

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

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(институт)

Промышленная электроника

(кафедра)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника

(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Разработка системы управления стенда для исследования пробойных свойств воздушной среды

Студент

И.А. Ахметханов

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Руководитель

М.В. Позднов

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Консультанты

_____ (И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

_____ (И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2017

Аннотация

Данная работа состоит из пояснительной записки на 49 стр, введения на 1 стр, включая 28 рисунков, списка 21 источник, в том числе 5 источников на иностранном языке и 2 приложений, и чертежей на 7 листах формата А1.

Целью работы является разработка системы управления стендом для исследования пробойных свойств воздушной среды. При этом она должна обеспечить безопасность и простоту использования устройства.

В бакалаврской работе на основе проведённого аналитического обзора были рассмотрены варианты осуществления системы управления силовой частью разрабатываемой установки для изучения пробойных свойств воздушной среды.

В качестве главного элемента системы управления нами была выбрана цифровая платформа Arduino. Также была составлена, с учётом технического задания, структурная и принципиальная схемы устройства.

Определены основные параметры (безопасность, простота использования), которые должна осуществлять система управления.

Отличительной чертой установки является то, что задание параметров устройства производится дистанционно, это и позволяет обеспечить безопасность эксплуатации.

Система управления, рассмотренная в данной работе, осуществляет управление такими параметрами установки, как: ширина зазора между электродами, напряжение в пробойном промежутке, подача напряжения на электроды разных форм. Также обеспечивает безопасность посредством беспроводного управления параметрами.

Abstract

The graduation work consists of an explanatory note on 49 pages, introduction, including 28 figures, the list of 21 references including 5 foreign sources and 2 appendices, and the graphic part on 7 A1 sheets.

Aim of the graduation work is the development of a control system of test bench to study the breakdown properties of the air environment. In the process of developing the control system, such parameters as safety and ease of use of the device should be taken into account.

Based on the analytical review, in graduation work there were studied options for the control system implementation of a power part of installation, developed to study the breakdown properties of the air environment.

As the main element of the control system we, have chosen a digital platform Arduino. Based on technical tasks, there was also compiled structural and schematic diagram of the device.

The main parameters (safety, ease of use), which must be performed by a control system, are defined.

A distinctive feature of the installation is that the task of the device parameters is performed remotely, that allows to providing safety of operation.

The control system, discussed in this work, manages such installation parameters as the width of the gap between the electrodes, a voltage breakdown, the voltage applied to the electrodes of different shapes. Also it provides the security through wireless control options.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	4
Введение	5
1. Литературный обзор и постановка задач	6
1.1. Состояние вопроса	6
1.2. Постановка задач	6
1.2.1. Задача 1. Выбор аппаратной платформы	6
1.2.2. Задача 2. Обеспечить дистанционное управление	8
1.2.2.1. Способ №1. Передача данных при помощи инфракрасного канала (ИК) ...	8
1.2.2.2. Способ №2. Bluetooth приёмник	8
1.2.2.3. Принцип ИК передачи информации	9
1.2.3. Задача №3. Регулирование расстояния между электродами	15
1.2.3.1. Виды шаговых двигателей	15
1.2.3.2. Биполярные и униполярные шаговые двигатели	16
1.2.3.3. Полушаговый режим	20
1.2.3.4. Микрошаговый режим	20
1.2.3.5. Выбор типа драйвера	28
1.2.4. Задача №4. Изменение напряжения в пробойном промежутке	28
1.2.4.1. Как происходит пробой воздуха	28
2. Проектная часть	35
2.1. Решение задач	35
3. Экспериментальная часть	43
Заключение	46
Список используемой литературы	47

ВВЕДЕНИЕ

Проблемой данной работы можно назвать выбор микроконтроллера и других вспомогательных элементов для системы управления стенда для исследования пробойных свойств воздушной среды. На рынке имеется большое количество разных микроконтроллеров. Наиболее интересными и подходящими вариантами являются контроллеры от фирм Arduino и Raspberry Pi.

Система управления, например, на основе аппаратной платформы Arduino или Raspberry Pi, является наиболее предпочтительной, т.к. контроллеры данных моделей имеют значительный функционал и небольшие габариты.

Разрабатываемая установка (стенд) в конечном итоге, должна посредством дистанционного управления производить задание напряжения в пробойном промежутке и устанавливать разное расстояние между электродами.

Цель работы

Разработать систему управления стендом для исследования пробойных свойств воздушной среды. При этом она должна обеспечить безопасность и простоту использования устройства.

1. Литературный обзор и постановка задачи

1.1. Состояние вопроса

Для того, чтобы определиться с выбором системы управления необходимо рассмотреть ряд вопросов, связанных с параметрами стенда, которыми нужно управлять. В работе будет рассмотрено, какая аппаратная платформа будет выбрана в качестве системы управления. При этом выбранная платформа должна обеспечить безопасность и простоту использования стенда для исследования пробойных свойств воздушной среды. [17]

1.2. Постановка задач

1.2.1. Задача 1. Выбор аппаратной платформы

На рынке существует множество разных программно-аппаратных средств для решения данной задачи. В результате поиска были выбраны два варианта, которые наиболее известны, это программно-аппаратная платформа Arduino и одноплатный компьютер Raspberry Pi.

Raspberry Pi (рисунок 1.2.1) представляет собой миниатюрный компьютер, работающий на операционной системе Linux. Для того, чтобы начать работу с данным устройством необходимо скачать и установить операционную систему на SD карту, которая выполняет роль постоянной памяти для Raspberry Pi. Также к ней необходимо подключить периферийные устройства такие как клавиатура, оптическая мышь и монитор. После чего можно приступить к программированию. Компьютеры Raspberry Pi используют в робототехнике, в системах «умный дом» и в качестве серверов. [1][18][19]

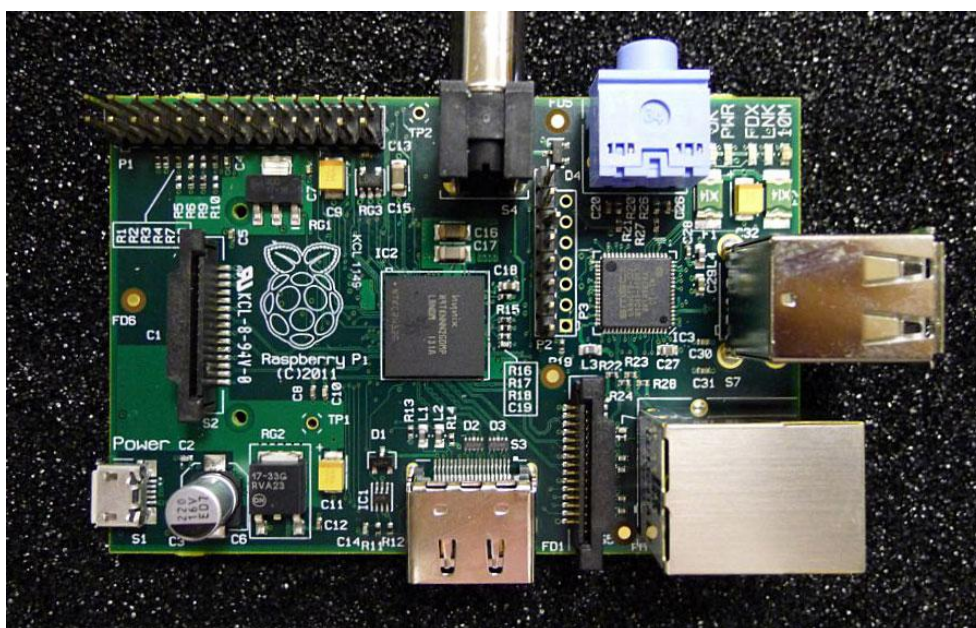


Рисунок 1.2.1 – Одноплатный компьютер Raspberry Pi

Arduino программно-аппаратная платформа (рисунок 1.2.2) служащая для создания автономных объектов или подключению к программному обеспечению компьютера. Для начала работы с Arduino нужно скачать и установить программу, которая бесплатно распространяется производителем, установить соответствующие драйвера и подключить аппаратную часть к компьютеру. Дальше уже можно программировать. Платформу Arduino используют в робототехнике и в системах «умный дом». [2][20]

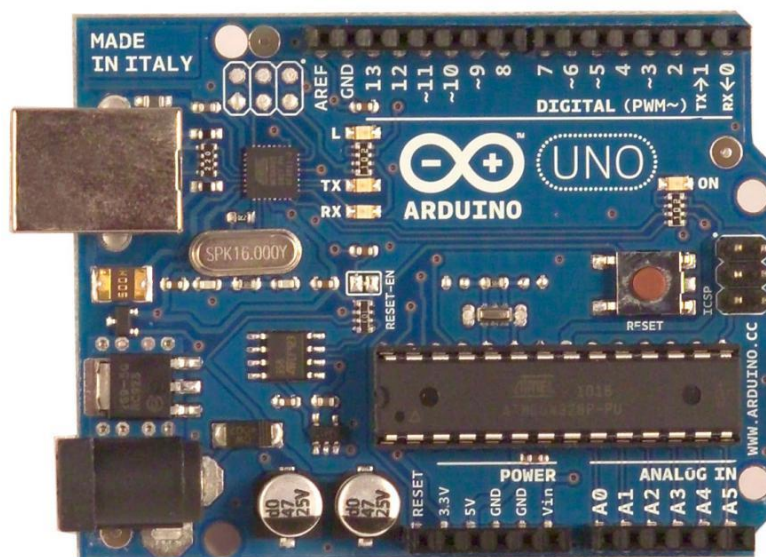


Рисунок 1.2.2 – Программно-аппаратная платформа Arduino (модель Arduino Uno)

В итоге в качестве системы управления была выбрана программно-аппаратная платформа Arduino, поскольку является дешевле и проще в программировании чем одноплатный компьютер Raspberry Pi.

1.2.2. Задача 2. Обеспечить дистанционное управление

Поскольку предполагается самостоятельная работа студентов при выполнении лабораторных работ, применение дистанционного управления обеспечивает безопасность использования стенда.

Таким образом при помощи дистанционного управления должно производиться задание таких величин как, ширина зазора между электродами, изменение напряжения в пробойном промежутке, включение и выключение устройства.

1.2.2.1. Способ №1. Передача данных при помощи инфракрасного канала (ИК)

ИК-передатчик (пульт). Передатчиком может выступать любой пульт дистанционного управления, что придает универсальности в управлении.

ИК приемник (датчик). Для приёма сигнала с пульта необходим фотоприёмник в качестве которого могут выступать как фотодиод, так и фототранзистор.

