Модель МН-FMD. имеет схожие параметры с аналогами, однако наряду с ними обладает рядом преимуществ.

1) Широкий диапазон питания и низкое потребление тока - допускает работу от 3 до 20 В, что позволяет использовать единый источник питания для микроконтроллера и излучателя звука.

2) Оптимальный уровень звукового давления - излучатель генерирует до 85 дБ на расстоянии 10 см при 5 В, что гарантирует чёткую слышимость короткого 1-секундного сигнала при старте устройства, даже в условиях умеренного фоновых шума.

3) Резонанс МН-FMD близок к частотному диапазону человеческой речи, что обеспечивает максимальную эффективность при воспроизведении коротких тоновых сигналов.

Изображение МН-FMD представлено на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Пьезоэлектрический излучатель звука МН-FMD.

3.4 Обоснование выбора органов световой индикации

Рассмотрев разные модели светодиодов для индикации состояния устройства распознавания речи (3 мм LED (Kingbright WP7113ID), 5 мм LED (Lite-On LTL-307EE), SMD LED 0805 (Osram OSL-80S)) и проведя сравнение (см. таблицу 1.5), был сделан выбор на светодиоде 3 мм LED (Kingbright WP7113ID), поскольку он обеспечивает оптимальное сочетание параметров для индикации состояния устройства. Данный светодиод характеризуется широким рабочим температурным диапазоном от -45 до 85 °C, что позволяет использовать его в различных условиях эксплуатации, а световой поток 40–60 мкд обеспечивает достаточную яркость при низком энергопотреблении. Компактные размеры и надежность этого светодиода способствуют его легкой интеграции в системы с ограниченным пространством. Изображение выбранного светодиода представлено на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Светодиод WP7113ID

3.5 Обоснование выбора органов управления состоянием устройства

В пункте 1.6 были рассмотрены аналоги переключателей: KCD1-11, DIPSW-68-5 и Omron D2FC-F-7N, параметры которых представлены в таблице 1.6. Переключатель KCD1-11 имеет схожие параметры с аналогами, однако наряду с ними обладает следующими преимуществами:

- обеспечивает высокую надежность и устойчивость к большим нагрузкам (до 1000 мА);
- реализует простую схему переключения между двумя состояниями (ON/OFF), что делает его идеальным для систем, где важна долговечность и стабильное переключение.

Исходя из вышеперечисленных факторов, был выбран переключатель KCD1-11 для устройства распознавания речи. Его надежность и простота управления способствуют интуитивным управлением режимов работы

устройства. Изображение выбранного переключателя представлено на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Переключатель KCD1-11

3.6 Обоснование выбора устройства отображения информации

В пункте 1.7 были представлены аналоги устройств отображения информации, а также в таблице 1.7 описаны их параметры. В ходе изучения параметров, было принято решение использовать жидкокристаллический дисплей LCD1602 для проектируемого устройства. Изображение LCD1602 представлено на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Жидкокристаллический дисплей LCD1602

Среди главных преимуществ дисплея LCD1602 можно выделить регулируемую контрастность. Также имеется модуль-переходник на основе микросхемы PCF8574AT (рисунок 3.7), которая предназначена для расширения количества линий ввода/вывода. Микросхема подключается по I2C интерфейсу и имеет порт из 8 линий ввода/вывода, принцип функционирования простой, при записи байта данных в микросхему, линии порта принимают уровни, соответствующие значениям битов полученного байта.



Рисунок 3.7 – Модуль-переходник на основе микросхемы PCF8574AT

3.7 Формулирование требований к источнику питания

Проектируемое устройство будет питаться от общего источника питания. Для расчета характеристик блока питания была составлена таблица 3.1

Таблица 3.1 – Характеристики модулей устройства

Модуль	Uпит, В	I _{max} , А	Р _{потр} , Вт
АТmega328	3,3	0,2	0,66
Микрофон ЕМ6050Р	5	0,01	0,05
Пьезоэлектрический излучатель звука	5	0,005	0,025
Светодиод	2,2	0,02	0,044
Дисплей LC1602	5	0,15	0,75

Для устройства нужен источник питания напряжением 5 В. Расчеты показали, что максимальный потребляемый ток равен 0,385 А, а потребляемая мощность 1,529 Вт. С учетом запаса по мощности необходимо внести поправку и увеличить это значение на 30%, таким образом мощность источника питания должна быть Р_{потр} = 2 Вт.

