

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Промышленная электроника
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему _____ Терменвокс _____

Обучающийся

К.Е. Флоров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

И.И. Золотов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Название бакалаврской работы "Терменвокс".

Работа состоит из пояснительной записки на 45 страницах, включающей 42 рисунка, список литературы из 21 наименований, в том числе 6 иностранных источников, 2 приложения и графическую часть на 6 листах формата А1.

Целью выполнения выпускной квалификационной работы является повышение уровня заинтересованности потенциальных абитуриентов при выборе профильных направлений подготовки к специальностям, связанным с электроникой и автоматизацией по средствам разработки и проектирования демонстрационного стенда "Терменвокс".

В первой части работы рассмотрены общие понятия о таком устройстве как терменвокс. Рассмотрены принципы работы традиционного терменвокса и существующие разновидности данного устройства.

Во второй части выпускной квалификационной работы рассматривается аппаратная платформа, выбранная для реализации проекта и вся необходимая компонентная база с разработанными схемотехническими решениями. Рассматриваются разработанные принципы и алгоритмы фиксации изменения емкости измеряемой системы, перевода полученных значений в частоту генерируемого сигнала, а также способ модуляции звукового сигнала.

В третьей части рассмотрена структура взаимодействия между составными частями терменвокса и принцип их работы. Представлено разработанное программное обеспечение для управления устройством.

В четвертой главе был рассмотрен вариант исполнения корпуса для электрической части терменвокса из распределительной коробки IP55, а также спроектирован собственный корпус для электроники при помощи среды разработки Компас 3D

Результатом выполнения данной работы является готовый программно-аппаратный комплекс для реализации демонстрационного стенда терменвокс.

Abstract

The title of the bachelor's thesis is "Termenvox".

The work consists of an explanatory note on 45 pages, including 42 figures, a list of literature of 21 titles, including 6 foreign sources, 2 appendices and graphic part on 6 sheets of A1 format.

The purpose of fulfillment graduate qualification work is to increase the level of interest potential entrants in the choice of profile directions of training to the specialties related to electronics and automation by means of development and design of the demonstration stand "Termenvox".

In the first part of the work general concepts of such a device as a termenvox are considered. Considered principles of operation of the traditional termenvox and existing varieties of this device.

In the second part of the final qualification work considers the hardware platform selected for the project and all the necessary component base with the developed circuitry solutions. The developed principles and algorithms of fixing the change in the capacitance of the measured system, translation of the obtained values into the frequency of the generated signal, as well as the method of modulation of the audio signal are considered.

In the third part the structure of interaction between the constituent parts of the termenvox and the principle of their operation are considered. The developed software for controlling the device is presented.

In the fourth chapter the variant of execution of the enclosure for the electrical part of the termenvox from the IP55 junction box was considered, and also the own enclosure for electronics was designed using the Compass 3D development environment

The result of this work is a ready software and hardware complex for the realization of the demonstration stand termenvox.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	6
1.1 Обзор существующих технологий и решений.....	6
1.1.1 Общие понятия о терменвоксе	6
1.1.2 Классификация и виды терменвоксов	9
1.1.3 Анализ данных по проекту и определение его концепции.....	12
2 Разработка терменвокса.....	14
2.1 Аппаратное обеспечение терменвокса	14
2.2 Компонентная база терменвокса	18
2.2.1 Система измерения емкости	19
2.2.2 Система модуляции звукового сигнала	35
3 Система управления терменвокса	38
3.1 Алгоритм определения емкости и модуляции звукового сигнала	38
3.2 Разработка программы управления	39
4 Разработка корпуса устройства.....	41
Заключение	43
Список используемой литературы.....	44
Приложение А Перечень элементов к схеме электрической принципиальной терменвокса.....	46
Приложение Б Программный код системы управления терменвокса.....	47

Введение

В настоящее время электроника и автоматизация являются одними из самых востребованных специализаций. Работу любого современного промышленного предприятия сложно представить без инженеров-электроников, инженеров АСУТП и КИПиА. Именно данные специалисты поддерживают и обеспечивают корректную работоспособность автоматизированных систем и электроники на предприятии. Данные специалисты востребованы абсолютно на всех предприятиях совершенно разных кластеров.

Несмотря на общую тенденцию активного развития электроники на рынке труда наблюдается острый дефицит квалифицированных кадров. Обучение инженеров в данной отрасли является крайне долгим и ресурсозатратным процессом, помимо того, требует от будущего специалиста полной отдачи и вовлеченности в процесс. На фоне активно изменяющегося рынка электроники и автоматизации, а также новых тенденций, способов, готовых решений и оборудования будущий специалист должен быть готов находиться в постоянном процессе повышения квалификации и обучения в том числе и на непосредственном рабочем месте. Такого эффекта можно добиться только тогда, когда человек остро заинтересован в профессиональном росте и развитии в выбранном направлении. Для лучшего результата данную заинтересованность необходимо сформировать задолго до начала обучения в профильном высшем учебном заведении, например, при проведении обучающих семинаров, предпрофильных подготовок и дней открытых дверей

Целью выполнения выпускной квалификационной работы является повышение уровня заинтересованности потенциальных абитуриентов при

выборе профильных направлений подготовки к специальностям, связанным с электроникой и автоматизацией по средствам разработки и проектирования демонстрационного стенда "Терменвокс".

1 Состояние вопроса

1.1 Обзор существующих технологий и решений

1.1.1 Общие понятия о терменвоксе

Терменвокс является единственным в мире бесконтактным музыкальным инструментом. В классическом терменвоксе управление воспроизведением звука осуществляется в результате перемещения рук исполнителя в наведенном электромагнитном поле вблизи двух специализированных антенн фиксаторов. Изменение тональности воспроизводимого звука происходит за счет приближения или отдаления руки исполнителя к одной из антенн терменвокса, а изменение громкости фиксируется и осуществляется при взаимодействии с другой [6]. На рисунке 1 представлен классический терменвокс.



Рисунок 1 – Терменвокс

В основе работы терменвокса лежит исследования принципа диэлектрической постоянной газов. Термен в данном исследовании выдвинул предположение о том, что воздух, как и любой токопроводящий объект и среда может выступать в роли конденсатора, а изменяя емкость такого конденсатора можно влиять на частоту электрических колебаний. Действительно, существует непосредственная связь между емкостью конденсатора и частотой колебаний системы, в которой он находится. Таким образом, чем больше емкость используемого конденсатора, тем меньше частота колебаний и наоборот. Объясняется это тем, что конденсатору большей емкости требуется сообщить большее количество заряда в течении более длительного времени. На рисунке 2 представлен простейший колебательный контур с расчетной формулой, отображающей зависимость между емкостью конденсатора и частотой электромагнитных колебаний контура.

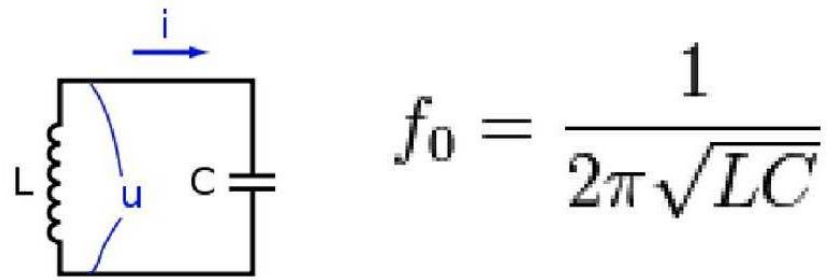


Рисунок 2 – Колебательный контур

При игре на данном музыкальном инструменте человеческое тело и само непосредственно становится конденсатором, включенным в цепь между антенной и генератором. Таким образом, емкость тела исполнителя начинает оказывать непосредственное влияние на работу системы и генерацию сигнала. В результате вмешательства в систему изменяется частота генерируемых колебаний. На рисунках 3 и 4 представлены функциональная и электрические схемы классического терменвокса соответственно.

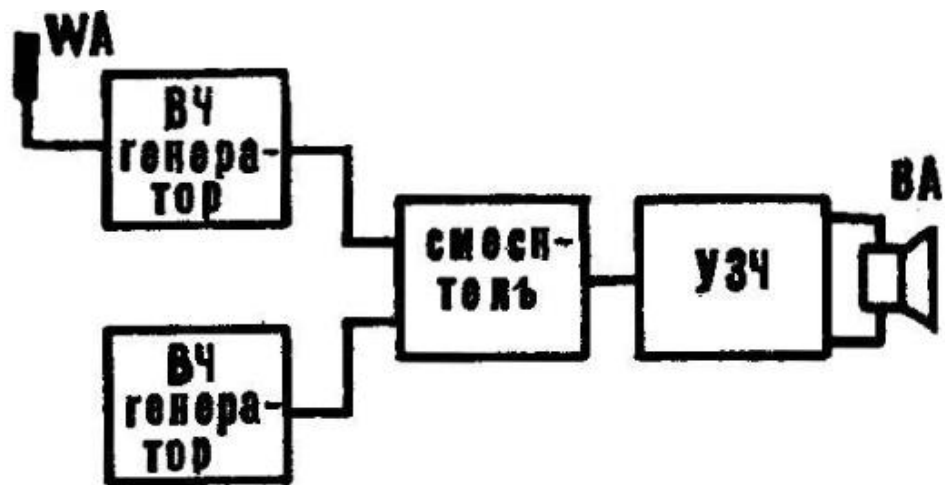


Рисунок 3 – Функциональная схема терменвокса

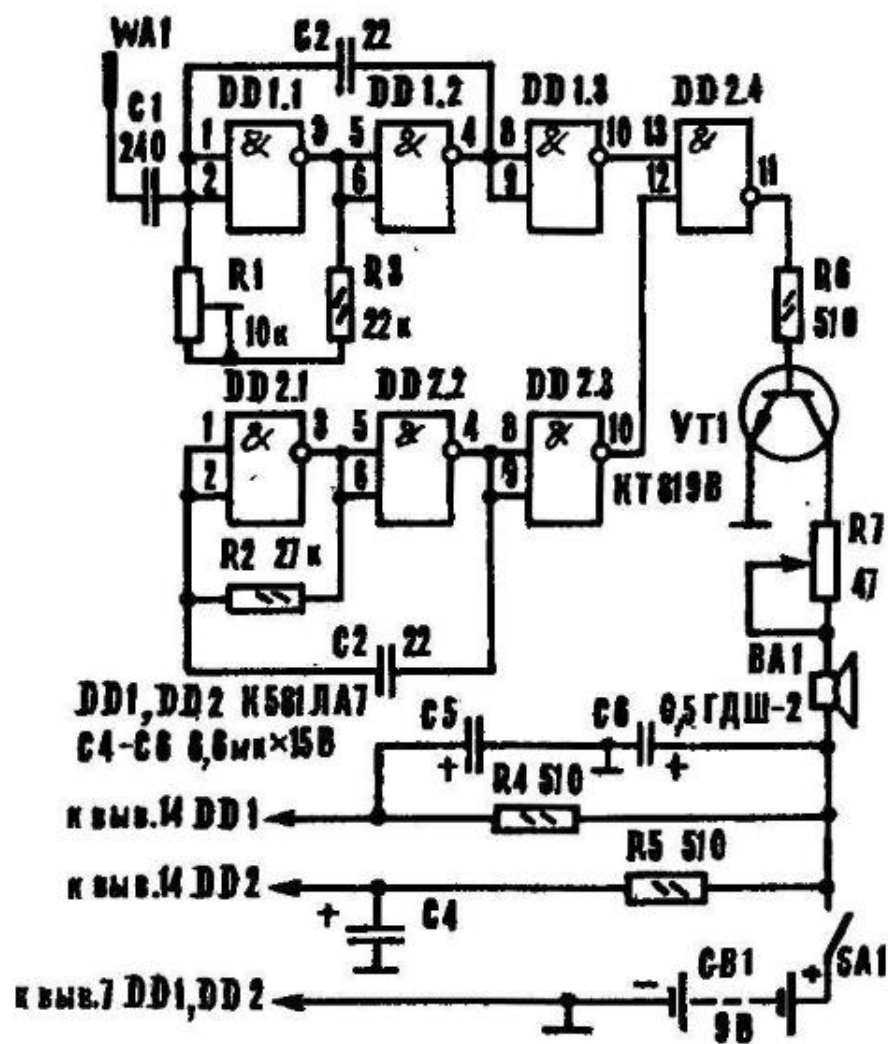


Рисунок 4 – Электрическая схема терменвокса

Непрерывное изменение расстояния между ладонью и антенной варьирует емкостные параметры частотодающей цепи верхнего по схеме генератора, что в свою очередь изменяет частоту биений и инструмент воспроизводит звуки различной тональности.