1.2.2.2. Способ №2. Bluetooth приёмник

Можно использовать Bluetooth модуль HC-06 (рисунок 1.2.3). При помощи модуля HC-06 можно управлять устройством прямо со своего смартфона или планшета. Поставив на телефон или планшет одну из многочисленных программ для управления через bluetooth, мы можем превратить его в настоящий джойстик. Точно так же можно связаться со своим устройством с ноутбука, или с любого другого прибора, который может подключаться к bluetooth-устройствам. [5]

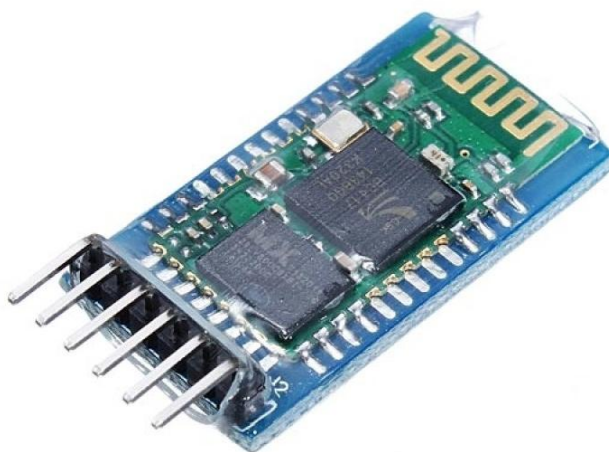


Рисунок 1.2.3 – Bluetooth модуль HC-06

В итоге нами был выбран первый способ, с использованием инфракрасного канала. Поскольку ИК-приёмники имеют меньшие размеры и стоимость по сравнению с Bluetooth приёмниками.

1.2.2.3. Принцип ИК передачи информации

Инфракрасное излучение относится к электромагнитному виду излучения, и оно возникает, когда какое-либо тело нагревается до нужной температуры. В лампах накаливания излучение состоит по большей части из инфракрасного. Также естественным источником этого излучения является Солнце. ИК диапазон лежит очень близко к видимому свету области спектра, длина волны занимает область около от 0,75 мкм до 1 мм. Для того, чтобы зарегистрировать излучение применяют такие способы как тепловые или фотоэлектрические устройства приёма и специализированные фотоматериалы. Кроме нагретых тел, источником ИК лучей также используются твердотельные излучатели такие как, ИК лазеры, инфракрасные светодиоды, а для их регистрации применяются фотодиоды или фоторезисторы. Следующие особенности делают инфракрасное излучение удобным для применения в устройствах передачи данных:

- 1) ИК приемники малогабаритны и также недороги
- 2) ИК лучи ввиду своей невидимости не отвлекают внимание человека
- 3) ИК излучение не сказывается на здоровье человека (если оно низкой мощности)
- 4) ИК лучи обладают хорошей способностью отражаются от значительной части материалов (стен, мебели)
- 5) ИК излучение не мешает работе других аналогичных устройств поскольку не проникает сквозь стены

Все эти особенности ИК-передачи позволяют с успехом использовать данный способ передачи информации в большом количестве устройств. ИК передатчики и приемники находят применение в разных областях таких как, промышленная и бытовая электроника, охранные системы, компьютерная техника, системах где требуется передача данных на большие расстояния (при помощи оптоволоконна). Рассмотрим более детально работу пультов управления бытовой электроники.

Пульт управления при нажатии кнопки излучает кодированный сигнал, а приемник, установленный в устройстве (приборе), принимает его и выполняет требуемые действия. Логическая последовательность сигнала формируется пультом, в котором кодируется или моделируется соответствующий требуемому действию информационный пакет импульсов. Раньше в устройствах управления применяли последовательности коротких импульсов, каждый из которых представлял собою часть полезной информации. В дальнейшем, стали

использовать метод модулирования постоянной частоты, в результате которого в пространство выдавались не одиночные импульсы, а пакеты импульсов определенной частоты. Далее сигнал приходит на ИК приемник, а тот в свою очередь принимает эту последовательность и выполняет демодулирование, при котором получается огибающая. Метод с использованием пакетов импульсов является имеет более высокую защиту от помех по сравнению с методом где используются одиночные сигналы, поскольку приёмник и передатчик работают на одной частоте и не воспринимают сигналы с другой частотой. Структура приёмника (рисунок 1.2.4):

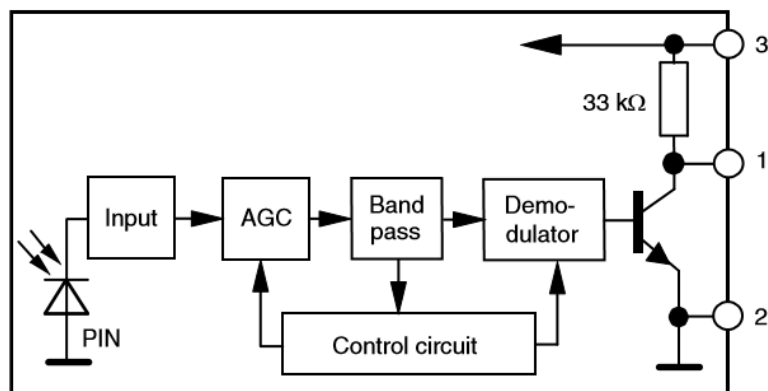


Рисунок 1.2.4 – Структура приёмника TSOP4838.

Для того, чтобы принять ИК сигнал часто применяется микросхема, которая объединяет фотоприемник, усилитель с полосовым фильтром (настроенным на определенную несущую частоту), усилитель с АРУ и детектор для получения огибающей сигнала. Также в микросхеме присутствует оптический фильтр, совпадающий с частотой принимаемого ИК излучения, что позволяет использовать светодиодный излучатель, спектр излучения которого имеет небольшую ширину.

В результате приведённых технических решений, представилась возможность принимать маломощный полезный сигнал на фоне ИК излучения других источников, бытовых приборов, радиаторов отопления и т.д.

Передатчик ИК сигнала

Передатчик ИК сигнала, пульт дистанционного управления, обычно имеет питание от батарейки или аккумулятора. Следовательно, потребление энергии должно быть максимально низким. При этом излучаемый сигнал должен быть хорошей мощности для обеспечения высокой дальности передачи. Такую задачу можно решить, если передавать короткие импульсы, при этом когда импульс отсутствует пульт не тратит энергию. В основные задачи, которые должен решать контроллер передатчика, входят опрашивание кнопок на клавиатуре, которое сопровождается кодированием информации, в зависимости от нажатой кнопки,

создание определённой опорной частоты, и передача всей этой информации на излучатель. В качестве микроконтроллеров пульта могут участвовать AVR или специальные микросхемы. Главной функцией считается режим сна, который обеспечивает очень низкое потребление питания, но при этом пульт должен отзываться на нажатие кнопок.

Во избежание помех от остальных источников во время передачи данных, сигнал подвергают модуляции. Поэтому, вместо того чтобы просто зажечь светодиод, его заставляют мерцать с определённой частотой в тот момент, когда хотим передать нужный пакет импульсов.

Таким способом происходит настройка приёмника чтобы он не реагировал на помехи, создаваемые другими источниками и откликнулся на сигнал определённой частоты.

Обычно используется следующая система: 1 = отсутствие сигнала на приёмнике и 0 = мерцание светодиода - передатчика. В зависимости от протокола, частота мерцания ИК диода меняется от 30 до 60 КГц.

Большая часть передатчиков работает на частоте 30000 - 50000 Гц. Этот диапазон выбрали, когда создавались первые аналогичные устройства. Поскольку нужна была область, в которой уровень помех имел наименьшее значение. Также присутствовало серьёзное ограничение на базу элементов. Поскольку в большинстве распространённой аппаратуры использовалась такая частота, то переход получался нецелесообразным.

Импульсный ток в светодиоде может достигать больших значений при этом он выбирается, отталкиваясь от паспортных значений этого светодиода. Обычно в пультах дистанционного управления импульсный ток не превышает 0,1 А. Исходя из того условия, что частота, являющаяся опорной, имеет низкий коэффициент заполнения и длительность импульсов не выше 0,02 – 0,03 с, то и средний ток не будет выше 0,001 А. Снижение эффективности и уменьшение срока службы сопряжено с повышением импульсного тока светодиода. Современные инфракрасные светодиоды имеют эффективность 0,1 – 0,2 Вт излучаемой энергии при токе 0,05 А. При этом допустимый средний ток не должен превышать 0,01 – 0,2 А. Для снижения воздействия импульсной помехи на питание микроконтроллера, в питании светодиода должен стоять RC фильтр.

Длительность единичного информационного пакета опорной частоты для уверенного приема лежит между 12-15 и 200 периодами. При передаче данных, передатчик в начале формирует преамбулу, которая состоит из одного или нескольких пакетов опорной частоты, позволяющих приёмнику установить нужный уровень усиления и фона. Данные в закодированном сигнале передаются в виде нулей и единиц, которые определяются длительностью или фазой

(расстоянием между соседними информационными пакетами). В общем длительность закодированной посылки обычно составляет от нескольких бит до нескольких десятков байт. Форматом посылки определяется признак начала, порядок следования и количество данных.

Приемник ИК сигнала

Приемник ИК сигнала как правило состоит из приемника ИК излучения и микроконтроллер. Микроконтроллер декодирует пришедший сигнал и выполняет соответствующие действия. Потребление питания приёмником не существенно, поскольку приемник в обычно устанавливается в аппаратуре с сетевым питанием. Микроконтроллер является центральным логическим устройством приёмника поэтому может выполнять и другие сервисные функции в устройстве.

Приемник ИК излучения в большинстве своём выполняется в виде отдельного интегрального модуля, располагающегося за передней панелью управляемой аппаратуры. Такая микросхема, как правило, имеет три вывода – питание, общий и выход сигнала. Производителями предоставляются ИК-приёмники различных типов и исполнения, но принцип их работы схож (рисунок 1.2.5). Внутри такая микросхема имеет:

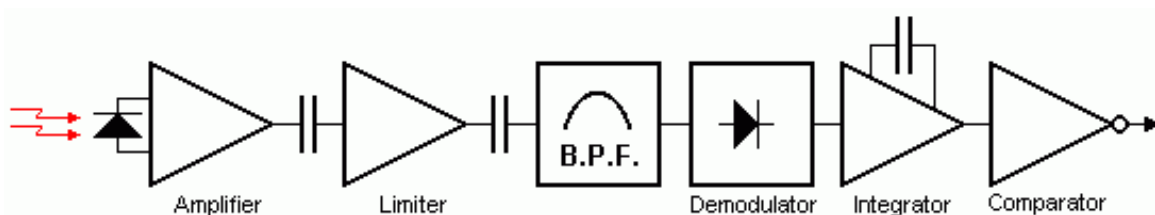


Рисунок 1.2.5 – Структурная схема ИК-приёмника

- 1) фотоприемник - фотодиод
- 2) интегрирующий усилитель (Amplifier), выделяющий полезный сигнал на уровне фона
- 3) ограничитель (Limiter), приводящий сигнал к логическому уровню
- 4) полосовой фильтр (Band Pass Filter (B.P.F.)), настроенный на частоту передатчика
- 5) демодулятор – детектор (Demodulator), выделяющий огибающую полезного сигнала.
- 6) Интегратор и компаратор (Integrator, Comparator), определяющих наличие сигнала нужной частоты и, если он присутствует выставляют на выходе 0, иначе 1.

В качестве дополнительного фильтра приёмник используется и корпус, который выполняется из специального материала, пропускающего ИК-лучи заданной длины волны. Современные интегральные приемники очень чувствительны и позволяют принимать полезный сигнал на уровне фона.

Микроконтроллер производит помеху широкого спектра на линиях питания, поэтому в цепи питания приемника должен присутствовать RC фильтр, чтобы увеличить чувствительности. Если же этого не сделать, то помеха, созданная микроконтроллером может повлиять на работу приемника.