Далее, необходимо рассчитать минимальный выходной ток источника питания:

$$I_{\text{мин}} = P_{\text{ист}} / U_{\text{ист}} = 2,00 / 5,00 = 0.4 \text{ А}$$

Необходимо также учесть запас по току в 30%. Конечный ток для источника питания должен быть равен $I_{\text{ист}} = 0,52 \text{ А}$. Исходя из приведенных расчетов, источник питания для устройства распознавания речи должен иметь выходное напряжение 5 В и минимальный выходной ток 0,52 А.

3.8 Разработка функциональной схемы

После анализа и сравнения различных компонентов, включающих в себя микроконтроллер, микрофон, пьезоэлектрический излучатель звука, органы управления и индикации состоянием устройства, и дисплей, был выбран оптимальный набор для разработки устройства распознавания речи

Функциональная схема проектируемого устройства приведена в приложении Б.

4 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕВАТОРА

4.1 Микроконтроллер

Разработанная принципиальная схема приведена в приложении В.

Для обеспечения работы платы Arduino Uno требуется источник питания с выходным напряжением 5 В и минимальным выходным током 0,52 А, обоснование выбора данных значений приведено в разделе 3.7. Для формирования графического изображения платы с микроконтроллером на схеме необходимо ввести логические номера разъемов. Соответствие между логическими и физическими номерами приведены в таблице 4.1.

На рисунке 4.1 приведено схематического изображение контактов платы.

Таблица 4.1 – Соответствие логических и физических номеров разъемов

Название разъема на плате	Номер контакта	Логический номер разъема на схеме	Логический номер контакта	Комментарии
A0	0	1	100	Микрофон
A1	1		101	Пьезоэлектрический звукоизлучатель
A2	2		102	—
A3	3		103	—
A4	4		104	ЖК-дисплей через интерфейс I2C
A5	5		105	
RES	0	2	200	—
3.3 V	1		201	—
5 V	2		202	Подключение внешнего источника питания
GND	3		203	Общий провод (земля) для всех модулей
VIN	4		204	—
D0	0	3	300	—
D1	1		301	—
D2	2		302	Переключатель состояния устройства
D3	3		303	—
D4	4		304	—
D5	5		305	Светодиод
D6	6		306	Светодиод
D7	7		307	Светодиод

Продолжение таблицы 4.1

D8	8		308	—
D9	9		309	—
D10	10		310	—
D11	11	4	311	—
D12	12		312	—
SDA	0		400	—
SCL	1		401	—
GND	2		402	—

На принципиальной схеме плата представлена по координатам B06.

4.2 Микрофон

В таблице 4.2 представлено описание контактов микрофона с комментариями, уточняющие функциональное назначение.

Таблица 4.2

Номер контакта	Вывод на плате	Комментарий
1	VCC	Питание
2	GND	Земля
3	OUT	Аналоговый выход

На принципиальной схеме плата представлена по координатам A01.

4.3 Пьезоэлектрический излучатель звука

В таблице 4.3 представлено описание контактов АЦП с комментариями, уточняющие функциональное назначение.

Таблица 4.3

Номер контакта	Вывод на плате	Комментарий
1	VCC	Питание
2	GND	Земля
3	OUT	Аналоговый выход

На принципиальной схеме плата представлена по координатам E01.

4.4 Дисплей

В таблице 4.4 представлено описание контактов дисплея с комментариями, уточняющие функциональное назначение.