Стоит отметить, что на основе терменвокса создавались и охранные системы для промышленных помещений и складов. Такие устройства реагировали на изменение картины электрического поля на охраняемом объекте и при фиксации его изменения генерировали сигнал тревоги.

1.1.2 Классификация и виды терменвоксов

Работа всех терменвоксов основана на одних и тех же физических принципах, поэтому классификация и разновидности данного устройства

выделяются достаточно условно и в основном отличаются лишь особенностями управления, настройками режима работы, форм-фактором и схематическими решениями. Таким образом выделяют классический терменвокс, рассмотренный нами выше, терменвокс системы Ковальского, матремин и виртуальный терменвокс.

В терменвоксе системы Ковальского регулирование тональности звука осуществляется движением правой руки, левой рукой исполнитель регулирует общие звуковые характеристики при помощи функциональных кнопок и регуляторов, расположенных на корпусе устройства. Громкость звука регулируется нажатием на специализированную педаль. На рисунке 5 представлен терменвокс системы Ковальского.



Рисунок 5 – Терменвокс системы Ковальского

Матремин в свою очередь представляет собой более сложное в реализации устройство с возможностью автоматического регулирования громкости. На рисунке 6 представлен матремин.



Рисунок 6 – Матремин

Виртуальный терменвокс представляет собой специализированное программное обеспечение для смартфона или персонального компьютера, оборудованного сенсорным экраном. Программное обеспечение выводит на экран график в прямоугольной системе координат, на осях которого отображается частота и громкость воспроизводимого звука. При взаимодействии с сенсорным экраном программа определяет координату точки касания и переводит ее в громкость и частоту звука, который необходимо воспроизвести. Существуют и более интерактивные программы, позволяющие имитировать перемещение рук исполнителя. На рисунке 7 представлена рабочая среда виртуального терменвокса.



Рисунок 7 – Виртуальный терменвокс

Помимо этого, существуют оптические системы, имитирующие работу терменвокса. Они основываются на фотоэффекте элементов электрической цепи, к примеру, изменение уровня освещенности фоторезистора имитирует изменение емкости системы и влияет на тональность или громкость воспроизводимого звука. Простейший пример такой системы представлен на рисунке 8.

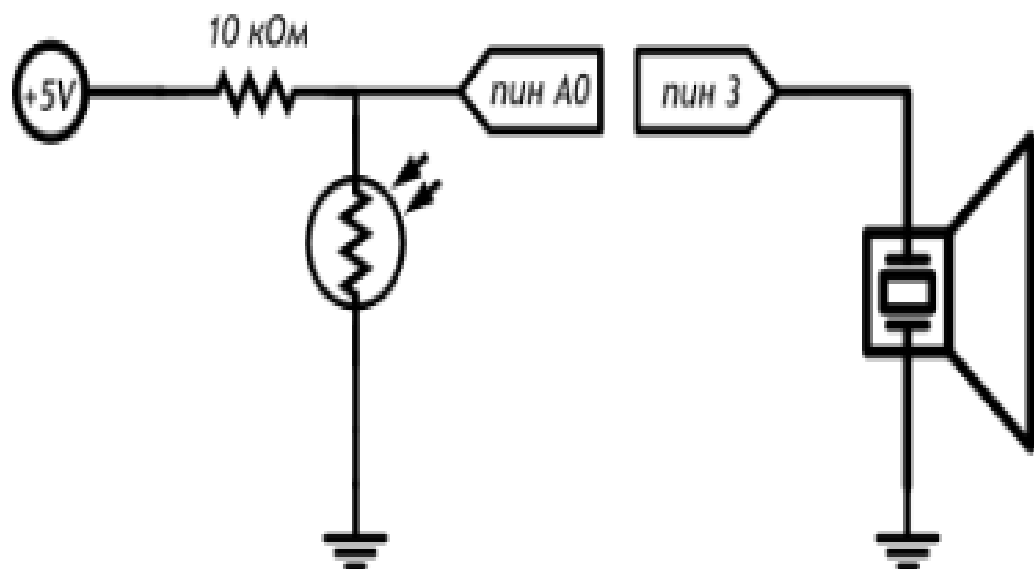


Рисунок 8 – Схема простейшего оптического терменвокса

Представленная выше система реагирует на изменение интенсивности излучения окружающего освещения при помощи LDR датчика тем самым регулируя напряжение, подаваемое на динамик, изменяя громкость и тональность генерируемого звука.

1.1.3 Анализ данных по проекту и определение его концепции

Для выполнения выпускной квалификационной работы были исследованы данные о принципах работы терменвокса, его разновидностях и существующих решениях. Информация, полученная в ходе анализа, в дальнейшем будет использована при разработке и проектировании нашего устройства.

Согласно техническому заданию, в рамках выполнения выпускной квалификационной работы необходимо разработать техническое решение для физической реализации терменвокса. Напряжение питания системы управления, а также напряжение цепей управления должно составлять 5 В.

Разработанное устройство должно отличаться гибкостью и функциональностью. Нарботки, схемы, алгоритмы и программы, разработанные в рамках выполнения выпускной квалификационной работы, должны предоставлять исчерпывающую информацию для последующей сборки и эксплуатации демонстрационного стенда «Терменвокс».

При выборе устройства управления для реализации системы управления терменвоксом решено было отдать предпочтение микроконтроллерам AVR архитектуры и отладочным платам на их основе, как наиболее доступным, дешевым и простым в использовании. При выборе микроконтроллера особое предпочтение будет отдаваться устройствам с существующими, функциональными и удобными специализированными системами разработки и программирования.

В ходе входе проведения анализа рынка готовых решений и разработок, а также полученных из технического задания вводных данных

был сформирован список необходимый список задач, которые требуются для выполнения поставленной цели:

- разработка структуры устройства;
- подбор необходимой компонентной базы;
- разработка электрических связей в терменвоксе;
- разработка электронных связей в терменвоксе;
- реализация электронных и электрических связей в терменвоксе.

Выводы по разделу

После постановки цели выполнения выпускной квалификационной работы и определения необходимых к решению задач был проведен анализ тем, связанных с терменвоксами и принципом их работы. Была обозначена основная концепция разработки, исходя из которой в дальнейшем нами будет производиться проектирование и разработка всех необходимых составляющих устройства.

2 Разработка терменвокса

2.1 Аппаратное обеспечение терменвокса

В данном разделе выпускной квалификационной работы необходимо было подобрать всю необходимую аппаратную составляющую разрабатываемого устройства, проработать и спроектировать электрические связи и скомпоновать аппаратную часть системы управления [1-4].

Основополагающими факторами при выборе системы управления обычно являются:

- вычислительная мощность и технические характеристики устройства управления, необходимые для взаимодействия с конкретным объектом

управления;

- гибкость и доступность систем разработки;
- доступность и приемлемая стоимость устройства управления.

Однако, в рамках выполнения данного проекта в качестве объекта управления не будут использованы сложные динамические системы или иные системы, имеющие критическую зависимость от быстродействия системы управления. Поэтому данный фактор носит лишь рекомендательный характер, как критерий регламентирующий общие правила выбора и построения систем управления и автоматических систем [5].

Руководствуясь всем вышеперечисленными, невозможно оставить без внимания аппаратные платформы от компании Arduino [7-9]. Отладочные платы данной компании в последние годы нашли широкое применение в сфере проектирования и прототипирования разнообразных электронных устройств и систем управления реальными объектами.

Arduino предоставляет своим пользователям широкий спектр в области обработки, приема и передачи различных аналоговых и дискретных сигналов, наличие огромного количества возможностей и специализированных библиотек для управления устройствами, а также большой перечень периферийных устройств, интерфейсных плат, плат расширения и большое разнообразие совместимых с платформой датчиков. Помимо того, для взаимодействия с Arduino разработчики предоставляют достаточно функциональное, простое и главное открыто доступное специализированное программное обеспечение [10-14].

На момент проведения анализа на рынке находилось огромное количество разновидностей плат как от самой компании Arduino, так и их аналогов, совместимых с Arduino и ее средой разработки. Все представленные платы и модули отличаются как габаритными размерами и форм-фактором, так и основными рабочими и техническими характеристиками

В ходе анализа доступных аппаратных платформ, руководствуясь техническими характеристиками и ценовыми показателями, для реализации системы управления разрабатываемым устройством была выбрана отладочная плата Arduino UNO, как полностью удовлетворяющая наши требования [15]. На рисунке 9 представлена информация о входах и выходах выбранной аппаратной платформы.

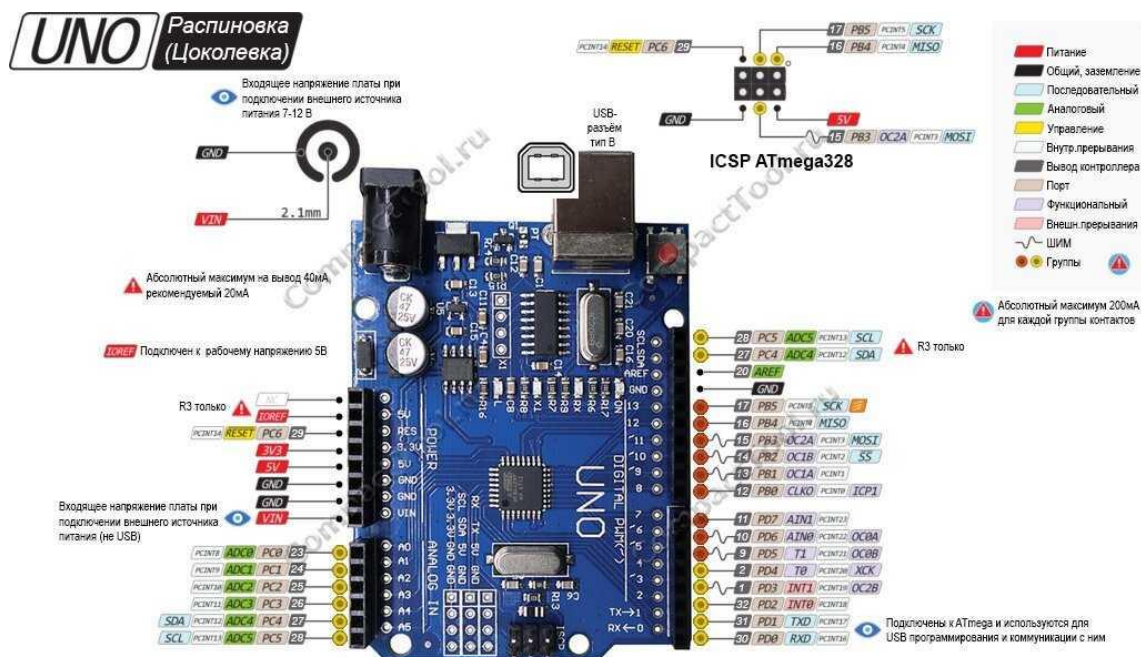


Рисунок 9 – Вывода аппаратной платформы Arduino UNO

Аппаратная платформа Arduino UNO базируется на чипе ATmega328. Данная микросхема является 8-и битным микроконтроллером AVR архитектуры с максимальной рабочей частотой порядка 20 МГц. Микроконтроллер Atmel AVR на базе RISC сочетает в себе 32 КБ флеш памяти, ISP с реализованной возможностью чтения данных во время записи, более 30 рабочих регистров общего назначения, более 20 каналов ввода-вывода, несколько таймеров и счетчиков, 10-и битный АЦП, а также поддерживает возможность внешних и внутренних прерываний. Непосредственное взаимодействие с микроконтроллером обеспечивается

через программируемый интерфейс USART. На рисунках 10 и 11 представлены микроконтроллер ATmega328 и некоторые его технические характеристики соответственно.