Форматы ИК передачи данных

Производители бытовой аппаратуры используют в своих изделиях различные пульты дистанционного управления. Пульт формирует последовательность данных, подходящую только для своего типа оборудования, потому что он должен общаться только с конкретным устройством. Данные содержат помимо команды управления адрес устройства, данные для проверки и разную другую сервисную информацию. Разные производители применяют разные способы формирования последовательности данных и разные способы передачи логических состояний. Изменение длительности паузы между пакетами и кодирование сочетанием состояний - это наиболее распространенные способы кодирования битов информации.

Протоколы передачи данных

Существует несколько основных протоколов ИК-передачи данных, но часто у разных производителей техники используется собственный протокол. Протоколы похожи между собой и отличаются только длиной импульсов и способом модуляции сигнала.

Всего есть 3 основных типа модуляции:



Рисунок 1.2.6 – Импульсы, соответствующие двухфазному кодированию

Двухфазное кодирование (ДФК) (рисунок 1.2.6). (Manchester modulation)
Время передачи 1 бита постоянное. Если в середине данного интервала фронт импульса, то это соответствует логической 1, если спад – 0.

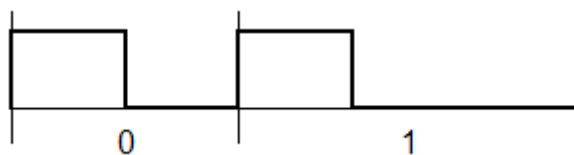


Рисунок 1.2.7 – Импульсы, соответствующие модуляции длительностью пауз

Модуляция длительностью пауз (МДП) (рисунок 1.2.7). (Pulse distance modulation). На рисунке видно, что длительность импульса постоянная, различия только в длине паузы. Большая пауза соответствует логической 1, меньше – 0.

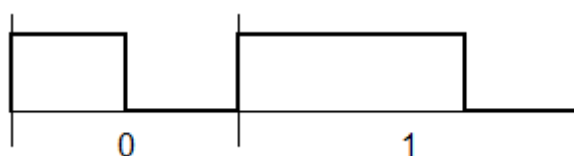


Рисунок 1.2.8 – Импульсы, соответствующие модуляции длительностью импульса

Модуляция длительностью импульса (МДИ) (рисунок 1.2.8). (Pulse length modulation). Длительность пауз – величина постоянная, различия только в продолжительности импульса. Большой импульс соответствует логической 1, меньше – 0.

Теперь разберём из чего состоит сигнал передающийся при помощи ИК связи. В качестве примера рассмотрим протокол передатчика фирмы NEC (рисунок 1.2.9).

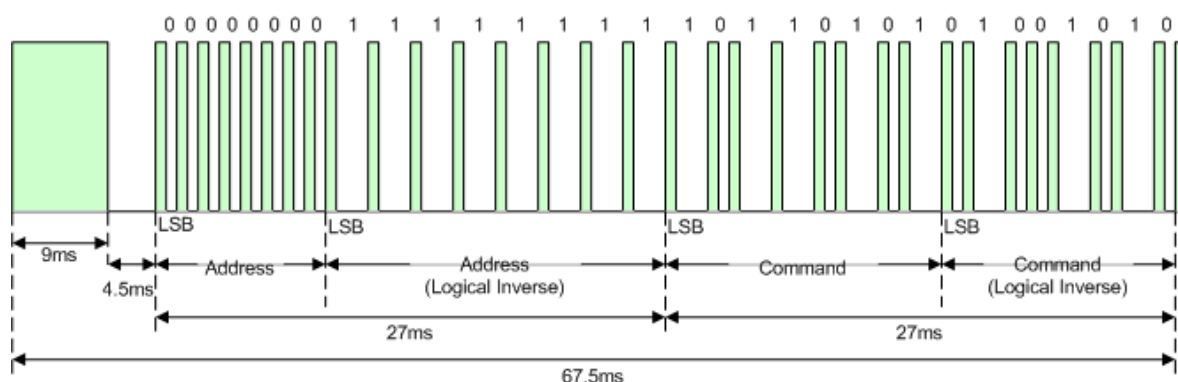


Рисунок 1.2.9 – Протокол передачи сигнала передатчиком фирмы NEC

Вначале идёт импульс автоматической регулировки усиления (АРУ), он использовался в старых ИК приёмниках для настройки усиления (на графике – самый широкий импульс). При помощи этого импульса и паузы после него можно определить тип протокола.

После импульса АРУ, начиная с младшего бита, посылается адрес. Здесь используется МДП, больше пауза = 1. Затем для надёжности передается инвертированный адрес.

Адрес всегда одинаков и не зависит от нажатой кнопки, у разных устройств он отличается (при этом телевизор не реагирует на пульт от музыкального центра даже если они одной фирмы).

В итоге передаётся команда и её инверсия, определяемые нажатой кнопкой на пульте.

Эта информация передаётся только 1 раз. При удержании кнопки нажатой, идёт передача кода повтора (рисунок 1.2.10):

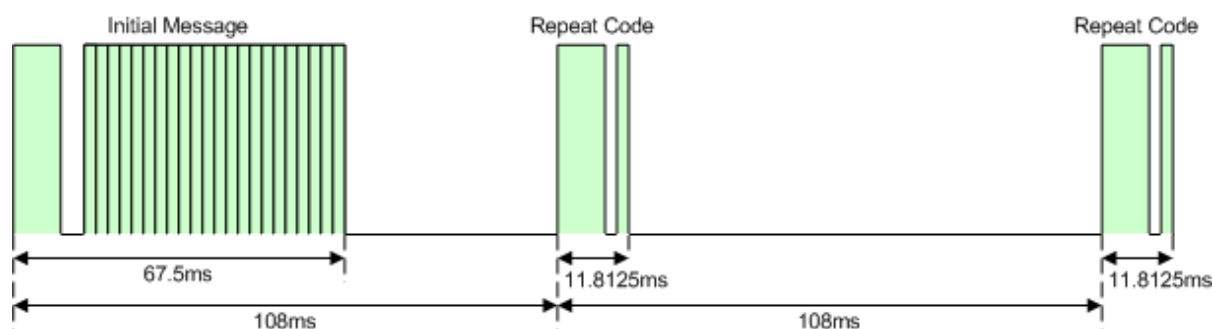


Рисунок 1.2.10 – Импульсы кода повтора

Код повтора представляет собой начальный импульс АРУ с последующим коротким импульсом. [3] [4]

В данной работе был использован пульт дистанционного управления, взятый от mp3. Код приходящий от него к приёмнику, в данном случае TSOP4838, был определён с помощью программно-аппаратной платформы Arduino.

1.2.3. Задача №3. Регулирование расстояния между электродами

Регулирование электродов будет осуществляться при помощи шагового двигателя, потому что они позволяют точно регулировать вращение вала, что позволяет задавать шаг и дробить его на более мелкие.

1.2.3.1. Виды шаговых двигателей

Известно три основных типа шаговых двигателей:

1. Гибридные двигатели.

2. Двигатели с постоянными магнитами.
3. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением.

Определить тип двигателя можно при помощи вращения вала обесточенного двигателя с постоянными магнитами (или гибридного) вручную при этом чувствуется сопротивление вращению, двигатель вращается, но как будто щелчками. Когда же вращаешь вал обесточенного двигателя с переменным магнитным сопротивлением вращение происходит свободно, так как на обмотках переменных магнитов нет тока, и сопротивлению вращению неоткуда взяться. Дальнейшим усовершенствованием двигателей с постоянными магнитами являются гибридные двигатели, но по способу управления они ничем друг от друга не отличаются. Тип двигателя можно также определить по конфигурации обмоток. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением обычно имеют три, иногда четыре, обмотки с одним общим выводом. Двигатели с постоянными магнитами имеют две независимые обмотки. У этих обмоток могут быть отводы от середины, для более точного регулирования шага вращения вала. Бывают двигатели с постоянными магнитами у которых имеется 4 отдельных обмотки, но из-за этого у них более громоздкая схема для системы управления.

Вращающий момент в шаговом двигателе создается магнитными потоками, создающимися статором и ротором, которые соответствующим образом ориентированы друг относительно друга. Статор изготавливается из материала, имеющего высокую магнитную проницаемость, также он имеет несколько полюсов. Полюс определяется, как некоторая область намагниченного тела, где сконцентрировано магнитное поле. Ротор также, как и статор имеет полюса. Для того, чтобы уменьшить потери на вихревые токи, магнитопроводы собирают из отдельных пластин, как сердечник трансформатора. Вращающий момент пропорционален величине магнитного поля, которая в свою очередь пропорциональна количеству витков и току в обмотках. Ротор принимает определенное положение, если хотя бы одна обмотка шагового двигателя запитана. Вал будет находиться в данном положении до тех пор, пока внешний приложенный момент не превысит значение момента удержания. После этого ротор повернется в следующее положение равновесия.

1.2.3.2. Биполярные и униполярные шаговые двигатели

По конфигурации обмоток двигателя можно разделить на биполярные и униполярные.

Биполярный двигатель имеет две обмотки, которые переполюсовываются при помощи драйвера для изменения направления магнитного поля. Для таких двигателей применяются мостовые драйверы, или может использоваться

полумостовой драйвер с двухполярным питанием. Так как биполярный двигатель имеет две обмотки у него всего четыре вывода (рисунок 1.2.11 (а)).

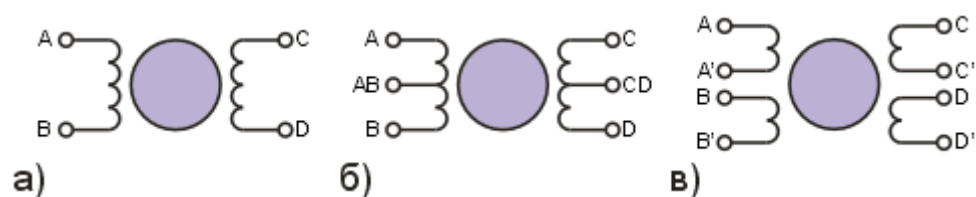


Рисунок 1.2.11 – Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырехобмоточный (в)

Униполярный двигатель также имеет две обмотки, но у них сделан отвод от середины обмотки. Благодаря такому решению изменение направления магнитного поля происходит простым переключением полуобмоток. Схема драйвера в этом случае сильно упрощается и имеет всего 4 простых ключа. Поэтому, способ изменения направления магнитного поля в униполярных двигателях имеет другой характер. Часто средние выводы обмоток объединяют внутри двигателя, поэтому униполярные двигатели могут иметь 5-6 выводов (рисунок 1.2.11 (б)). Существуют униполярные двигатели с 4 отдельными обмотками, по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями, поэтому у них в общей сумме 8 выводов (рисунок 1.2.11 (в)). Данный двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный при определённом соединении обмоток. Обычный униполярный двигатель с двумя обмотками если отводы оставить неподключенными тоже можно использовать в биполярном режиме.

Удельная мощность биполярных двигателей выше чем у униполярных, потому что биполярные двигатели обладают большим моментом. Момент шагового двигателя пропорционален величине магнитного поля, созданного обмотками статора. Магнитное поле можно увеличить за счёт увеличения тока или числа витков обмоток.