Таблица 4.4

Номер контакта	Вывод на плате	Комментарий
1	VSS	Земля
2	VDD	Питание
3	VO	Регулировка контрастности
4	RS	Выбор регистра
5	RW	Режим чтения/записи
6	E	Строб (сигнал разрешения данных)
7	D0	Цифровой вывод
8	D1	Цифровой вывод
9	D2	Цифровой вывод
10	D3	Цифровой вывод
11	D4	Цифровой вывод
12	BLA	Анод подсветки
13	BLK	Катод подсветки

На принципиальной схеме плата представлена по координатам B15

4.5 Расширитель цифровых входов PCF8574AT

В таблице 4.5 представлено описание контактов расширителя цифровых входов для дисплея с комментариями, уточняющие функциональное назначение.

Таблица 4.5

Номер контакта	Вывод на плате	Комментарий
1	VSS	Земля
2	VDD	Питание
3	VO	Регулировка контрастности
4	RS	Выбор регистра
5	RW	Режим чтения/записи
6	E	Строб (сигнал разрешения данных)
7	D0	Цифровой вывод
8	D1	Цифровой вывод
9	D2	Цифровой вывод
10	D3	Цифровой вывод

Продолжение таблицы 4.5

11	D4	Цифровой вывод
12	BLA	Анод подсветки
13	BLK	Катод подсветки

На принципиальной схеме плата представлена по координатам В11.

4.6 Органы индикации

Информация о выбранных светодиодах представлена в пункте 3.7 раздела 3. Светодиоды подключаются к заземляющему выходу GND и к цифровым выходам D10, D11, D12. Исходя из пункта 4.2 для корректной работы подключение к цифровым выходам происходит через токоограничивающий резистор.

4.7 Расчет токоограничивающего сопротивления для светодиодов

В данном устройстве используется 3 светодиода. Для ограничения тока, проходящего через них, будут использованы резисторы, номинал которых рассчитывается по формуле 4.1:

$$R = \frac{U_{\text{пит}} - U_{\text{пад}}}{I_{\text{пр}}} \quad (4.1)$$

где $U_{\text{пит}}$ – напряжения питания, $U_{\text{пад}}$ – напряжение, падающее на светодиоде, $I_{\text{пр}}$ – прямой ток светодиода.

В устройстве используются светодиоды со следующими параметрами: $I_{\text{пр}} = 20\text{мА}$, $U_{\text{пад}} = 3.0\text{В}$.

Значение сопротивления равно:

$$R = \frac{5 - 3}{0.02} = 100 \text{ Ом} \quad (4.2)$$

Следовательно, для того, чтобы светодиод не перегорел он должен быть подключен через резистор с сопротивлением не менее 100 Ом.

Схема подключения светодиодов приведена на рисунке 4.1.

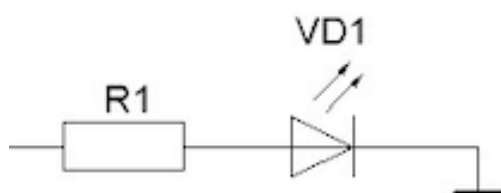


Рисунок 4.1 — Схема подключения светодиодов

5 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

5.1 Требования к разработке программного обеспечения

Программа, управляющая микропроцессорным устройством распознавания речи, должна реализовывать следующий функционал:

- преобразование звуковых волн в электрический сигнал;
- оцифровка аудиосигнала;
- обработка и выделение акустических характеристик;
- классификация фонем и формирование слова;
- сравнение слова с эталонными шаблонами;
- вывод информации на дисплей.

Организация работы устройства начинается с его включения, при котором происходит запуск и калибровка микрофона для определения фонового уровня шума. После подачи питания устройство выполняет процедуру калибровки, а соответствующие светодиоды мигают в течение 5 секунд, пьезоэлектрический излучатель звука издает короткий 1-секундный сигнал. Затем устройство переходит к непрерывному сбору и обработке аудиосигнала. Затем, микроконтроллер обрабатывает полученный цифровой сигнал, вычисляет его мощность, применяет фильтрацию, рассчитывает коэффициенты сложности и на основе установленных пороговых значений выделяет фонемы. Отдельные фонемы последовательно объединяются в слово до тех пор, пока не наступит период тишины или не заполнится буфер. После формирования слова применяется алгоритм сравнения, с использованием расстояния Левенштейна, который сопоставляет полученную последовательность фонем с заранее записанными эталонными шаблонами, выбирая слово, наиболее близкое по характеристикам к распознаваемому. Результат распознавания выводится на LCD-дисплей. Если устройство не получает достаточной информации, например, при отсутствии звука, или слово не удовлетворяет критериям распознавания, оно продолжает работу в обычном режиме без дополнительной индикации.