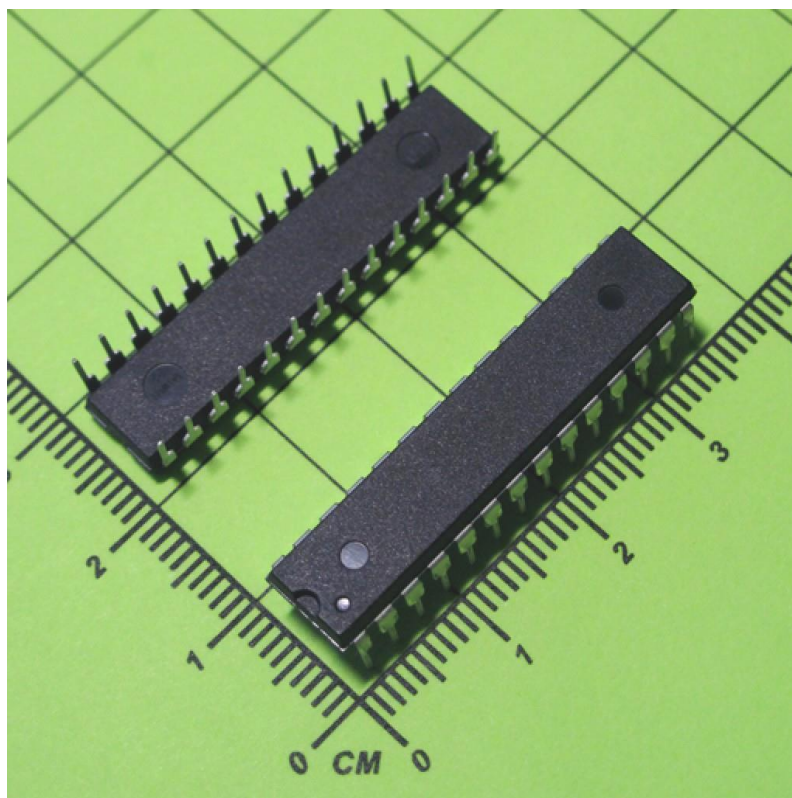


Рисунок 10 – Микроконтроллер ATmega328

Параметр	Значение
Тип процессора	8-битный AVR
Флэш-память	32 КБ
SRAM	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Количество контактов	28 или 32 контакта:
Максимальная рабочая частота	20 МГц
Внешние прерывания	2
Интерфейс USB	-

Рисунок 11 – Технические характеристики ATmega328

В отличие от микропроцессора микроконтроллер имеет в своем составе весь необходимый для реализации полного функционала набор инструментов, таких как ОЗУ, ПЗУ, шины данных, ЦАП, АЦП и прочие. На рисунке 12 представлена обобщенная структура микроконтроллера.

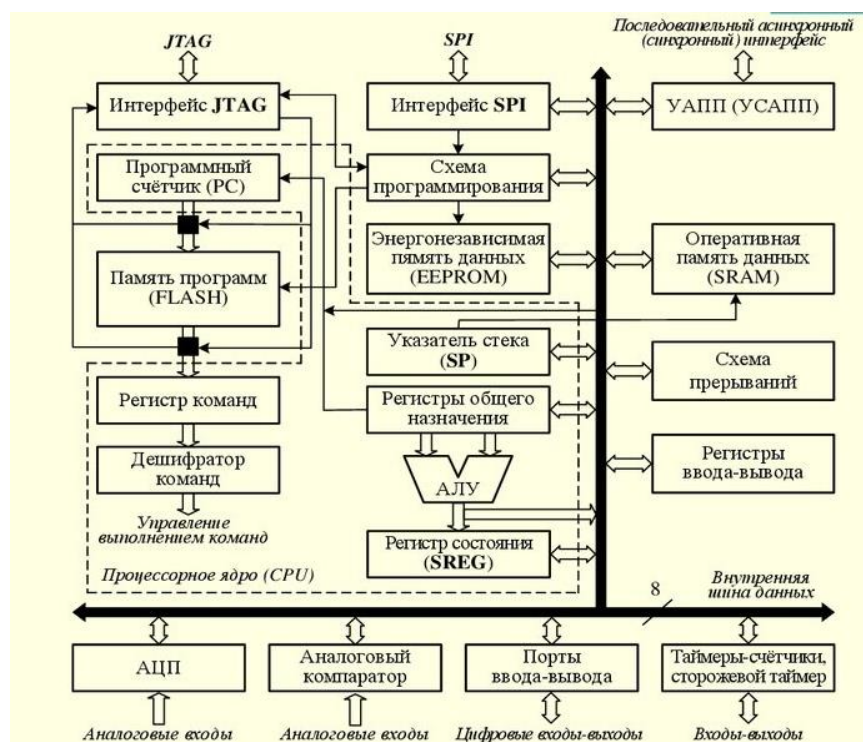


Рисунок 12 – Обобщенная структура AVR микроконтроллера

Сама отладочная плата имеет 14 цифровых входов/выходов, шесть из которых поддерживают возможность ШИМ регулирования, 6 каналов для работы с аналоговыми сигналами, кварцевый резонатор на 16 МГц, разъем питания, разъем USB и выведенный разъем ICSP для работы с интерфейсом SPI. Для функционирования платы ее необходимо подключить к персональному компьютеру или любому другому источнику постоянного напряжения 5В по средствам USB кабеля, либо подать питающее напряжение непосредственно на разъем питания или специализированные пины. На рисунке 13 представлены основные технические характеристики Arduino UNO.

Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	6
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
Флеш-память	32 Кб (ATmega328) из которых 0.5 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактовая частота	16 МГц

Рисунок 13 – Технические характеристики Arduino UNO

2.2 Компонентная база терменвокса

Как нами было выяснено, если два объекта являются проводниками, то мы в состоянии измерить емкость между ними, необходимо только подобрать проводники и способ фиксации изменения емкости системы и электрического поля. В качестве одного из проводников будет использоваться живое растение, подключив к нему, к примеру, емкостной датчик или иные средства емкостного или сенсорного восприятия мы получим возможность отследить факт вмешательства человека в систему или прикосновения к растению, изменение емкости системы и в дальнейшем, при помощи разрабатываемого устройства преобразовать полученные изменения в звуковой сигнал.

2.2.1 Система измерения емкости

В качестве объекта, относительно которого будет измеряться общая емкость системы был выбран цветок в сосуде, наполненном водопроводной водой, как показано на рисунке 14 [18].



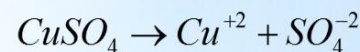
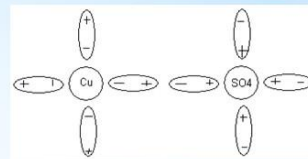
Рисунок 14 – Объект для измерения емкости

Живое растение является хорошим проводником электрической энергии, равно, как и водопроводная вода. За счет содержания разнообразных примесей, солей и соединений такая вода может быть приравнена к электролиту, как показано на рисунке 15.

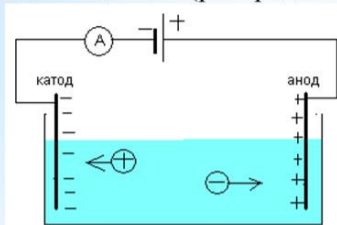
Электрический ток в жидкой среде

Диэлектрик - дистиллированная вода.
 Проводники - растворы солей, кислот в воде.
 Полупроводники-расплавленный селен

Электролитная диссоциация (распределение)



Электролиз

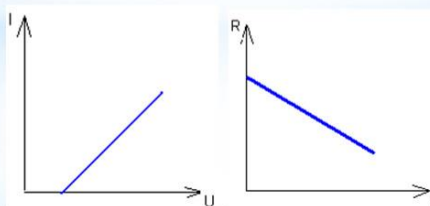


Закон Фарадея

$$m = m_0 N_i = \frac{M}{N_A} \cdot \frac{q}{q_{0i}} = \frac{MI\Delta t}{N_A en} = kI\Delta t$$

$$k = \frac{M}{N_A en}$$

Вольт-амперная характеристика



Ионная проводимость!
Перенос вещества

Применение:

1. Получение чистых металлов.
2. Гальваностегия.
3. Гальванопластика

Рисунок 15 – Электрический ток в жидкостях

Для того, чтобы измерить емкость необходимой нам системы, необходимо для начала провести прототипирование и проверку на более простых системах, к примеру, при помощи обычного сертифицированного конденсатора с заранее известной емкостью [19].

Принцип автоматического измерения емкости конденсаторов заключается и основывается на свойстве резисторно- конденсаторных RC цепей. При использовании данных цепей для нас открывается крайне важная физическая величина, имеющая общепринятое название постоянная времени и показывающая время, необходимое электрической цепи на заряд или разряд конденсатора той или иной емкости. Пример RC цепи представлен на рисунке 16.

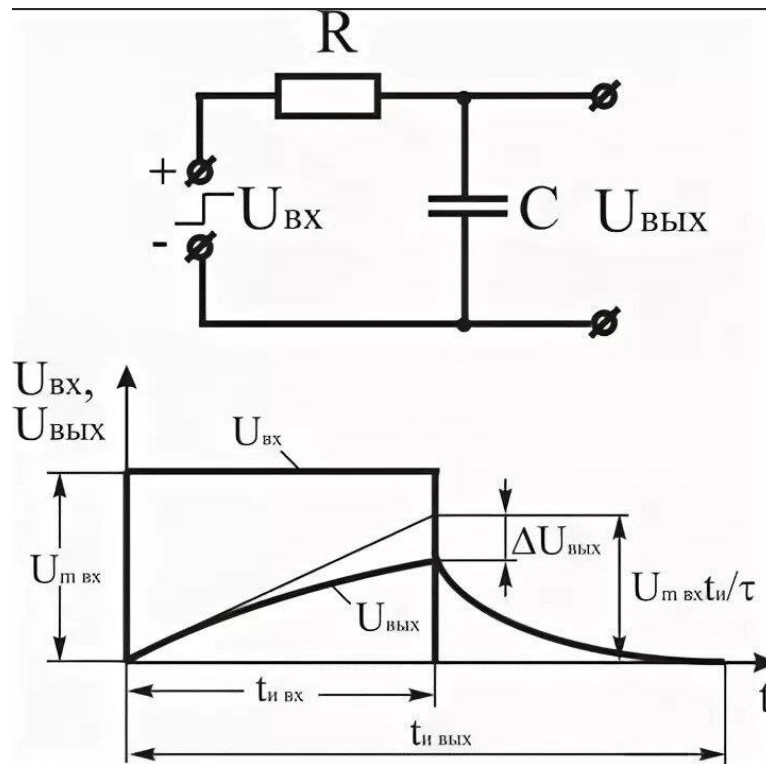


Рисунок 16 – Простейшая RC цепь

Постоянная времени в RC цепи определяется как время, которое необходимо системе для заряда конденсатора примерно на 63% от его номинального напряжения при полной зарядке. Чем больше емкость конденсатора, тем больше времени необходимо затратить на его зарядку, как показано на рисунке 17.