Необходимо помнить об омических потерях в обмотках, которые способствуют нагреву двигателя. В этом и состоит преимущество биполярных двигателей перед униполярными. В униполярных двигателях используется лишь половина обмоток в каждый момент времени, а другая половина просто занимает место в сердечника, поэтому провода обмотки в них меньшего диаметра. При этом в биполярном двигателе в любой момент времени работают все обмотки и их использование оптимально. В таких двигателях у проводов отдельных обмоток сечение вдвое больше, соответственно, омическое сопротивление вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток, но потери будут те же, что дает выигрыш в моменте. Но на практике очень часто применяют униполярные двигатели, потому

что они не требуют сложных схем управления обмотками. Это важно, если драйверы выполнены на дискретных компонентах.

Существует несколько вариантов управления фазами шагового двигателя.

Первый способ обеспечивается попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рисунок 1.2.12). Поэтому точки равновесия ротора при каждом шаге совпадают с точками равновесия ротора обесточенного двигателя. Однако при использовании данного режима не может быть получен полный момент, из-за того, что в каждый момент времени используется только 1/2 от 100% обмоток, для биполярного двигателя, для униполярного – всего 1/4 от 100% обмоток.

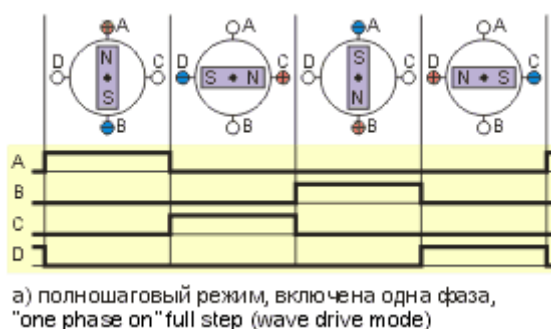


Рисунок 1.2.12 – Полношаговый режим, при включении одной фазы

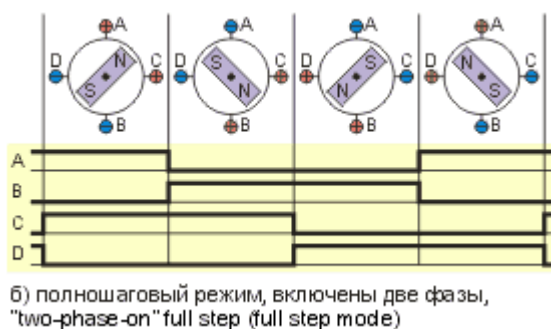


Рисунок 1.2.13 – Полношаговый режим, при включенных одновременно двух фазах

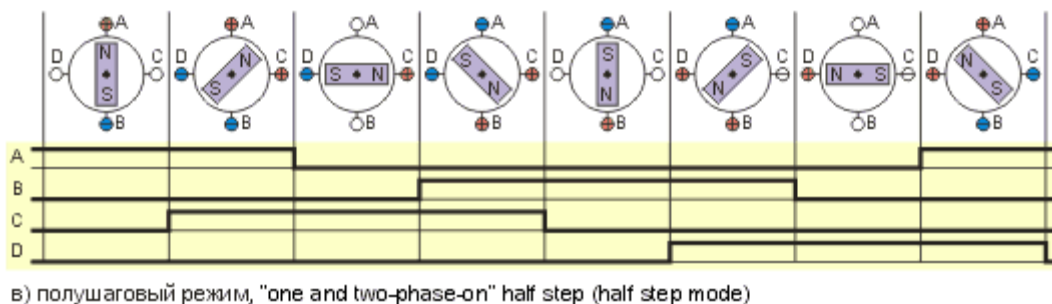


Рисунок 1.2.14 – Полушаговый режим

Второй способ обеспечивается управлением фазами с перекрытием: в одно и то же время включены две фазы. В данном способе управления ротор постоянно фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рисунок 1.2.13) что обеспечивает больший момент, по сравнению со способом одной включенной фазы. При управлении фазами с перекрытием, положение точек равновесия ротора смещено на полшага, но угол шага такой же, как и в способе попеременной коммутации фаз.

Третий способ обеспечивает шаг в половину основного, является комбинацией двух предыдущих способов. Данный метод управления очень распространен, поскольку предоставляется возможность получить от двигателя в два раза больше шагов за оборот, а поскольку двигатель с меньшим шагом стоит дороже, этот способ управления является очень выгодным, когда нет возможности приобретать дорогие двигатели. Каждый второй шаг питание приходит на одну фазу, а в остальных случаях осуществляется питание двух фаз (рисунок 1.2.14). Помимо дробления шага этот способ управления двигателем позволяет в какой-то мере избавиться от такого явления как резонанс.

Следующий способ управления называется микрошаговым. При этом способе управления обеспечивается дробление половинного шага на более маленькие шаги, для этого ток в фазах необходимо менять небольшими шагами. Положение равновесия ротора будет лежать не в середине шага, если одновременно включены две фазы, но при этом их токи не равны, а он будет находиться в месте, которое определится соотношением токов фаз. Изменяя соотношение токов фаз, обеспечивается какое-то число микрошагов внутри одного полного шага. Однако, для обеспечения микрошагового режима необходимы более сложные драйверы, которые позволяют задавать ток в обмотках с нужной дискретностью.

В полношаговом режиме с двумя включенными фазами, а также для полушагового и микрошагового режимов, точки равновесия ротора смещены на определенное значение, для каждого режима оно своё. Необходимо отметить то, что ротор находится в этих положениях во время работы двигателя, но после выключения тока в обмотках положение ротора перестаёт быть неизменным. Поэтому ротор двигателя будет смещаться на полшага во время включения и выключения питания. Чтобы ротор не смещался во время остановки, нужно обеспечить подачу тока удержания на обмотки.

Поскольку от двигателя с неподвижным ротором не нужно большого момента, ток удержания может быть меньше номинального. Благодаря току удержания появляется возможность обходиться без механических тормозных систем. Получение нужного тока удержания обеспечивают современные

драйверы, которые без проблем позволяют регулировать ток питания обмоток двигателя.

1.2.3.3. Полушаговый режим

Для работы шагового двигателя необходимо создать вращающееся магнитное поле, заставляющее вращаться ротор. Такое магнитное поле создается статором, на обмотки которого определённым образом подаётся питание.

Для двигателя, у которого питание подаётся на одну обмотку, зависимость момента от угла поворота ротора относительно точки равновесия является приблизительно синусоидальной. Эта зависимость для двухобмоточного двигателя, который имеет N шагов на оборот (угол шага в радианах $S = (2 \cdot \pi) / N$) (рисунок 1.2.15).

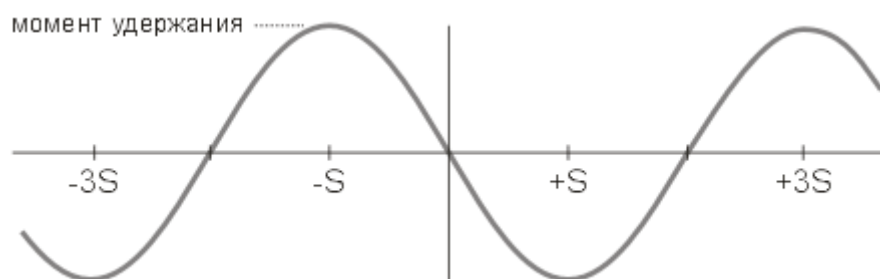


Рисунок 1.2.15 – Зависимость момента двигателя от угла поворота ротора для одной запитанной обмотки

Поскольку геометрия ротора и статора не идеальна, в реальности характер зависимости может быть немного другой.

Для того, чтобы ротор повернулся к нему необходимо приложить внешний момент, превышающий момент удержания. При внешнем моменте не превышающим момента удержания, ротор будет находиться в одной из точек равновесия. Поскольку ротор двигателя содержит постоянные магниты, даже когда двигатель не питают у него присутствует момент удержания.

1.2.3.4. Микрошаговый режим

Для обеспечения микрошагового режима необходимо получить более плавное вращение магнитного поля статора чем в полношаговом и полушаговом режимах. Известно большое количество различных микрошаговых режимов, с величиной шага от $1/3$ полного шага до $1/32$ и даже меньше.

Микрошаговый режим также используют для увеличения точности величины шага выше той, о которой заявил производитель двигателя. При этом используется номинальное число шагов. Чтобы повысить точность положения ротора, необходимо использовать коррекцию в точках равновесия. При

использовании данного метода, необходима предварительная калибровка и микроконтроллер позволяющий привлечь дополнительные ресурсы. Помимо всего этого, необходим датчик начального положения ротора для того, чтобы синхронизировать его положения с таблицей корректирующих коэффициентов.

Резонанс

У шаговых двигателей присутствует нежелательный эффект, именуемый резонансом. Этот эффект проявляется на некоторых скоростях в виде внезапного падения момента, что может привести к потере синхронности и пропуску шагов. Резонанс проявляется, когда частота шагов начинает совпадать с собственной резонансной частотой ротора двигателя.

Для борьбы с резонансом существуют разные способы. Одним из способов является использование эластичных материалов при выполнении механических муфт связи с нагрузкой. Эластичные материалы поглощают энергию в резонансной системе, из-за чего происходит затухание паразитных колебаний. Другой способ – это применение вязкого трения. Данная система демпфирования состоит из полого цилиндра, в котором вращается металлический диск, при этом цилиндр заполнен вязкой смазкой. Когда эта система начинает вращаться, диск испытывает вязкое трение, что достаточно эффективно демпфирует систему.

Так же существуют электрические способы избавления от резонанса. При колебаниях ротора в обмотках статора возникает ЭДС, которая способствует возникновению резонанса. Демпфировать этот эффект можно закоротив обмотки, которые на данном шаге не используются.

Бороться с резонансом можно также при помощи настройки алгоритма работы драйвера. К примеру, если воспользоваться фактом, что во время работы с двумя включенными фазами резонансная частота выше, чем с одной включенной фазой и эта частота точно известна, то ее можно проходить, меняя режим работы.

Однако, самая эффективная мера для предотвращения появления резонанса – это применение микрошагового режима.

В отличие от двигателя постоянного тока, которому нужен лишь источник постоянного напряжения и необходимые коммутации обмоток выполняются коллектором, у шагового двигателя коммутации выполняются внешним контроллером. Самый простой способ управлять шаговым двигателем при помощи двух сигналов, сдвинутых по фазе на 90 градусов. Таким образом может быть осуществлён полношаговый режим. В зависимости от того какая фаза опережает, будет определяться направление вращения. Частота следования импульсов определяет скорость вращения. В полушаговом режиме уже нужно как минимум 4 сигнала. Сигналы управления шаговым двигателем возможно

формировать программно, но при этом возникает большая нагрузка микроконтроллера. Из-за этого применяют специальные микросхемы драйверов шагового двигателя, которые уменьшают количество запрашиваемых от процессора сигналов. Обычно таким микросхем нужна тактовая частота, являющаяся частотой повторения шагов и статический сигнал, задающий направление. Большее количество сигналов необходимо драйверам, работающим в микрошаговом режиме. Часто функции разделяются между микросхемами, например, подача сигналов управления фазами обеспечивается одной микросхемой, а требуемые токи фаз обеспечивает другая микросхема. Однако в настоящее время производится все больше драйверов, сочетающих все функции в одной микросхеме.