5.2 Схема программы

Блок-схема представляет собой графическое отображение последовательности операций, выполняемых устройством распознавания речи. Далее, идет алгоритм описание блоков схемы программы, представленной в приложении Д.

1. Начало.
2. Инициализация переменных и констант, используемых программой.
3. Инициализация входных и выходных значений.
4. Калибровка микрофона: сбор выборок фонового шума, вычисление и сохранение среднего значения.

5. Включение индикатор работы устройства.
6. Выключение индикатора работы устройства.
7. Очистка экрана, вывод начального текста на экран.
8. Считывание новой выборки звука с микрофона.
9. Вычисление суммарной мощности аудиосигнала
10. Условный оператор: если мощность сигнала больше порога, то переход на шаг 11, иначе переход на шаг 20.
11. Вычисление сложности сигнала – отношение суммы модулей разностей соседних выборок к мощности.
12. Сдвиг значений в массиве истории коэффициентов и запись нового значения сложности.
13. Вычисление среднего коэффициента фильтрации по элементам массива истории.
14. Расчёт экспоненциально сглаженной мощности микрофона с использованием максимальной амплитуды выборок.
15. Условный оператор: если средний коэффициент меньше порога $e_{constant}$, то фонема = 'e' и переход на шаг 18, иначе переход на шаг 16.
16. Условный оператор: если средний коэффициент меньше порога $a_{constant}$, то фонема = 'o' и переход на шаг 18, иначе переход на шаг 17.
17. Условный оператор: если средний коэффициент меньше порога $v_{constant}$, то фонема = 'v', иначе фонема = 'h'.
18. Условный оператор: если средний коэффициент меньше порога $sh_{constant}$, то оставить выбранную фонему, иначе установить фонему 's'.
19. Условный оператор: если флаг для замены фонемы установлен и мощность микрофона превышает $f_{constant}$, то изменить фонему на 'f'.
20. Возврат распознанной фонемы или, если мощность сигнала меньше порога, возвращение пробела.
21. Добавление полученного символа (фонемы или пробела) в буфер формирования команды.
22. Условный оператор: если полученный символ – пробел или буфер заполнен, то переход на шаг 23, иначе переход на шаг 26.
23. Условный оператор: если буфер с накопленной строкой не пуст, то переход на шаг 24, иначе переход на шаг 26.
24. Обработка накопленного слова (сравнение с предопределёнными паттернами команд).
25. Условный оператор: если слово совпадает с одним из паттернов, то выполняем шаг 26
26. Выполнение соответствующей команды: вывод текста на LCD-дисплей, включение нужного светодиода и выключение остальных.
27. Обновление времени последнего распознавания команды и сброс флага бездействия.

28. Очистка буфера команды и обнуление индекса накопления символов.
29. Условный оператор: если с момента последнего распознавания прошло более 5 секунд, то переход на шаг 30.
30. Выключение всех светодиодов и очистка дисплея.
31. Вывод на дисплей сообщения о повторном вводе голоса.
32. Установка флага, указывающего, что режим бездействия выведен.
33. Переход к началу основного цикла работы программы для обработки следующей выборки звука.
34. Если поступает новый голосовой сигнал, повторение шагов 8–29.
35. Конец.

5.3 Программа управления устройством

Для написания программы используется интегрированная среда разработки Arduino. Данная среда предоставляет удобные средства разработки. При разработке программы используются следующие библиотеки:

- LiquidCrystal_I2C.h (для управления LCD дисплеем);
- Wire.h (для поддержки интерфейса I2C);
- uSpeech.h (для алгоритма распознавания слов);

Данные библиотеки удобны в использовании и, несомненно, облегчают разработку программного обеспечения устройств.