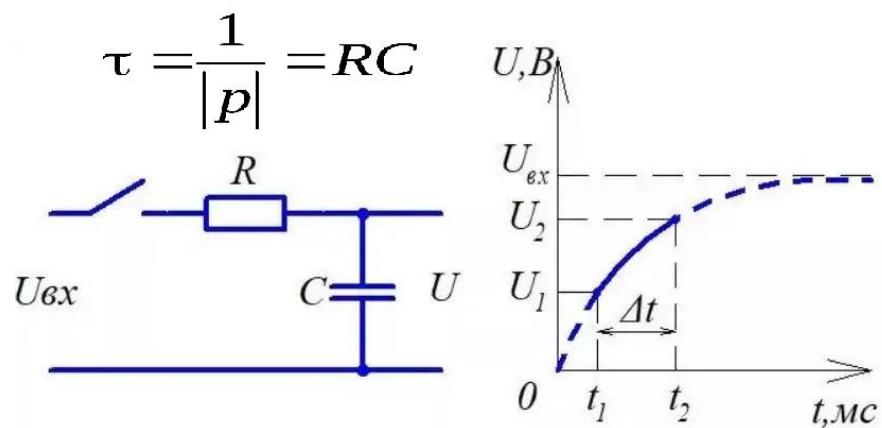


Рисунок 17 – Постоянная времени

Для реализации нашего проекта в рамках выполнения выпускной квалификационной работы необходимо автоматизировать процесс измерения емкости и обработки полученных значений, для чего используем микроконтроллер, выбранный нами ранее. Для эмуляции работы системы воспользуемся программным обеспечением Autodesk Tincercad [20]. Данное программное обеспечение является облачным сервисом, предоставляемым компанией Autodesk и поддерживающим возможность работы с 3D моделированием и электронными схемами. К отличительным особенностям данного сервиса можно отнести открытость доступа и крайне функциональные возможности встроенного редактора. При помощи Tincercad очень удобно и точно можно моделировать работу электрических схем, включающих в свой состав такие сложные электронные компоненты, как микроконтроллер. Рабочая среда сервиса Autodesk Tincercad представлена на рисунке 18.

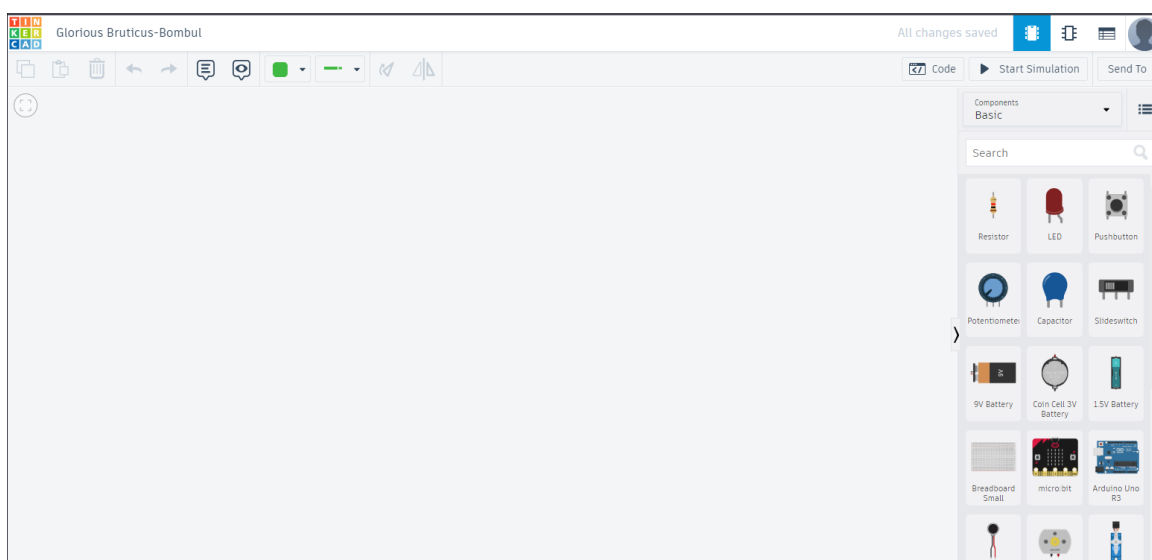


Рисунок 18 – Рабочая среда Autodesk Tincercad

Простейшая система для измерения емкости конденсатора с использованием аппаратной платформы Arduino и собранная при помощи сервиса Autodesk Tincercad представлена на рисунке 18.

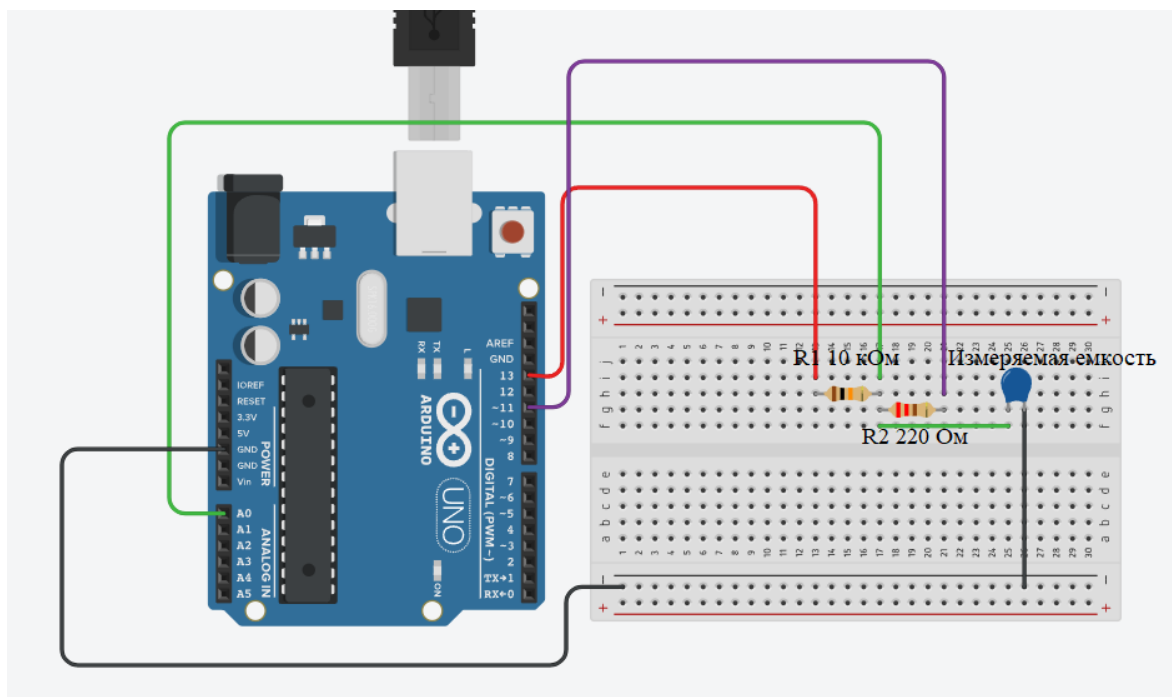


Рисунок 18 – Схема для измерения емкости конденсатора

Для дальнейшей проверки работоспособности системы нами был написан программный код, отслеживающий время заряда конденсатора на необходимую величину. После проведения измерений, система обрабатывает полученные значения постоянной времени и переводит их в емкость исследуемого конденсатора. Ниже представлен написанный нами программный код:

```
#define analogPin    A0
#define chargePin    13
#define dischargePin 11
#define resistorValue 10000.0F
unsigned long startTime;
unsigned long elapsedTime;
float microFarads;
float nanoFarads;
void setup(){
    pinMode(chargePin, OUTPUT);
```



```

digitalWrite(chargePin, LOW);
Serial.begin(9600);
}
void loop(){
digitalWrite(chargePin, HIGH);
startTime = millis();
while(analogRead(analogPin) < 648){
}
elapsedTime= millis() - startTime;
microFarads = ((float)elapsedTime / resistorValue) * 1000;
Serial.print(elapsedTime);
Serial.print(" mS ");
if (microFarads > 1){
Serial.print((long)microFarads);
Serial.println(" microFarads");
}
else{
nanoFarads = microFarads * 1000.0;
Serial.print((long)nanoFarads);
Serial.println(" nanoFarads");
delay(500);
}
digitalWrite(chargePin, LOW);
pinMode(dischargePin, OUTPUT);
digitalWrite(dischargePin, LOW);
while(analogRead(analogPin) > 0){
}
pinMode(dischargePin, INPUT);
}

```

Разработанная система способна измерять емкость конденсаторов номиналом от 0.1 до 3900 мкФ. После сборки схемы и написания программного кода, необходимо было проверить корректность работы системы, для чего были произведены замеры емкости трех исследуемых конденсаторов номиналом 50, 550 и 2280 мкФ. Результаты измерений представлены на рисунках 19-21 соответственно.