Мощность драйвера, зависит от размеров двигателя и составляет доли ватта для маленьких двигателей и десятки ватт для больших двигателей. Максимальная рассеиваемая мощность ограничена нагревом двигателя. В некоторых случаях возможно применение охлаждающего радиатора, что позволяет применять двигатель меньших размеров и добиться наилучшего отношения мощности к стоимости.

Схема, используемая в драйвере, должна выполнять три главных задачи:

- 1) поддерживать нужное значение тока
- 2) обеспечить возможность включения и отключения тока в обмотках и менять его направление
- 3) обеспечить наиболее быстрое нарастание и спад тока для нормальных скоростных характеристик

Стабилизация тока

Для того, чтобы регулировать момент необходимо обеспечить регулировку силы тока в обмотках. Поскольку мощность, рассеиваемая на обмотках не должна быть превышена, необходимо ограничивать ток. Также, в полушаговом режиме в определенные моменты времени необходимо обеспечивать нулевое значение тока в обмотках, а в микрошаговом режиме необходимо задавать разные значения тока.

Использование источника постоянного напряжения является простейшим способом питания обмоток. Ток ограничивается сопротивлением обмоток и напряжением источника питания. Такой способ питания носит название L/R-питание. Нарастание тока происходит по экспоненте со скоростью, которая определяется активным сопротивлением обмотки, приложенным напряжением и индуктивностью. Однако этот метод подходит для работы на невысоких скоростях и для двигателей малой мощности, поскольку момент падает, когда происходит увеличение частоты и ток не достигает номинального значения.

Когда требуется работать на больших скоростях необходимо увеличить скорость нарастания тока в обмотках, что достигается путём увеличения напряжения источника питания. Ограничение максимального тока обмотки в данном случае происходит при помощи дополнительного резистора. Использование такого способа питания осуществляет наиболее быстрое нарастание тока, что позволяет получить больший момент. Однако резистор рассеивает дополнительную мощность, что является существенным недостатком. Повышенная мощность источника питания, необходимость отводить тепло и большие размеры мощных резисторов делают данный способ малоэффективным и подходящим только для работы с маленькими двигателями с мощностью в единицы ватт.

Нарастание тока, более быстрое, можно обеспечить если использовать в качестве источника питания генератор тока. Это позволит производить нарастание тока линейно, что позволит достигнуть номинального тока в более короткие промежутки времени. При этом, мощные транзисторы плюс радиаторы могут стоить дешевле чем мощные резисторы. Однако, генератор также рассеивает дополнительную мощность, что позволяет назвать данный способ малоэффективным.

Стабилизации тока также можно достигнуть при помощи широтно-импульсного регулирования. Данный метод используется в современных драйверах для шаговых двигателей. Стабилизатор, в котором используется широтно-импульсное регулирование, позволяет достичь высокой скорости нарастания тока в обмотках. При этом он обеспечивает простоту регулирования тока с очень небольшими потерями. Также преимуществом данного способа можно назвать то, что момент двигателя поддерживается постоянным, даже когда присутствуют колебания напряжения. Это преимущество делает возможным использование дешёвых нестабилизированных источников питания.

Высокая скорость нарастания тока может быть обеспечена путём использования источника напряжения, которое в несколько раз превышает номинальное. Среднее значение напряжения и тока устанавливаются на номинальном уровне, регулированием скважности импульсов. Изменение тока и напряжения позволяет избежать обратная связь. С обмоткой, последовательно, включается резистор, который играет роль датчика тока. Напряжение, которое падает на резисторе, соответствует току, протекающего в обмотке. Ключ выключается при достижении установленного значения тока. Это приводит к тому, что ток спадает до нижнего порога и ключ опять переходит в состояние включения. Этот процесс поддерживает средний ток, поскольку повторяется периодически.

При помощи ЦАП, у которого форма синусоиды, можно задавать ток фазы и реализовать микрошаговый режим. Этот способ управления ключевым элементом позволяет величину пульсаций тока в обмотках сделать постоянной. При этом от скорости изменения тока будет зависеть частота переключений. Также она зависит от напряжения питания и индуктивности обмоток. Помимо этого, при питании разных фаз двигателя, у таких схем могут появиться дополнительные помехи, которые возникают из-за того, что эти схемы нельзя синхронизировать.

У схемы с постоянной частотой переключения, отсутствуют вышеуказанные недостатки. Управление ключевым элементом осуществляется триггером, который устанавливается специальным генератором. Ключевым транзистором управляет триггер, который устанавливается специальным генератором. Ток фазы начинает расти при открытии ключевого элемента. Тот в свою очередь открывается после того, как триггер установится. Вместе с током фазы начинает расти падение напряжения на датчике тока. При достижении этим напряжением опорного, происходит переключение компаратора, при котором сбрасывается триггер. После чего ключ выключается, приводя к тому, что ток фазы начинает спадать, генератор снова не установит триггер. Данный вариант способен создать постоянную частоту коммутации, но при этом пульсации токов не постоянны. Чтобы не было слышимого звука, создаваемого двигателем, частота генератора не должна быть меньше 20000 Гц. При этом, если обеспечить слишком высокую частоту переключений, в сердечнике могут возникнуть повышенные потери. А также повысятся потери на переключения ключевых элементов.

Реализация драйверов в практике

Драйвером шагового двигателя такие задачи как формирование сигналов, нужной временной последовательности, и подачу требуемого тока в обмотках. Прибегая к интегральным способам реализации периодически задачи драйвера могут решаться разными микросхемами.

Однако в практике возможно обходиться и без специальных микросхем. Функции, которые выполнял контроллер, можно осуществить программно, а драйвер заменить набором дискретных транзисторов. При этом схема драйвера выйдет громоздкой и загрузка микроконтроллера будет довольно сильной. Тем не менее, такое решение в определённых случаях может оказаться более экономически выгодно. [6][8]

Драйверы для униполярных двигателей, являются самыми простыми. Для управления током в обмотках этих двигателей могут подойти и обычные ключи такие, как полевые и биполярные транзисторы. Также на рынке имеются

специализированные микросхемы, содержащие внутри некоторое количество подобных ключевых элементов. В качестве примера можно привести микросхему ULN2003, в которой содержится семь ключей с максимальным током 500 мА. Принципиальная схема одной ячейки микросхемы ULN2003 (рисунок 1.2.16).

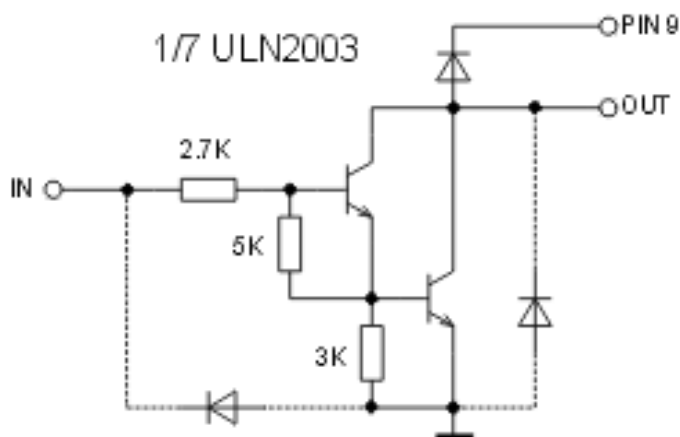


Рисунок 1.2.16 – Принципиальная схема одной ячейки микросхемы ULN2003

Похожие микросхемы производятся разными фирмами. Можно также отметить, что такие микросхемы подходят для питания различных нагрузок, помимо шаговых двигателей. Также, существуют более сложные микросхемы, в состав которых входят встроенные контроллеры, ШИМ-регуляторы тока, а также возможны модели с ЦАП для осуществления микрошагового режима.

Биполярные двигатели уже требуют более сложные схемы управления. Например, H-мосты. В настоящее время эти схемы выполняются на интегральных схемах, но они также могут быть выполнены и на дискретных элементах (рисунок 1.2.17).

Управление H-мостом осуществляется при помощи двух сигналов, что не позволяет этой схеме предоставить все необходимые комбинации. Чтобы запитать обмотку на входах схемы должны быть разные уровни, и чтобы закоротить обмотку уровни на входах должны быть одинаковыми. Таким образом осуществляется динамическое торможение, характеризующееся медленным спадом тока. Драйверы с мостовой архитектурой в интегральном исполнении выпускаются различными производителями. В качестве примера можно привести микросхему L293 и L298.

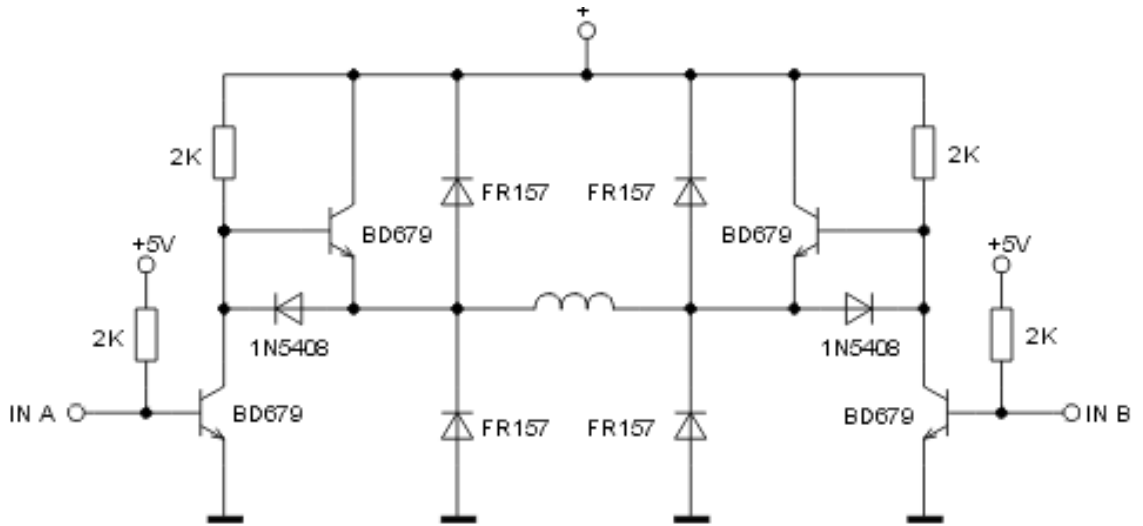


Рисунок 1.2.17 – Реализация мостового драйвера на дискретных компонентах

Н-мосты, а также обычные ключи, могут входить в состав стабилизатора тока. Ключами может управлять как схема, исполненная в качестве специальной микросхемы, так и на дискретных элементах. Достаточно известной микросхемой, которая осуществляет ШИМ-стабилизацию тока, можно назвать L297. Если эту микросхему, объединить в одну систему с драйвером с мостовой архитектурой, можно получить полноценную систему управления шаговым двигателем (рисунок 1.2.18).