Код программы представлен в приложении Е.

5.4 Описание исходного кода программы

Для лучшего понимания работы программы следует пояснить исходный код:

строки 1–15 (блок 2): подключение библиотек для работы с Arduino, строками, математическими функциями и общим функционалом;

строки 16–27 (блок 2): определение констант, используемых в программе, необходимых для обработки аудиосигнала (установка порога тишины, порога для фонемы f и значений для анализа звука);

строки 27–90 (блок 2): объявление класса signal, реализующего алгоритм распознавания речи: в этом блоке создаётся буфер из 32 выборок звука, определяются переменные для расчёта средней мощности сигнала, тестового коэффициента для отладки, пороговые значения и коэффициенты для фильтрации, а также описываются методы выборки звука, вычисления суммарной мощности, расчёта «сложности» сигнала, калибровки микрофона и определения фонемы;

строки 91–144 (блок 2): объявление класса statCollector, предназначенного для накопления статистических данных аудиосигнала (среднего значения

и моментов распределения), с реализацией методов расчёта куртоза и асимметрии;

строки 148–216 (блоки 10...15): объявление класса `syllable` для аккумуляции фонем (слогов) с целью базового распознавания слов: здесь задаются счетчики для различных фонем, переменные для хранения пиковых значений и модальности, а также реализуются методы сброса и классификации входных символов;

строки 242–400 (блоки 4, 9, 10, 12, 15): реализация алгоритма распознавания фонемы в методе `getPhoneme` класса `signal`: сначала производится выборка аудиоданных и вычисление суммарной мощности сигнала, затем — условный оператор, сравнивающий мощность с пороговым значением (если мощность выше, происходит дальнейший анализ, иначе возвращается пробел); далее вычисляется «сложность» сигнала, обновляется история коэффициентов, определяется средний коэффициент фильтрации и мощность с экспоненциальным сглаживанием, после чего последовательными условными операторами выбирается фонема (сравнение со значениями для 'e', 'o', 'v', 'h', 's') и, при необходимости, заменяется на 'f' — далее возвращается распознанный символ;

строки 402–440 (блоки 4, 10...29): реализация дополнительных методов класса `signal`, включающих калибровку микрофона (сбор выборок фонового шума и расчет среднего уровня), выборку звука с учетом калибровки, вычисление суммарной мощности, «сложности» сигнала, определение максимальной амплитуды выборок и расчет отношения сигнал/шум;

строки 553–599 (блоки 10...25): реализация конструктора и методов класса `syllable` для сброса и накопления значений фонем, а также для классификации входных символов (с обновлением соответствующих счетчиков и временных накопителей);

строки 603–664 (блоки 14...28, 32): реализация методов класса `statCollector` для накопления и расчёта статистических параметров аудиоданных;

строки 665–694 (блок 2): подключение дополнительных библиотек и определение пинов для светодиодов, а также макроса `MIN3`, необходимого для вычислений;

строки 695–733 (блок 2): создание объектов для работы с микрофоном (объект `voice` класса `signal`) и LCD-дисплеем (объект `lcd` класса `LiquidCrystal_I2C`);

строки 732–737 (блок 3): определение буфера для формирования голосовой команды, создание словаря паттернов команд и установка переменных для контроля бездействия;

строки 739–793 (блоки 14...28): реализация функций для вычисления длины строки до пробела (`strLength`), расчёта расстояния между строками (`levenshtein`) и определения наиболее похожего паттерна команды (`guessWord`);

строки 795–832 (блоки 29...31): реализация функции обработки распознанной команды: сравнение накопленного слова с заданными паттернами, вывод результата на LCD-дисплей и управление светодиодами;

строки 834–899 (блоки 4...8): пошаговый запуск устройства;

строки 900–923 (блоки 8...10): бесконечный цикл программы выборка звука с микрофона, распознавание фонемы, накопление символов в буфере, условный оператор для обработки накопленного слова;

строки 925–950 (блоки 25...35): реализация условий контроля бездействия: если с момента последнего распознавания прошло более 5 секунд, то происходит выключение всех светодиодов, очистка LCD-дисплея, вывод приглашения к повторному голосовому вводу и установка соответствующего флага, после чего цикл обработки повторяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы над данным курсовым проектом было разработано устройство распознавания речи, которое осуществляет обработку аудиосигнала, выделяет фонемы и преобразует их в слова.