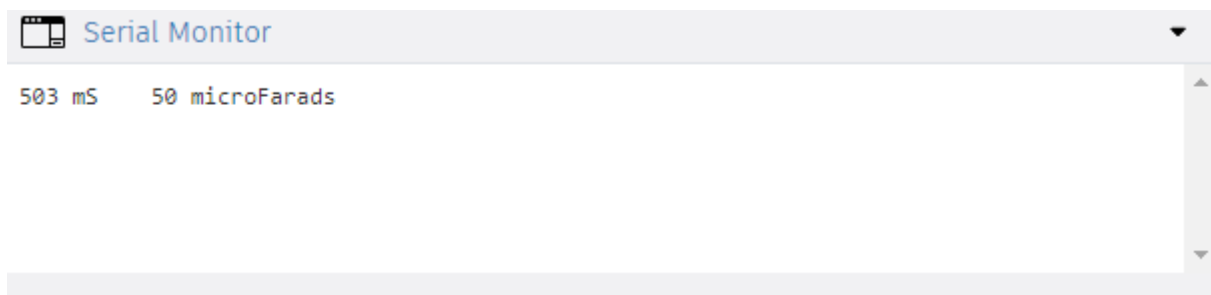


Рисунок 19 – Результаты первого измерения

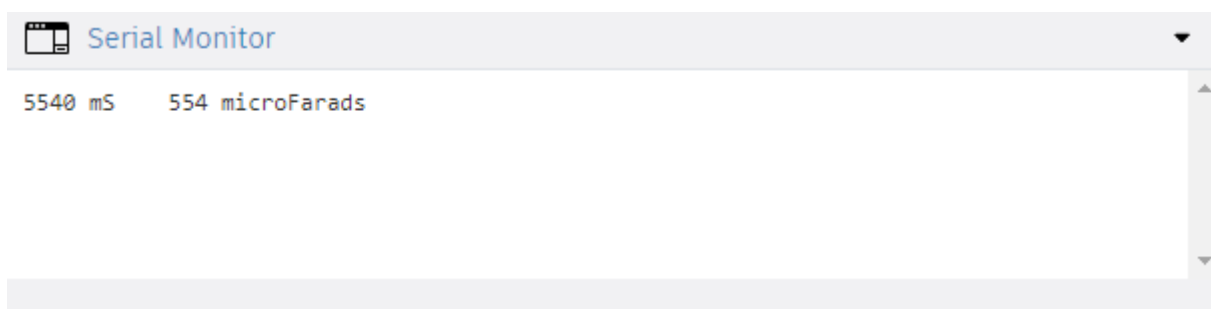


Рисунок 20 – Результаты второго измерения

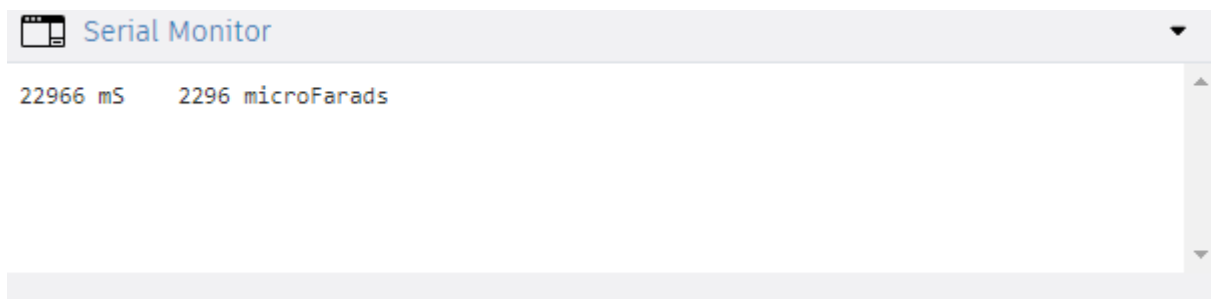


Рисунок 21 – Результаты третьего измерения

Из результатов эксперимента видно, что с увеличением емкости конденсатора растет и погрешность измерения, что может быть связано с задержками в обработке и работе со встроенной функцией таймера Arduino на millis, однако, погрешности незначительные и спроектированная система подтвердила свою работоспособность.

Стоит отметить, что данное программное обеспечение поддерживает работоспособность только в тех системах и схематических решениях, в которых заранее известно общее комплексное сопротивление цепи, а также является не самым функциональным, совершенным и точным из возможных. Из чего можно сделать вывод о том, что для реализации нашего проекта такая система не подходит, так как мы не можем заранее знать общее сопротивление цепи и к тому же, оно не будет являться статичным в разные моменты времени, помимо того, в разрабатываемая система должна достаточно быстро и четко реагировать на факт изменения емкости. Однако, общий принцип измерения емкости, проверенный в данном эксперименте, в дальнейшем будет нами использован.

На практике любая более сложная электрическая схема имеет паразитный импеданс. Как правило она содержит в своем составе всевозможные активные элементы, к примеру транзисторы, проводные соединения и прочие элементы, имеющие свое собственное внутреннее сопротивление. Все это усложняет задачу расчета общего сопротивления используемой цепи. Решить данную проблему можно путем внесения поправок и корректировок на постоянную пропорциональности и смещение для каждой конкретной схемы в разрабатываемое программное обеспечение. Мы же, при дальнейшей разработке, попробуем минимизировать все вышеперечисленные негативные аспекты возможными схемотехническими решениями.

В ходе анализа и разработки схемотехнической реализации было принято решение спроектировать систему измерения емкости на базе

таймера 555 и триггера Шмитта. На рисунке 22 представлена микросхема таймера 555.

555 Timer IC Pinout

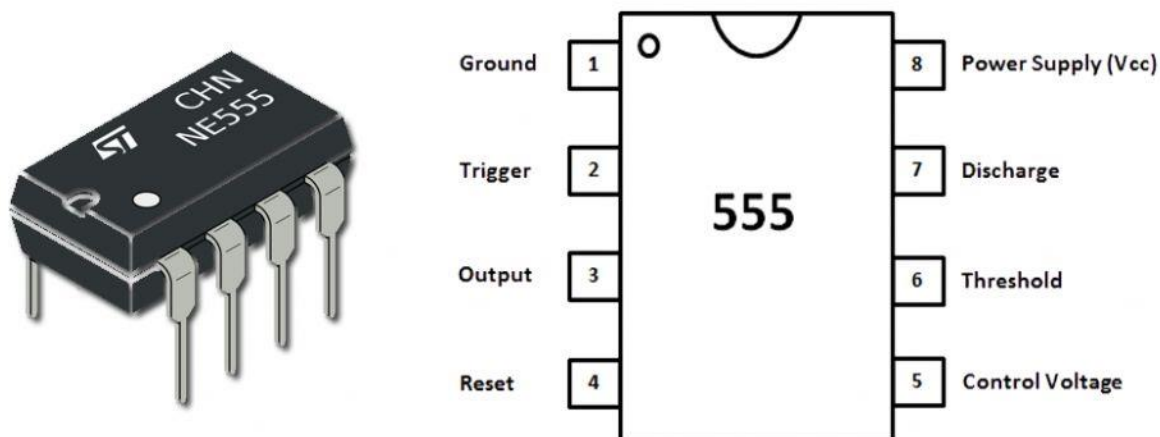


Рисунок 22 – Таймер 555

Данная аналоговая интегральная схема является по сути универсальным таймером, устройством для генерации одиночных либо повторяющихся электрических импульсов со стабильными временными характеристиками и применяется при проектировании разнообразных генераторов, модуляторов сигнала, пороговых устройств и прочих узлов электронной аппаратуры. На рисунке 23 представлена упрощенная структура таймера 555.

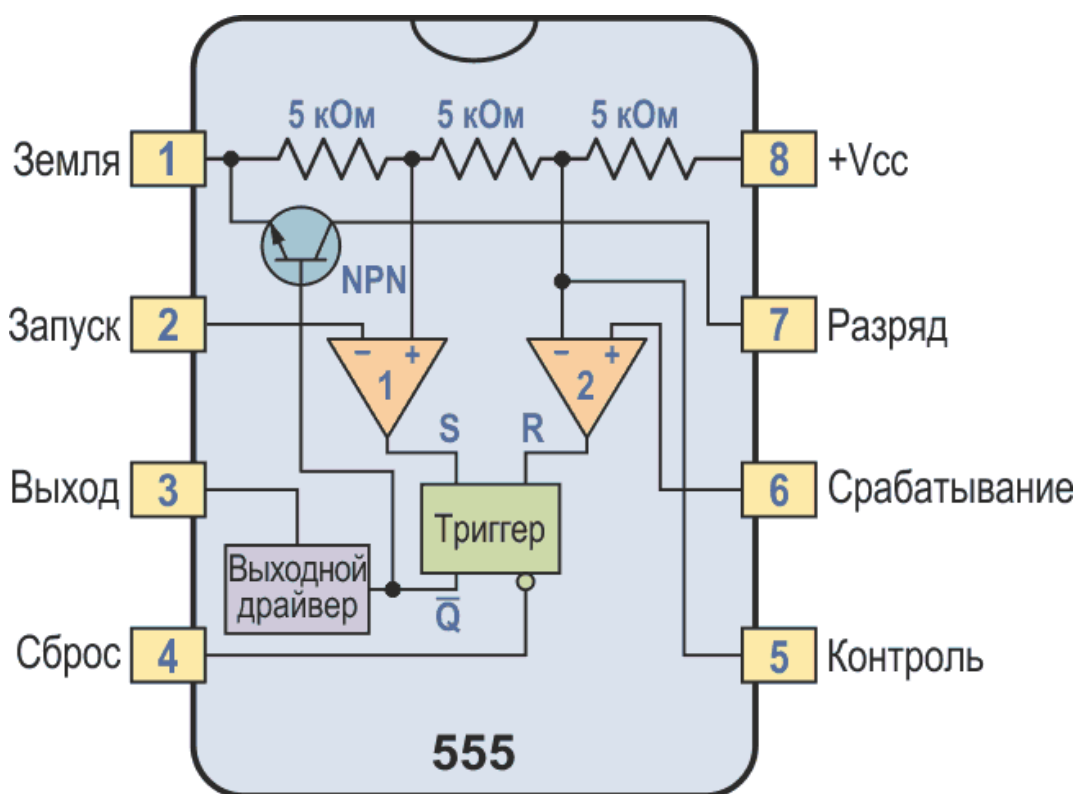


Рисунок 23 – Структура таймера 555

Для реализации проекта в рамках выпускной квалификационной работы данная ИМС будет использована в качестве генератора прямоугольных импульсов. Использование данной микросхемы позволяет нам применять цифровые порты Arduino для обработки полученного сигнала. Таймер обеспечивает на своем выходе прямоугольный сигнал, частота которого напрямую будет зависеть от подключенной к нему емкости.

Для проверки работоспособности выбранной ИМС воспользовались средой моделирования Micro-Cap 12. Данная программа является открытой и имеет в своей базе большой набор радиоэлектронных элементов и обширный выбор инструментов для анализа и моделирования электронных схем постоянного и переменного тока в разных режимах. Рабочая среда программы Micro-Cap 12 представлена на рисунке 24.

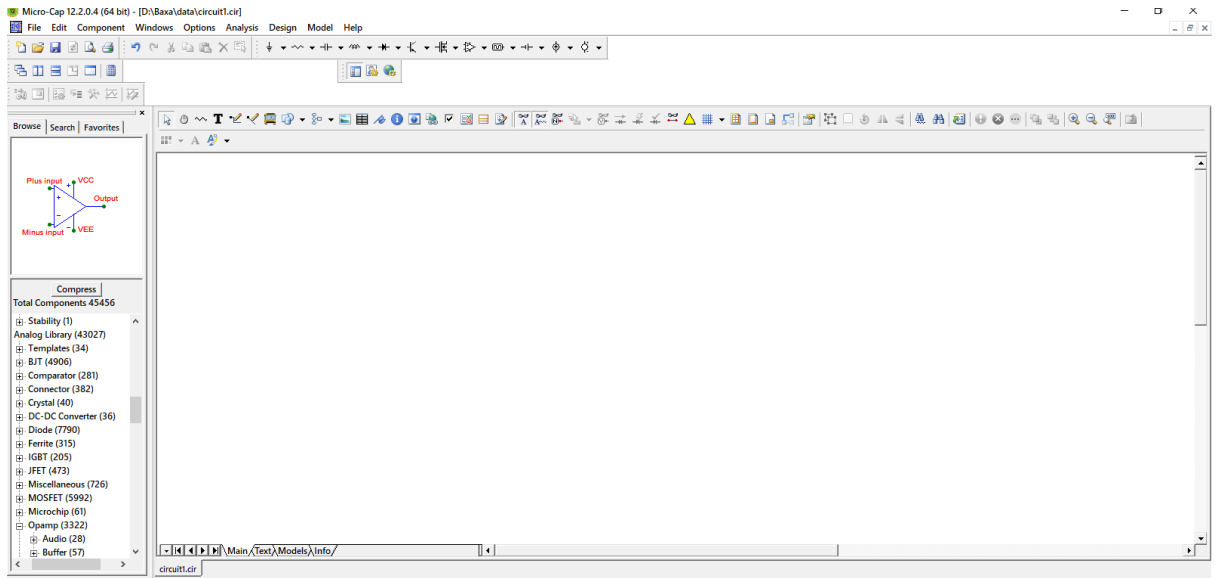


Рисунок 24 – Рабочая среда Micro-Cap 12.

Для проверки работы микросхемы была собрана схема автогенератора прямоугольных импульсов, представленная на рисунке 25.