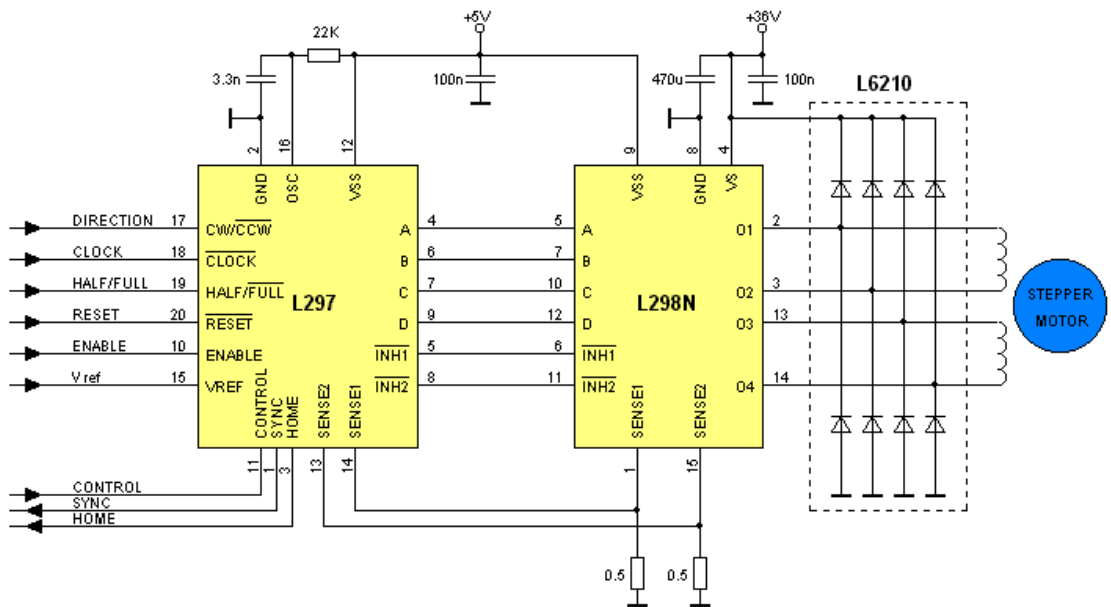


Рисунок 1.2.18 – Типовая схема включения микросхем L297 и L298N

Управляющий микроконтроллер очень хорошо разгружается микросхемой L297, поскольку от микроконтроллера подаётся только тактовая частота повторения шагов (CLOCK) и следующие статические сигналы: RESET – фазы устанавливаются в исходное состояние, DIRECTION – задаёт направление, V ref –

значение опорного напряжения, задающего пиковую величину тока с помощью ШИМ-регулирования, HALF/FULL – задание режима полушагового/полношагового, ENABLE – разрешение работы микросхемы. Также присутствуют дополнительные сигналы, например, такой как, CONTROL, который задает режим работы ШИМ-регулятора. SYNC – выход тактового внутреннего генератора ШИМ. Этот вывод нужен для того, чтобы синхронизировать несколько микросхем. Ещё он может участвовать как вход, когда такт задаётся от внешнего генератора. HOME – сигнал, определяющий начальное положение. Этот сигнал синхронизирует переключение полношагового и полушагового режимов. В зависимости от того, в каком режиме полношаговом или полушаговом, микросхема может осуществить режим работы с одной запитанной фазой или с двумя запитанными фазами.

Существуют также драйверы, обладающие какими-либо особенностями. Например, микросхема LMD18T245, интересна тем, что применять внешний датчик тока не обязательно, поскольку этот датчик реализован внутри данной микросхемы.

Например, микросхема A3955 специализирована для работы в микрошаговом режиме. Она способна задавать ток фазы, который изменяется по синусоиде, при помощи ЦАП, который встроен в корпус микросхемы.

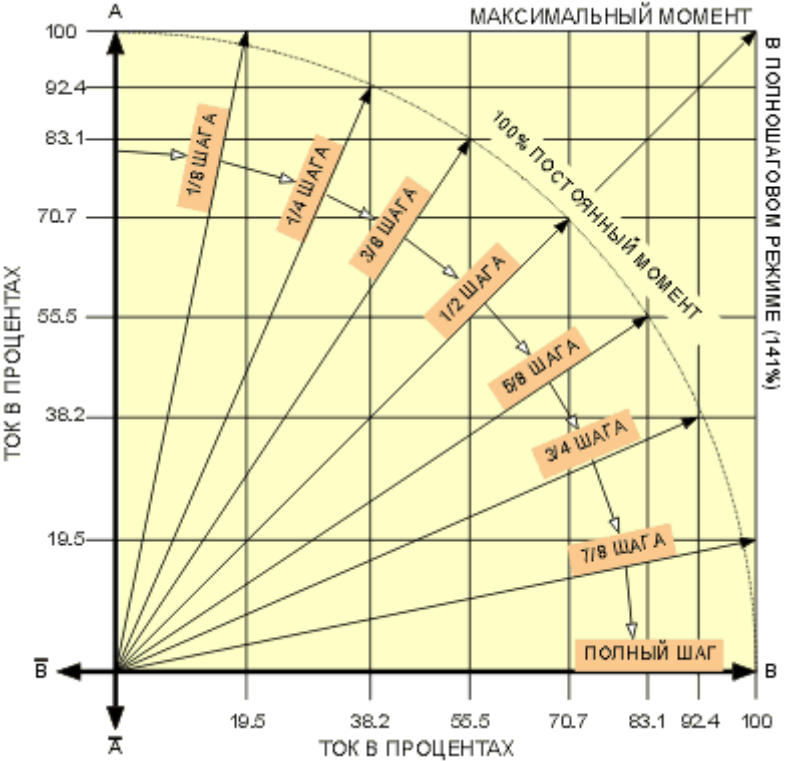


Рисунок 1.2.19 – Ток и вектор смещения ротора

Смещение ротора в зависимости от токов фаз, которые сформированы этим 3-битным нелинейным ЦАП (рисунок 1.2.19). Также есть микросхема А3972 имеющая встроенный 6-битный линейный ЦАП.

1.2.3.5. Выбор типа драйвера

Значения максимальной мощности и момента зависят от следующих параметров: условий охлаждения, габаритов двигателя, параметров обмоток, режима работы и от того какой драйвер используется. Мощность на валу двигателя поддается влиянию используемого драйвера. Если сравнивать питание обмоток номинальным напряжением и использование импульсной стабилизации тока, то применение второго варианта способно обеспечить преимущество в моменте. Этот способ питания позволяет сделать шире диапазон допустимых скоростей. [6][7]

Постоянно развивается технология приводов, основанных на шаговых двигателях. Главными задачами этого развития являются увеличение диапазона скоростных возможностей, при минимальных размерах двигателя получить наибольший момент, повысить точность и КПД. Микрошаговый режим является важным элементом этой технологии.

Практика показала, что важным параметром в разработке привода, в основе которого лежит шаговый двигатель, является время его разработки. Для каждого конкретного случая больших временных затрат требует разработка специальной конструкции. Поэтому, если смотреть с такой точки зрения, использование более дорогостоящих схем управления, основанных на ШИМ стабилизации тока, являются наиболее предпочтительными, поскольку они обладают нужной универсальностью. [6]

В итоге нами был выбран биполярный шаговый двигатель из CDROM компьютера. Он является наиболее удобным, т.к. уже имеет в наличии готовый корпус и каретку, на которую будут монтироваться электроды.

1.2.4. Задача №4. Изменение напряжения в пробойном промежутке

Изменение напряжения в пробойном промежутке будет осуществляться посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Источником ШИМ является аппаратно-программная платформа Arduino.

1.2.4.1. Как происходит пробой воздуха

В сильных электрических полях появляются явления, которые относятся к ионизационным процессам. Когда возрастает напряжение у тока появляется 3

характерных участка (рисунок 1.2.20). Один участок имеет линейную зависимость, на следующем происходит насыщение и на последнем происходит рост тока по экспоненте. В последней области быстро происходит рост диэлектрических потерь. Это осуществляется из-за такого явления, как ударная ионизация, появлению которого предшествует появление носителей заряда в пробойном промежутке.

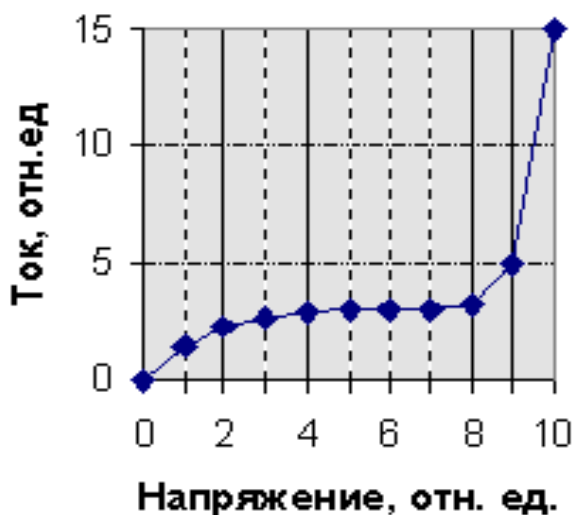


Рисунок 1.2.20 – Зависимость тока в газе от напряжения

Ударной ионизацией называют явление, при котором происходит увеличение количества положительных зарядов (ионов) и отрицательных зарядов (электронов) в пробойном промежутке, которые появляются, когда происходит столкновение электронов, у которых повышена энергия, с нейтральными молекулами.

Когда электрон находится в электрическом поле на него действует сила, которая позволяет ему ускориться и повысить свою энергию. Эта энергия будет разной, в зависимости от расстояния, пройденного электроном. Также будет происходить трата энергии ионизации.

Для прохождения ионизации посредством электронов необходимо, чтобы налетающий электрон имел кинетическую энергию больше чем энергию ионизации. В этой ситуации ионизацию называют прямой.

Также существует ассоциативная ионизация, которая может возникнуть при энергии налетающего электрона меньшего значения, но она должна быть больше энергии возбуждения.

Ещё возможны следующие виды ионизации – это термоионизация, фотоионизация, автоионизация.

Термоионизация обеспечивает возникновение свободных носителей заряда при помощи тепловой энергии. Термоионизация приобретает высокие скорости при достижении высоких температур, которые достигают тысячи градусов.

Фотоионизация обеспечивает возникновение свободных носителей заряда посредством выбивания их с какой-либо поверхности, при этом энергия фотона должна быть больше или равной энергии ионизации.

Автоионизация обеспечивает возникновение свободных носителей заряда посредством сильных электрических полей, которые из молекулы вырывают электрон. Автоионизация начинает эффективно работать при значениях электрического поля более десятка мегавольт на сантиметр. При использовании электрической изоляции в реальности, необходимо обращать внимание к контакту электродов с диэлектриком. Поскольку может появиться новые источники возникновения свободных носителей заряда благодаря явлениям автоионизации и фотоэффекта.

Электрон прежде чем столкнуться с молекулой должен пройти некоторое расстояние, при этом на него действует электрическое поле. Это расстояние является средним расстоянием, прохождение которого происходит до столкновения с препятствием в виде молекулы. Такое расстояние именуется длиной свободного пробега.

Таким образом при каждом столкновении происходит потеря энергии и электрон поэтому не может иметь бесконечное ускорение, при этом для определённого значения электрического поля существует определённая подвижность носителя заряда.

Известно, что длина свободного пробега электрона в несколько раз больше, чем у иона, поэтому ударная ионизация, вызванная ионами, имеет очень низкую вероятность.

При достаточной энергии при необходимой длине пробега, когда происходит столкновение электрона с молекулой появляется по одному свободному носителю заряда (иону и электрону), а когда происходит второе столкновение появляются ещё по два носителя заряда. Так возникает явление носящее название лавины.