Устройство способно:

- преобразовывать звуковые колебания в электрический сигнал;
- извлекать из аудиосигнала ключевые акустические характеристики для выделения фонем;
- сравнивать извлечённые признаки с заранее прописанными эталонными шаблонами для определения распознаваемого слова;
- отображать результат распознавания на дисплее.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Документация ATmega328P [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.rlocman.ru/i/File/2018/03/11/ATmega328P_1.pdf – Дата доступа: 10.01.2025
2. Документация nRF52840 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://content.arduino.cc/assets/Nano_BLE_MCU-nRF52840_PS_v1.1.pdf – Дата доступа : 10.01.2025
3. Документация RP2040 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf> – Дата доступа: 10.01.2025
4. Документация EM6050P [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/354/DOC004354852.pdf> – Дата доступа: 10.01.2025
5. Документация EM9767 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/354/DOC004354865.pdf> – Дата доступа: 10.01.2025
6. Документация НМО0603В-65 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/054/DOC000054701.pdf> – Дата доступа: 10.01.2025
7. Документация МН-FMD [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://e-gizmo.net/oc/kits%20documents/High%20Quality%20Passive%20Buzzer/High%20quality%20passive%20buzzer.pd> – Дата доступа: 10.01.2025
8. Документация PKM17EPP4001-B0 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.mouser.de/ProductDetail/Murata-Electronics/PKM17EPP-4001B0?qs=MJkvBGm52huMCXTq9F1D2A%3D%3D&srsltid=AfmBOopoS9cNLJ7T4Ab-MAVu7nno9yMxQXy_hGX5edSK59QMiumgTf – Дата доступа: 10.01.2025
9. Документация CMT-1604-SMT-TR [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.mouser.com/ProductDetail/Same-Sky/CMT-1604-SMTTR?qs=WyjlAZoYn52rNJrtL4Fm5A%3D%3D&srsltid=AfmBOoreTIfb737bWV0ITg6noMBP_qLP8bHlzsqqT14aUM3iHkhur7bo – Дата доступа: 10.01.2025
10. Документация WP7113ID [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/233663/KINGBRIGHT/WP7113ID.html> – Дата доступа: 10.01.2025
11. Документация LTL-307EE [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.tme.eu/pl/details/ltl-307ee/diody-led-tht-okragle/liteon/> – Дата доступа: 10.01.2025
12. Документация OSL-80S [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://docs.rs-online.com/28d4/A700000006637388.pdf> – Дата доступа: 10.01.2025

13. Документация KCD1-11 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.chinadaier.com/wp-content/uploads/2017/08/Rocker-switch.pdf> – Дата доступа: 10.01.2025
14. Документация DIPSW-68-5 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://eu.mouser.com/c/ds/electromechanical/switches/dip-switches-sipswitches/?contact%20form=DPST&switch%20type=DIP> – Дата доступа: 10.01.2025
15. Документация D2FC-F-7N [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.datasheetmeta.com/search.php?q=D2FC-F-7N> – Дата доступа: 10.01.2025
16. Документация LCD2004 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://uk.beta-layout.com/download/rk/RK-10290_410.pdf – Дата доступа: 10.01.2025
17. Документация LCD1602 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.waveshare.com/datasheet/LCD_en_PDF/LCD1602.pdf – Дата доступа: 10.01.2025
18. Документация OLED128x64 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cdn.velleman.eu/downloads/29/infosheets/sh1106_datasheet.pdf – Дата доступа: 11.01.2025
19. Arduino UNO [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> – Дата доступа: 11.01.2025

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Схема структурная

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Схема функциональная

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Схема электрическая принципиальная

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)

Перечень элементов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(обязательное)

Схема программы

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
(обязательное)

Исходный текст программы

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж
(обязательное)

Ведомость документов