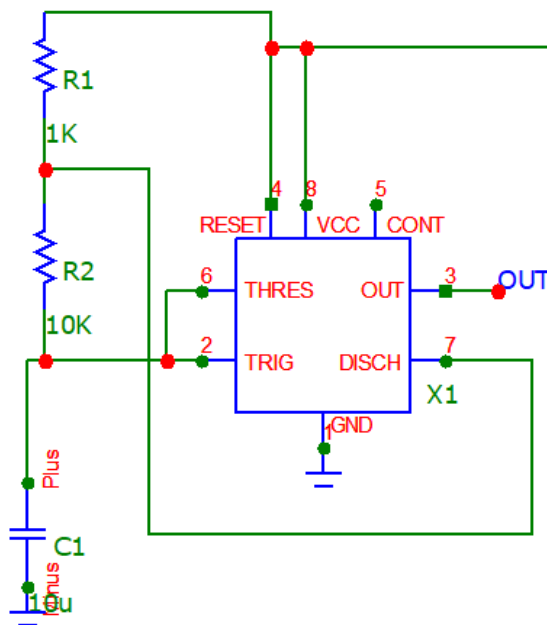


Рисунок 25 – Автогенератор прямоугольных импульсов

Для анализа спроектированной схемы автогенератора на микросхеме таймера 555 воспользовались встроенным анализом по времени. На рисунке 26 представлены настройки параметров анализа.

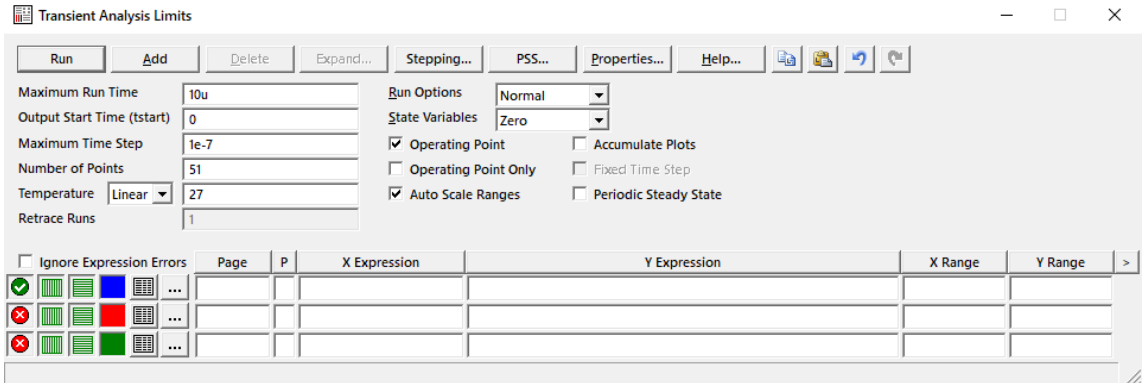


Рисунок 26 – Параметры анализа

Осциллограмма выходного сигнала, полученного в ходе работы схемы представлена на рисунке 27.

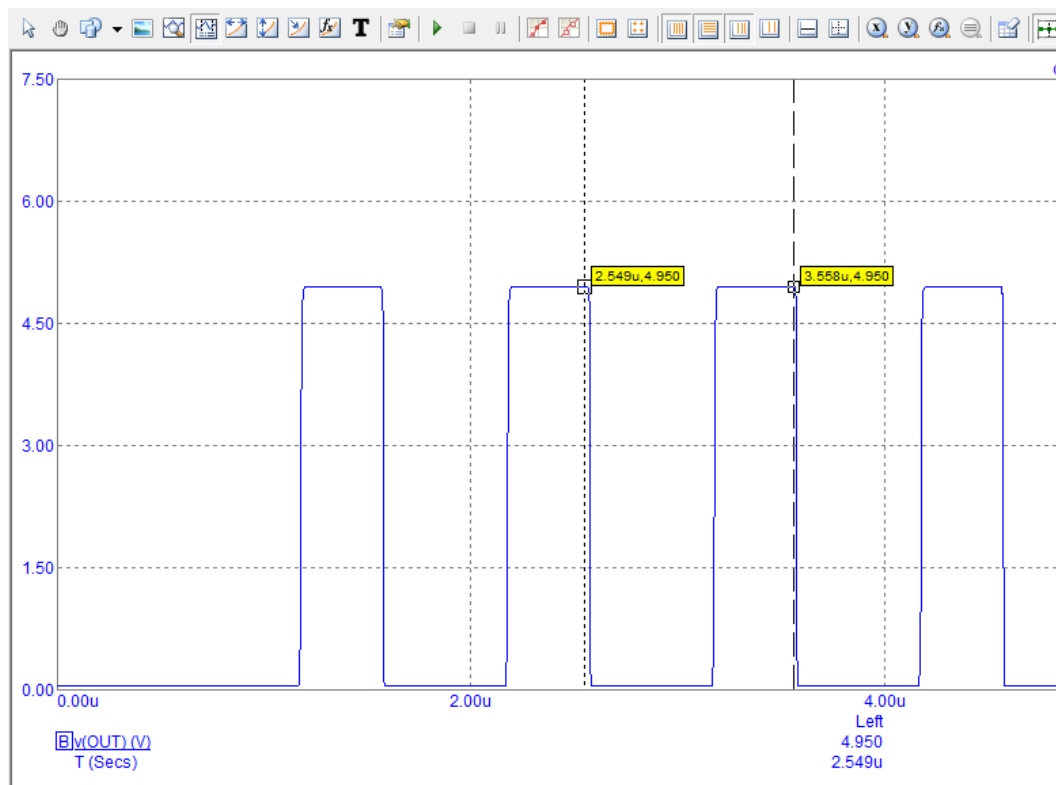


Рисунок 27 – Осциллограмма выходного сигнала

Получив прямоугольный цифровой сигнал определенной частоты необходимо перевести ее в значение емкости подключенного конденсатора, в нашем случае это конденсатор C1. В данном схемотехническом решении частота генерируемых импульсов зависит от емкости C1 и сопротивления резисторов R1 (RA) и R2 (RB). Для перевода частоты полученного прямоугольного сигнала и расчета емкости исследуемого объекта будем использовать заготовленный шаблон, представленный на рисунке 28.

$$\text{Frequency (F)} = 1 / (\text{Time period}) = 1.44 / ((\text{RA} + \text{RB} * 2) * \text{C}).$$

$$\text{Frequency (F)} = 1 / (\text{Time period}) = 1.44 / (21000 * \text{C}).$$

$$\text{Capacitance C} = 1.44 / (21000 * \text{F}).$$

Рисунок 28 – Расчет емкости исследуемого объекта

В разрабатываемом устройстве вместо конденсатора C1 будет подключен другой физический объект, к примеру живой цветок. Таким образом емкость данного объекта будет напрямую влиять на частотообразующую цепочку генератора прямоугольных импульсов. Генератор в свою очередь будет выдавать на своем выходе прямоугольный сигнал разной частоты по которому мы будем отслеживать изменение емкости подключенного объекта.

Второй важной составляющей разрабатываемой системы измерения емкости является триггер Шмитта 74НС14, представленный на рисунке 29.

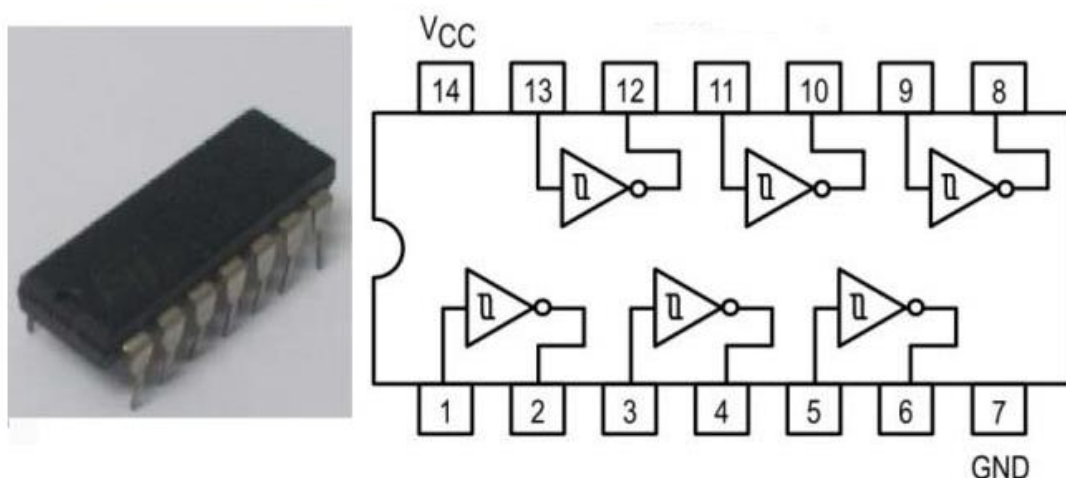


Рисунок 29 – ИМС триггера Шмитта 74НС14

Триггер Шмитта является устройством с двумя устойчивыми состояниями 0 и 1. Данная микросхема является по сути двухпозиционным релейным переключателем, помимо того ИМС способна принимать на вход аналоговые сигналы сложной формы. При достижении определенного порога напряжения на входе триггер переключается из одного состояния в другое. Ввиду принципа своей работы устройство может быть использовано при построении различных триггеров и переключателей. Одной из отличительных особенностей Триггера Шмитта является его статическая характеристика, имеющая петлю гистерезиса, иными словами переключение триггера зависит от его состояния в текущий момент времени. На рисунке 30 представлен петля гистерезиса идеального триггера Шмитта.

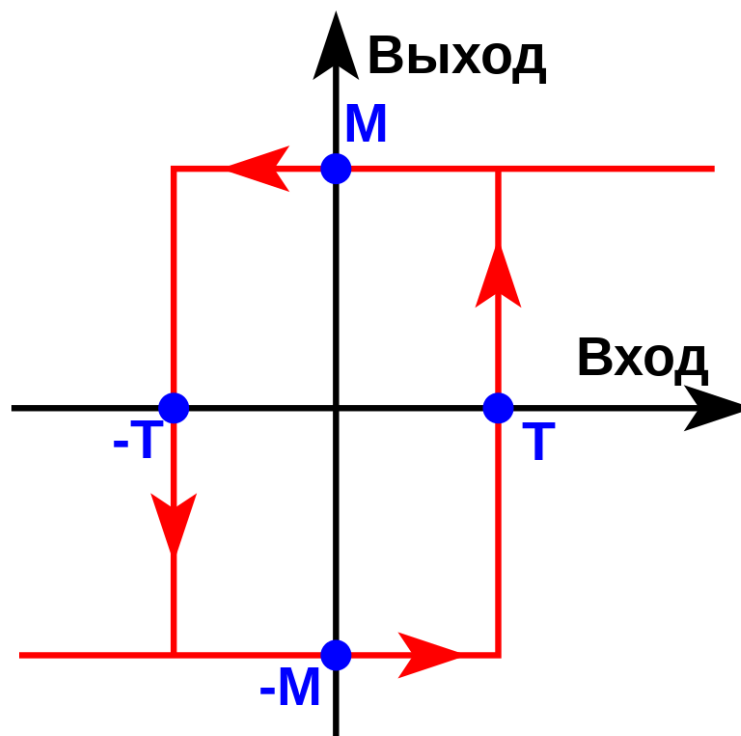


Рисунок 30 – Петля гистерезиса идеального триггера Шмитта

В нашем случае триггер Шмитта устанавливается в цепь для обеспечения корректности и правильности передачи сигнала с таймера 555 на цифровой порт платы Arduino. Так как сигнал с выхода таймера на практике может быть не всегда в полной мере пригоден для прямой подачи на вход аппаратной платформы ввиду большой чувствительности ее портов.

Для обеспечения питания системы измерения емкости необходимо использовать источник питания на 5 В. В качестве такого источника могут быть использованы как специализированные лабораторные источники питания, так и всевозможные адаптеры либо преобразователи напряжения. Пример источника питания для системы измерения емкости представлен на рисунке 31.