Явление электронной лавины характеризуется тем, что увеличение числа ионов и электронов происходит по экспоненте, под действием ударной ионизации. У ударной ионизации есть некоторый коэффициент, который так и называется, коэффициент ударной ионизации. Этот коэффициент зависит от напряжённости поля, длины свободного пробега.

Для того, чтобы возник пробой, требуется возникновение на катоде электрона, который после прохождения первой лавины, должен запустить возникновение следующей. И так пока не произойдёт пробой межэлектродного промежутка. Для возникновения самостоятельности прохождения разряда требуется осуществлять выбивание электронов при помощи фотонов или задействовав положительные ионы.

Таким образом для обеспечения самостоятельности разряда требуется возникновение на катоде электрона по прохождении первой лавины.

Для пробоя газов существует определённая кривая (рисунок 1.2.21). Её положение и значение зависит от типа среды, в которой происходит пробой.

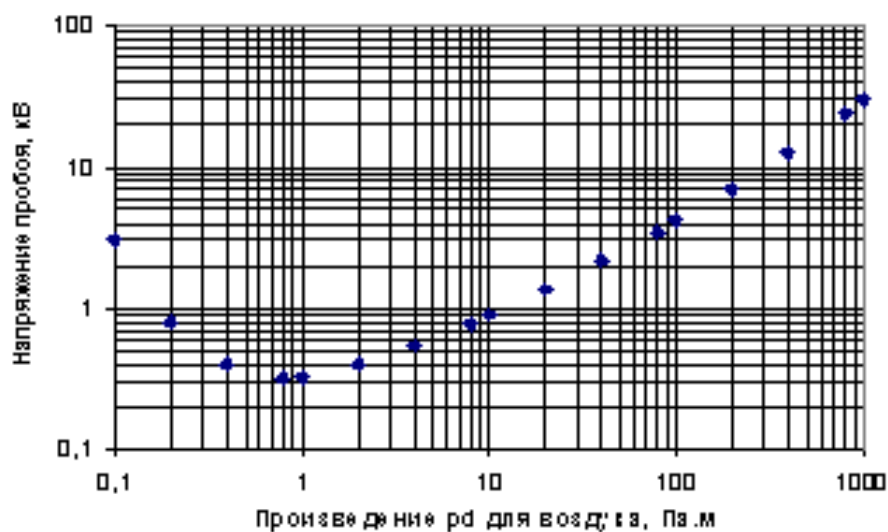


Рисунок 1.2.21 – Кривая Пашена для лавинного пробоя воздушного промежутка.

Пробой воздушного промежутка сопровождается образованием плазмы. После появляется возможность получения разных типов разрядов. Например, при условии, когда среда имеет низкое давление и источник не имеет достаточной мощности, в зазоре возникает тлеющий разряд. Такой разряд возникает по всему объёму пробойного промежутка и у него присутствуют несколько зон, которые можно назвать характерными. Одна из которых светящийся анодный столб, который применяют в качестве источника свечения в люминесцентных лампах. Это свечение происходит благодаря излучению молекул, находящихся в возбуждённом состоянии.

Следующий разряд называется дуговым. Он происходит при использовании мощных источников напряжения. Такой разряд нашёл применение в промышленности для электросварки.

В действительности закон Пашена выполняется при совершенно маленьком давлении и зазорах. В более крупных промежутках и при повышении давления до нормы и выше протекание пробоя изменяется. Всё потому, что, удлиняя лавину происходит нарастание заряда у фронта лавины, во время её развития, в ту же очередь происходит и нарастание напряжённости электрического поля. При этом появляется возможность разряду распространяться почти без участия, в этом процессе, электродов, поскольку напряжённость достигает довольно высокого уровня. В этот момент осуществляется переход многолавинового разряда в стримерный.

Стримером называют светящееся локальное образование, которое состоит из плазмы и помимо того являющимся проводящим, и при этом имеющее высокую скорость распространения.

Посредством увеличения длины пробойного промежутка появляется возможность получения повтора стримера. Когда проходит стример среда нагревается и её плотность уменьшается, приводя к уменьшению электрической прочности, при этом возникает возможность распространяться новым стримерам. Так возникает термоионизация и повышается электропроводность. При этом возникает структура, осуществляющая пробой в длинных промежутках. Такой вид пробоя реализуется в ЛЭП (линиях электропередач).

Ещё один вид разряда называется корона. Это явление возникает вблизи электрода, в местах достижения локальным полем больших значений. Процессы, происходящие в данном разряде, производят шумы в радиочастотном диапазоне, приводят к потерям энергии.

Также существует такое явление, как аномальный разряд. Он появляется в очень больших промежутках и при чрезмерно высоком напряжении. При таких условиях получает возможность развития в произвольном направлении. Такой разряд был получен на специальном высоковольтном стенде (в Сибирском НИИ Энергетики). Во время эксперимента было замечено, что в не во всех случаях промежуток пробивался разрядом. Разряд уходил в сторону, например, к ЛЭП. Похожие эксперименты показывают, что не везде можно использовать повышенные классы напряжений, например, при строительстве ЛЭП. [10][12]

Можно отметить следующее, пользуясь эмпирическими зависимостями электрической прочности газов от внешних факторов (Рисунок 1.2.22):

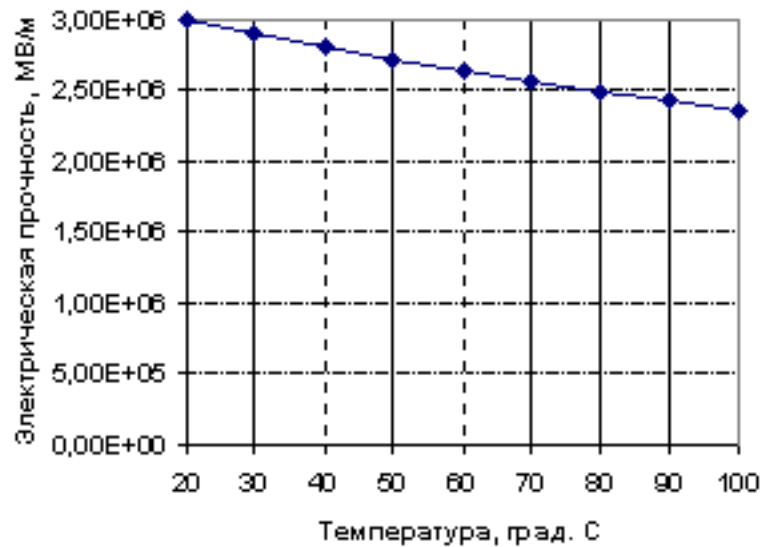


Рисунок 1.2.22 – Зависимость электрической прочности воздуха при нормальных условиях от температуры

Зависимость от температуры при постоянном давлении при росте температуры происходит уменьшение плотности газа.

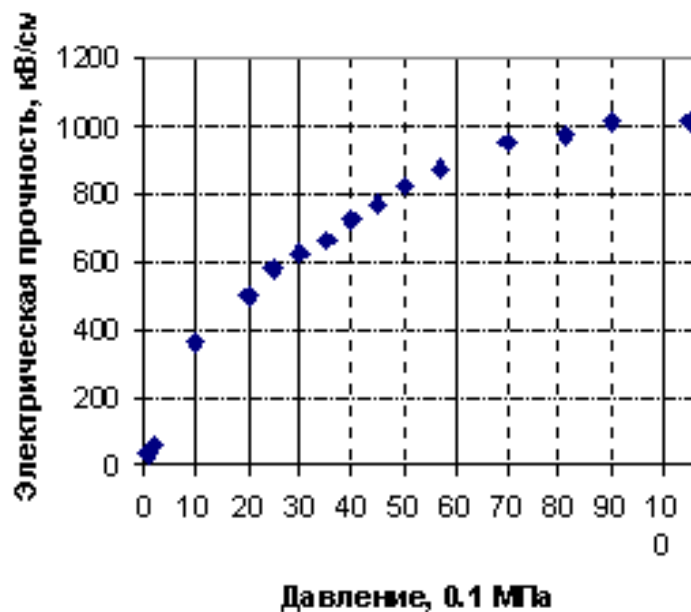


Рисунок 1.2.23 – Электрическая прочность воздушного промежутка 1 мм при высоких давлениях

Зависимость от давления (рисунок 1.2.23). Эта зависимость эквивалентна кривой Пашена при определённом значении переменной pd и присутствии лавинного пробоя. При более больших значениях давления и расстояниях промежутков, характеристика принимает вид кривой с насыщением. [9][12]

При постоянном давлении характеристика и лавинном пробое, показывающая зависимость электрической прочности от пробойного промежутка, очень похожа на кривую Пашена.

Когда заходит речь о зависимости от площади электродов, её обычно можно объяснить, что с увеличением площади увеличивается количество неоднородностей поверхности, которые и уменьшают электрическую прочность.

При зависимости от влажности происходит уменьшение напряжения пробоя при увеличении влажности, особенно когда образуется водяная плёнка, образующаяся при достижении определённого уровня влажности.

Импульсный пробой газа характеризуется тем, что относительно статического уровня происходит увеличение электрической прочности. Это обусловлено тем, что формирование заряда имеет конечный промежуток времени, что также обусловлено появлением лавин и стримеров. При этом увеличение напряжения пробоя может достигнуть высокого уровня. [12]

2. Проектная часть

2.1. Решение задач

Из анализа функций разрабатываемого устройства [13] была разработана структурная схема системы управления (рисунок. 2.1).

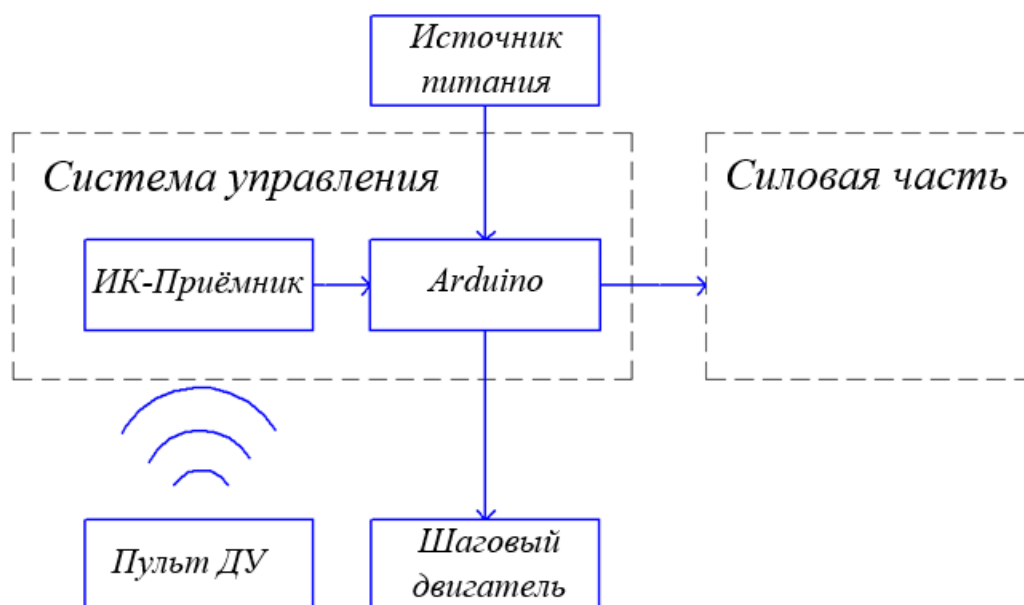


Рисунок 2.1. – Структурная схема системы управления

Управляющей микросхемой и главным элементом схемы была выбрана цифровая платформа Arduino Uno, так как она обладает компактностью и дешевизной. Также она имеет встроенный стабилизатор напряжения, который понадобится при питании шагового двигателя. Поскольку планируется самостоятельная работа студентов с этим стендом требуется использовать бесконтактные методы управления параметрами стенда. Это позволяет избавить студентов от непосредственного контакта с установкой. Проанализировав оба способа было отдано предпочтение в сторону способа передачи с помощью инфракрасного канала (ИК). Выбор объясняется тем, что ИК-приёмники миниатюрны и имеют низкую стоимость. В качестве передатчика здесь подойдёт любой пульт управления. Этот факт повышает степень универсальности управления стендом.