Рисунок 31 – Лабораторный источник напряжения UT3002C

Для фильтрации нежелательных шумов, в цепь питания системы могут быть включены два фильтрующих конденсатора, как показано на рисунке 32.

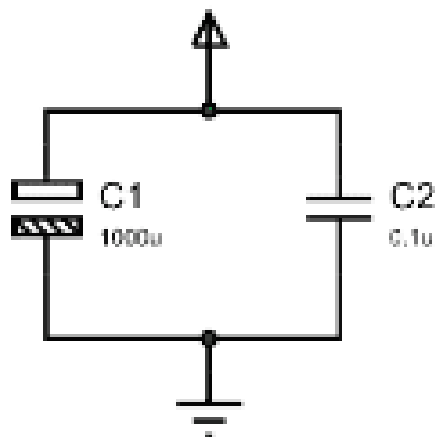


Рисунок 32 – Фильтрующие конденсаторы в цепи питания

2.2.2 Система модуляции звукового сигнала

Для проектирования системы импульсной модуляции звукового сигнала было решено использовать динамик и усилитель звуковых частот. Значения емкости, полученные с системы измерения емкости и обработанные микроконтроллером будут модулировать соответствующий звуковой сигнал.

В качестве нагрузки системы модуляции звукового сигнала, к примеру, может быть использован динамик 8 Ом ВВК СЧ-50, как подходящий под наши требования. Динамик ВВК СЧ-50 представленный на рисунке 33.



Рисунок 33 – Динамик 8 Ом ВВК СЧ-50

При отсутствии готового решения в виде платы усилителя для системы модуляции звукового сигнала можно собрать его самостоятельно. Пример схемы усилителя звуковых частот для самостоятельной сборки представлен на рисунке 34.

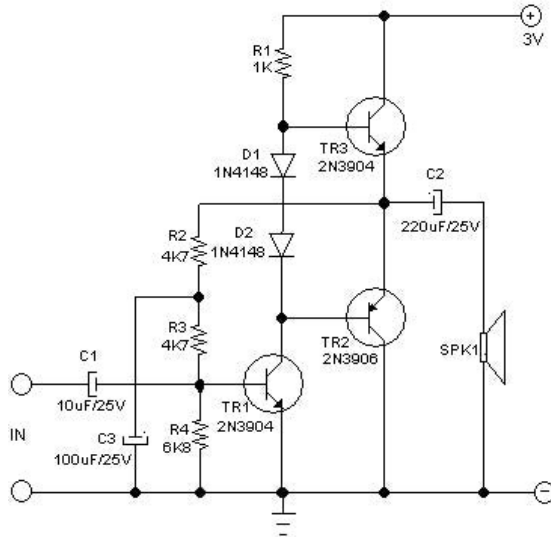


Рисунок 34 – Схема усилителя звуковых частот

Однако, нами было принято решение использовать готовый усилитель, ввиду сохранения принципа модульности сборки. В качестве усилителя к выбранному динамику будет использован аудио усилитель PAM8403, представленный на рисунке 35.

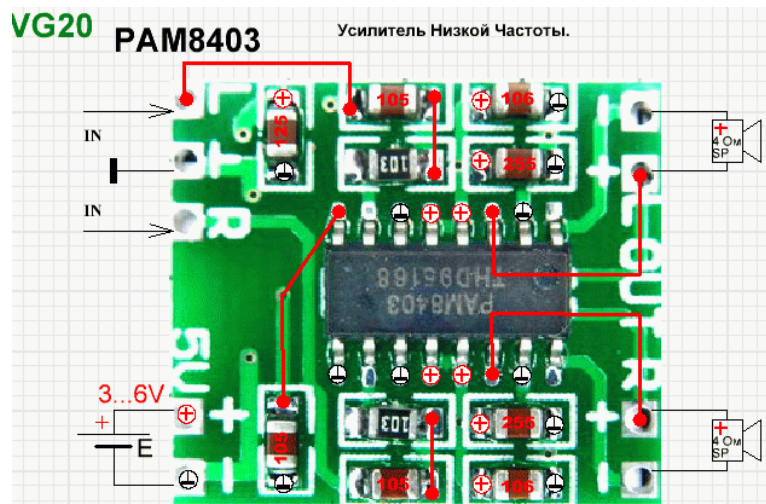


Рисунок 35 – Усилитель PAM8403

На рисунке 36 представлены некоторые технические характеристики выбранного усилителя.

Максимальная выходная мощность на канал (RMS)*	2 x 3 Вт
Номинальное напряжение питания	2.5 - 5.5 В
Максимально-допустимое напряжение питания	6.6 В
Коэффициент нелинейных искажений**	< 0.15% (VDD=5.0V, Po=0.5W, RL=8 Ω) < 10% (VDD=5.0V, Po=3.2W, RL=4 Ω)
Отношение сигнал/шум	>= 80 дБ (VDD=5V, Vorms=1V, Gv=20dB)
Усиление	24 дБ
Частота ШИМ	260 КГц
Номинальное сопротивление нагрузки	>=4 Ом

Рисунок 36 – Технические характеристики PAM8403

Готовое схмотехническое решение для системы модуляции звуковых сигналов представлено на рисунке 37.

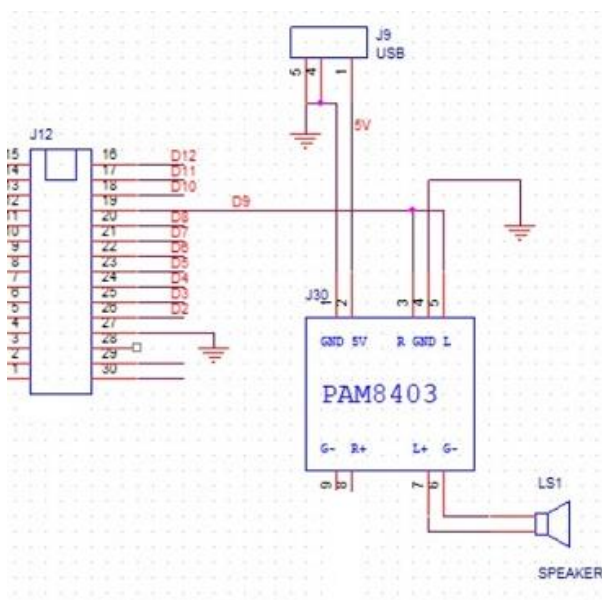


Рисунок 37 – Схема системы модуляции звукового сигнала

Выводы по главе

В данной главе был произведен анализ и подбор аппаратного обеспечения и компонентной базы для разрабатываемого устройства. В соответствии с этим, были составлены структурная схема терменвокса и схема электрическая принципиальная терменвокса. Перечень элементов к разработанной электрической схеме представлен в приложении А.

3 Система управления терменвокса

3.1 Алгоритм определения емкости и модуляции звукового сигнала

Алгоритм работы системы определения изменения емкости было решено реализовать следующим образом. Система фиксирует изменение емкости подключенного объекта и в соответствии с этим генерирует прямоугольный сигнал с частотой, соответствующей емкости объекта измерения по расчетной формуле, определенной нами в предыдущей главе. Расчетные параметры и константы для сгенерированный сигнал подается на блок корректировки сигнала, реализованный в виде триггера Шмитта, после чего поступает на вход аппаратной платформы Arduino с микроконтроллером ATmega 328. На рисунке 38 представлено схематичное изображение алгоритма работы системы.

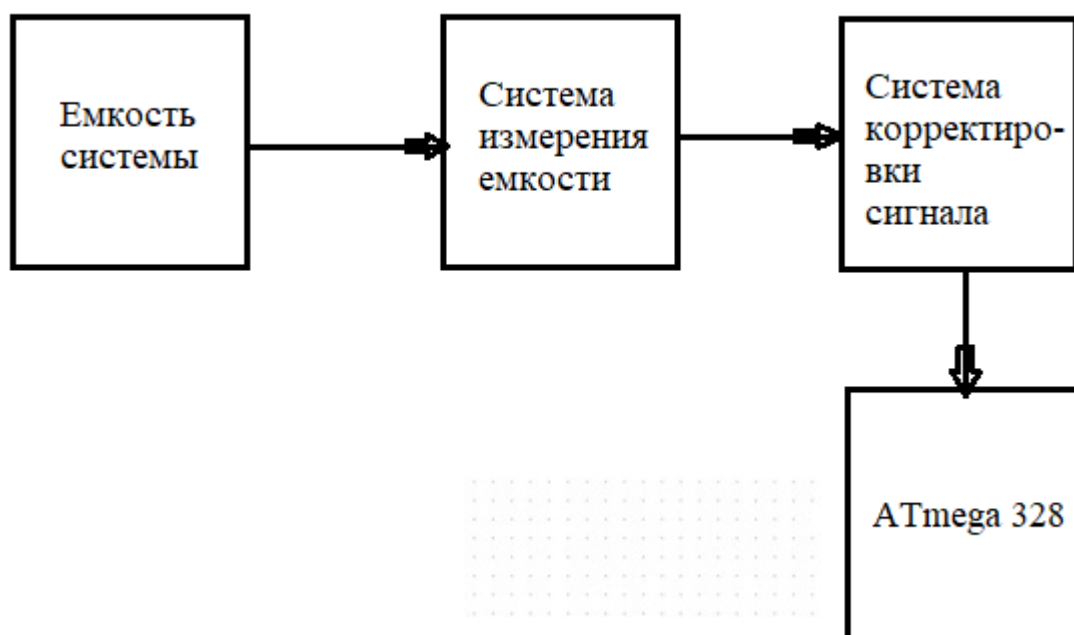


Рисунок 38 – Алгоритм работы системы измерения емкости

После того, как микроконтроллер обработал полученный сигнал, он выдает управляющее воздействие в систему модуляции звукового сигнала. Которая, в свою очередь, генерирует звук в зависимости от значения поступающего сигнала управления. На рисунке 39 представлено схематичное изображение алгоритма работы системы генерации звукового сигнала.



Рисунок 39 - Алгоритм работы системы модуляции звукового сигнала

3.2 Разработка программы управления

Разработка необходимого нам программного обеспечения для терменвокса проводилась в специализированной среде программирования Arduino IDE [16]. Рабочая среда приложения Arduino IDE представлена на рисунке 40.

```
Файл Правка Скetch Инструменты Помощь
sketch_sep28a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

The screenshot shows the top menu bar of the Arduino IDE with options: 'Файл', 'Правка', 'Скetch', 'Инструменты', and 'Помощь'. Below the menu is a toolbar with icons for file operations. The main editor area shows a sketch named 'sketch_sep28a' containing the following code:

Рисунок 40 – Рабочая среда Arduino IDE

Среда разработки Arduino IDE предоставляет своим пользователям огромный функционал встроенных функций и библиотек для работы с разнообразными датчиками и устройствами [21]. Однако, для реализации нашего проекта необходимо было дополнительно установить библиотеку Mozzi, которая представляет собой аудиотеку для платформы Arduino [17].

В приложении Б представлен текст программного кода, разработанного в рамках выполнения выпускной квалификационной работы и обеспечивающий управление системами контроля емкости и модуляции звукового сигнала, входящих в состав терменвокса.

Выводы по главе

В данной главе были рассмотрены алгоритмы определения емкости системы и модуляции звуковых сигналов, представлен разработанный программный код системы управления. На основе результатов, полученных в данной главе, были составлены все необходимые блок-схемы алгоритмов работы управляющей программы.

4 Разработка корпуса устройства

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы также был проанализирован рынок корпусов для размещения электроники. В качестве одного из возможных готовых вариантов для размещения электрической части терменвокса была выбрана распределительная коробка. Данный тип корпуса выделяется достаточными габаритными размерами, удобным для монтажа форм-фактором и наличием заводских технологических отверстий для вывода проводов. К тому же, пластиковую крышку распределительной коробки можно доработать под разрабатываемое устройство и организовать на ней посадочное место для динамиков системы модуляции звукового сигнала. Вариант исполнения такой распределительной коробки представлен на рисунке 41.

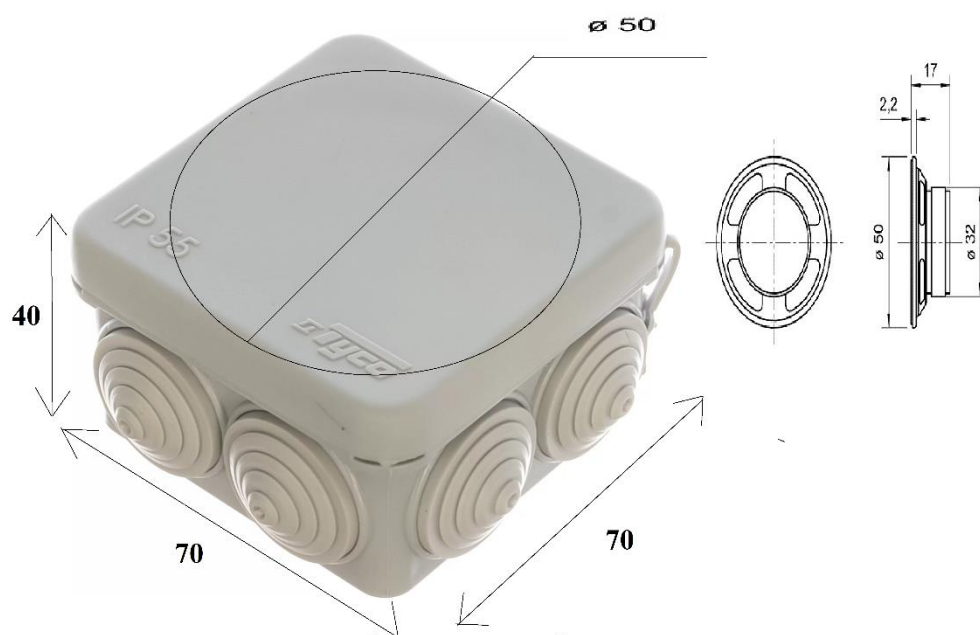


Рисунок 41 – Вариант исполнения распределительной коробки

В качестве альтернативного варианта было решено разработать собственный корпус для терменвокса. В качестве среды разработки была выбрана программа для построения конструкторских чертежей и моделей Компас 3D V18. Данный пакет программного обеспечения отличается простотой, удобством пользовательского интерфейса и большим набором встроенных функциональных инструментов для проектирования. Помимо того, для Компас 3D существует множество пользовательских и официальных библиотек с готовыми конструктивными элементами и элементами электронных цепей, что упрощает процесс разработки и проектирования разнообразных схем, устройств и корпусов. На рисунке 42 представлен вариант разработанного корпуса.

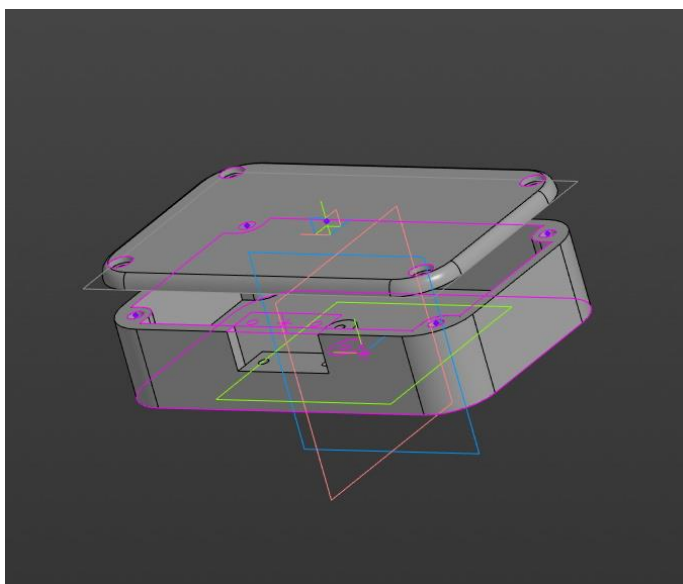


Рисунок 42 – 3D модель разработанного корпуса

Выводы по главе

В данной главе был рассмотрен вариант исполнения корпуса для электрической части терменвокса из распределительной коробки IP55, а также спроектирован собственный корпус для электроники при помощи среды разработки Компас 3D.

Заключение

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы были реализованы все поставленные задачи. Было разработано устройство, представляющее собой демонстрационный стенд терменвокс.

Была представлена исчерпывающая информация и документация, обеспечивающая возможность дальнейшей сборки, программирования и эксплуатации разработанного устройства.

Для спроектированного устройства были разработаны все необходимые электронные и электрические связи, выбрана аппаратная платформа и подобраны составные элементы компонентной базы.

Была разработана структурная схема и схема электрическая принципиальная терменвокса.

Разработан принцип фиксации изменения емкости измеряемой системы и перевода полученной емкости в частоту воспроизводимого звукового сигнала

Была разработана программа управления, реализующая контроль работы составных частей терменвокса, считывание емкости, перевод емкости в частоту воспроизводимого сигнала и модуляцию звукового сигнала.

Разработанное устройство, при дальнейшей доработке схемотехнической части, модернизации и отладке разработанного программного обеспечения, а также физической реализации может выступать в роли демонстрационного стенда для привлечения и вовлечения потенциальных абитуриентов в профессиональную сферу электроники.

Список используемой литературы

1. Белов, А.В. «Микроконтроллеры AVR: от азов программирования до создания практических устройств» / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2016. - 544 с.
2. Белов А.В. «Разработка устройств на микроконтроллерах AVR: шагаем от "чайника" до профи»: Книга / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2013. - 528 с.
3. Бьерн Страуструп. «Язык программирования C++». - 369 с
4. Вагнер Б. «C#. Эффективное программирование. 50 рекомендаций по усовершенствованию программирования на C#» / Б. Вагнер; Пер. с англ. М. Горелик. - М.: Лори, 2013. - 256 с.
5. Водовозов А.М. «Микроконтроллеры для систем автоматики»: Учебное пособие / А.М. Водовозов. - Вологда: ВоГТУ, 2002. - 123 с.
6. «Википедия» [Электронный ресурс] // «Терменвокс» URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Терменвокс> (дата обращения: 20.03.2024).
7. Евстифеев А.В. «Микроконтроллеры AVR семейства Tiny фирмы ATMEЛ»: Руководство пользователя / А.В. Евстифеев. - М.: ДМК, 2015. - 426 с.
8. Евстифеев А.В. «Микроконтроллеры AVR семейства Tiny»: Руководство пользователя / А.В. Евстифеев. - М.: Додэка XXI, 2007. - 432 с.
9. Евстифеев А.В. «Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы ATMEЛ» / А.В. Евстифеев. - М.: ДМК, 2015. - 286 с.
10. Магда Ю.С. «Программирование и отладка C/C++ приложений микроконтроллеров ARM» / Ю.С. Магда. - М.: ДМК Пресс, 2012. - 168 с.
11. Магда Ю.С. «Программирование и отладка C/C++ приложений для микроконтроллеров ARM» / Ю.С. Магда. - М.: ДМК, 2014. - 168 с.
12. Магда Ю.С. «Современные микроконтроллеры. Архитектура, программирование, разработка устройств» / Ю.С. Магда. - М.: ДМК, 2013. - 228 с.

13. Прокопенко В.С. «Программирование микроконтроллеров ATMEЛ на языке С» / В.С. Прокопенко. - СПб.: Корона-Век, 2015. - 320 с.
14. С. Монк. «Программируем Arduino. Профессиональная работа со скетчами» — СПб.: Питер, 2017.
15. «Arduino oficial store» [Электронный ресурс] // «Arduino UNO» URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> (дата обращения: 11.02.2024).
16. «Arduino IDE» [Электронный ресурс]. «Download the Arduino IDE» URL: <https://www.arduino.cc/en/main/software> (дата обращения: 16.02.2024).
17. «Arduino IDE» [Электронный ресурс]. «Download Mozzi» URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/mozzi/> (дата обращения: 20.05.2024).
18. «AUTODESK Instructables» [Электронный ресурс] // «Singing Plant» URL: <https://www.instructables.com/Singing-plant-Make-your-plant-sing-with-Arduino-/> (дата обращения: 11.03.2024).
19. «AUTODESK Instructables» [Электронный ресурс] // «Touche for Arduino: Advanced Touch Sensing» URL: <https://www.instructables.com/Touche-for-Arduino-Advanced-touch-sensing/> (дата обращения: 11.03.2024).
20. «DIGITTRODE» [Электронный ресурс] // «Измеритель емкости на Arduino своими руками» URL: http://digitrode.ru/computing-devices/mcu_cpu/816-izmeritel-emkosti-na-arduino-svoimi-rukami.html (дата обращения: 27.04.2024).
21. James A. Langbridge. «Arduino Sketches. Tools and Techniques for Programming Wizardry», 2015. 480p. ISBN 9781118919606

Приложение Б

Программный код системы управления терменвокса

```
/ объявляем служебные переменные и подключаем библиотеки
int32_t Htime;
int32_t Ltime;
float Ttime;
float frequency;
float capacitance;
// Необходимые инструменты для работы с библиотекой Mozzi
#include <MozziGuts.h>
#include <Oscil.h>
#include <tables/sin2048_int8.h>
#include <RollingAverage.h>
#include <ControlDelay.h>
unsigned int echo_cells_1 = 32;
unsigned int echo_cells_2 = 60;
unsigned int echo_cells_3 = 127;
#define CONTROL_RATE 64
ControlDelay <128, int> kDelay;
Oscil <SIN2048_NUM_CELLS, AUDIO_RATE> aSin0(SIN2048_DATA);
Oscil <SIN2048_NUM_CELLS, AUDIO_RATE> aSin1(SIN2048_DATA);
Oscil <SIN2048_NUM_CELLS, AUDIO_RATE> aSin2(SIN2048_DATA);
Oscil <SIN2048_NUM_CELLS, AUDIO_RATE> aSin3(SIN2048_DATA);
RollingAverage <int, 32> kAverage;
int averaged;
void setup()
{
  pinMode(8,INPUT); //pin 8 – на ввод данных
  kDelay.set(echo_cells_1);
  startMozzi();
}
}
```


Продолжение приложения Б

```
void loop()
{
  for (int i=0;i<3;i++)    // измеряем длительность 3 раз
  {
    Ltime=(pulseIn(8,HIGH)+Ltime)/2;    //вычисляем среднее значение в каждом
цикле
    Htime=(pulseIn(8,LOW)+Htime)/2;
  }
  Ttime = Htime+Ltime;
  frequency=1000000/Ttime;
  capacitance = (1.44*1000000000)/(21000*frequency);    // вычисляем емкость в
нанофарадах
    audioHook();
    delay(500);
  }
void updateControl(){
  int bumpy_input = capacitance;
  averaged = kAverage.next(bumpy_input);
  aSin0.setFreq(averaged);
  aSin1.setFreq(kDelay.next(averaged));
  aSin2.setFreq(kDelay.read(echo_cells_2));
  aSin3.setFreq(kDelay.read(echo_cells_3));
}

int updateAudio() {
  return 3*((int)aSin0.next()+aSin1.next()+aSin2.next(>>1)
  +(aSin3.next(>>2)) >>3;
}
```