Чтобы начать работу с выбранным пультом, необходимо знать коды его кнопок. Для того, чтобы определить код кнопки пульта воспользуемся следующим скетчем:

```
#include "IRremote.h"
```

```

IRrecv irrecv(11); // обозначаем вывод, к которому подключается приемник

decode_results results;

void setup() {
  Serial.begin(9600); // устанавливаем скорость COM порта
  irrecv.enableIRIn(); // осуществляем прием данных с пульта
}

void loop() {
  if ( irrecv.decode( &results )) { // когда пришли какие-то данные
    Serial.println( results.value, HEX ); // выводим данные на монитор
//компьютера
    irrecv.resume(); // ожидаем следующую команду
  }
}

```

Ориентируясь на работу силовой схемы, чтобы регулировать пробойное напряжение, был выбран способ на основе ШИМ регулирования.

В трансформаторе, используемом в силовой схеме, ток в первичной обмотке за время 0,11мс достигает тока насыщения. Это было установлено при проведении предварительных опытных исследований силовой части схемы. При этом можно сказать, что ШИМ, задаваемая при помощи Arduino, не должна быть меньше 9100 Гц.

Однако стандартная частота ШИМ Arduino равна 0,49 кГц, чего, как оказывается, недостаточно для того, чтобы система работала нормально. Эту частоту можно сделать выше, если при помощи программы обратиться к регистрам микроконтроллера. Выводами ШИМ Arduino являются 9 и 10 выводы и для увеличения частоты до требуемой нужно в программе прописать дополнительные строчки:

```
TCCR1A = TCCR1A & 0xe0 | 3;
```

```
TCCR1B = TCCR1B & 0xe0 | 0x09;
```

Программирование аппаратной части Arduino происходит в одноимённой программе (рисунок 2.2). Код программы пишется на языке C++.

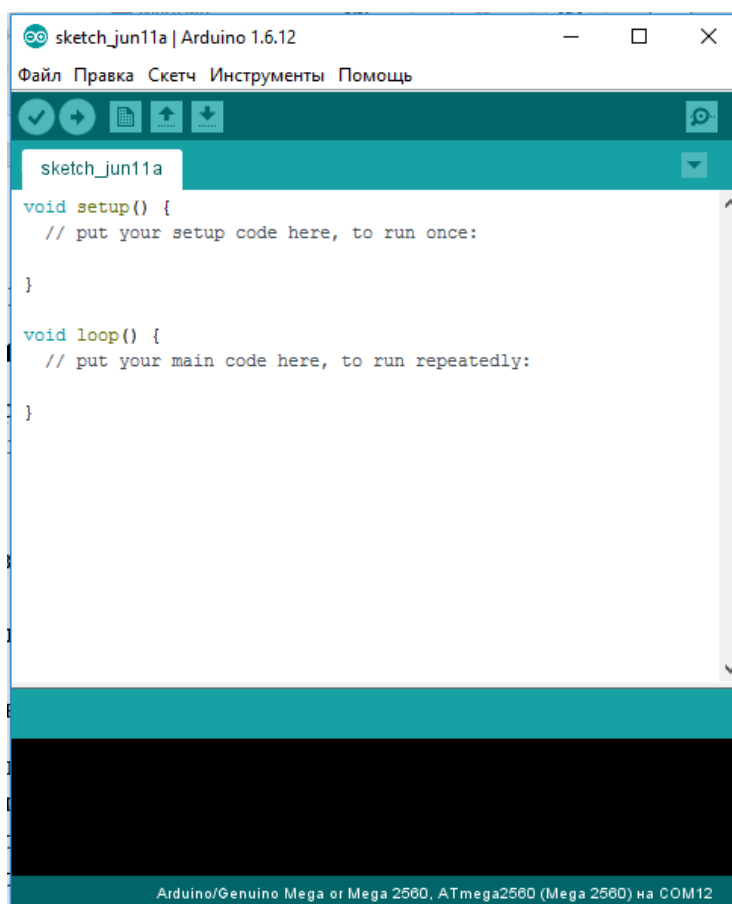


Рисунок 2.2 – Окно программы Arduino.

Известно, что при пробое воздушного промежутка на электродах падает около 2 кВ на 1 мм. Таким образом ширина пробойного промежутка должна изменяться очень плавно и с малым шагом. Это нужно для наиболее точного задания данного параметра и получения более точных результатов при исследовании пробоя воздушной среды.

Для решения данной задачи, был выбран шаговый двигатель, т.к. они могут обеспечить очень точные перемещения. В данной работе изначально планировалось использование шагового двигателя 28BYj-48, являющегося стандартным модулем Arduino. [22] Но был взят шаговый двигатель из CDROM компьютера, поскольку этот двигатель уже вмонтирован в корпус и присутствует рабочая каретка, на которой будут установлены электроды. Для работы с двигателем также необходим драйвер, который обеспечивает управление. Из-за того, что была произведена замена двигателя униполярного на биполярный, требуется заменить и драйвер. Поэтому микросхема ULN2003, бала заменена на L293D, которая подходит для управления биполярными двигателями.

Подключение (рисунок 2.3):

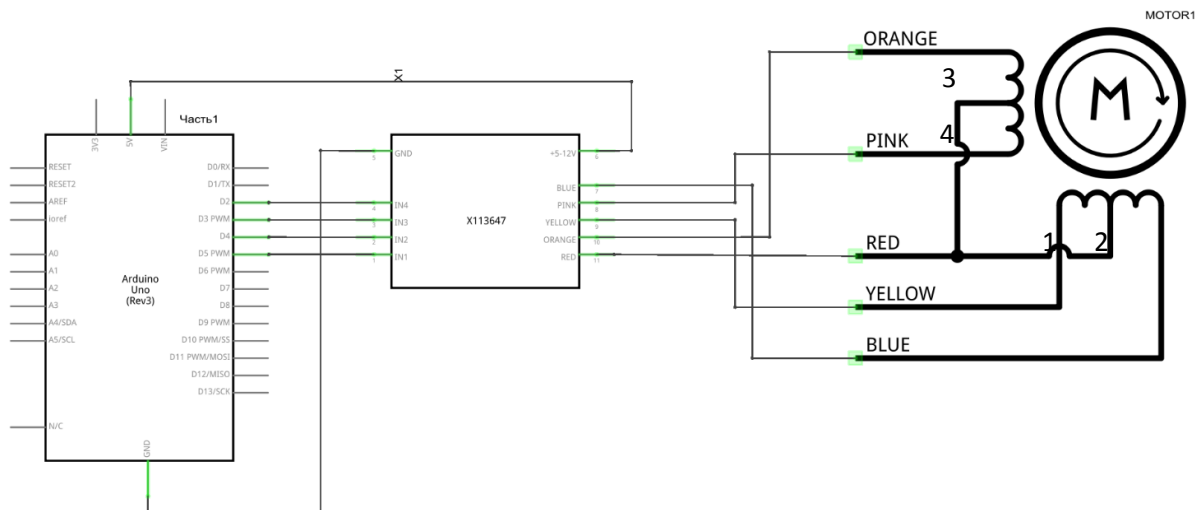


Рисунок 2.3 – Подключение шагового двигателя.

Код программы осуществляющий вращение вала двигателя (Приведена часть кода программы, она отображает подачу сигнала на драйвер шагового двигателя):

```
int in1 = 2; // сигнал для обмотки 3
```

```
int in2 = 3; // сигнал для обмотки 4
```

```
int in3 = 4; // сигнал для обмотки 1
```

```
int in4 = 5; // сигнал для обмотки 2
```

```
const int dl = 5; // переменная осуществляющая паузу между коммутациями
```

```
void setup() { // устанавливаем выходы в режим выхода
```

```
pinMode(in1, OUTPUT); // для обмотки 3
```

```
pinMode(in2, OUTPUT); // для обмотки 4
```

```
pinMode(in3, OUTPUT); // для обмотки 1
```

```
pinMode(in4, OUTPUT); // для обмотки 2
```

```
}
```

```
void loop() { // задаём уровни сигналов на выводах
```

```
digitalWrite( in1, HIGH ); // на обмотку 3 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);
```

// дальше уровни чередуются

```
digitalWrite( in1, HIGH ); // на обмотку 3 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in4, HIGH ); // на обмотку 2 подаётся высокий уровень сигнала
delay(dl);
```

```
digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in4, HIGH ); // на обмотку 2 подаётся высокий уровень сигнала
delay(dl);
```

```
digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in3, HIGH ); // на обмотку 1 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in4, HIGH ); // на обмотку 2 подаётся высокий уровень сигнала

delay(dl);
```

```
digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
```

```
digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in3, HIGH ); // на обмотку 1 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);
```

```
digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, HIGH ); // на обмотку 4 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in3, HIGH ); // на обмотку 1 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);
```

```
digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, HIGH ); // на обмотку 4 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);
```

```
digitalWrite( in1, HIGH ); // на обмотку 3 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in2, HIGH ); // на обмотку 4 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);
```

```
}
```

Реверс осуществляется подачей сигналов на обмотки в обратном порядке.

(Приведена часть программы, где изменена подача сигналов).


```

void loop() {
    digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in4, HIGH ); // на обмотку 2 подаётся высокий уровень сигнала
    delay(dl);

    digitalWrite( in1, HIGH ); // на обмотку 3 подаётся высокий уровень сигнала
    digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in4, HIGH ); // на обмотку 2 подаётся высокий уровень сигнала
    delay(dl);

    digitalWrite( in1, HIGH ); // на обмотку 3 подаётся высокий уровень сигнала
    digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
    delay(dl);

    digitalWrite( in1, HIGH ); // на обмотку 3 подаётся высокий уровень сигнала
    digitalWrite( in2, HIGH ); // на обмотку 4 подаётся высокий уровень сигнала
    digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
    digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
    delay(dl);
}

```

```
digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, HIGH ); // на обмотку 4 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in3, LOW ); // на обмотку 1 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);

digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, HIGH ); // на обмотку 4 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in3, HIGH ); // на обмотку 1 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);

digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in3, HIGH ); // на обмотку 1 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in4, LOW ); // на обмотку 2 подаётся низкий уровень сигнала
delay(dl);

digitalWrite( in1, LOW ); // на обмотку 3 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in2, LOW ); // на обмотку 4 подаётся низкий уровень сигнала
digitalWrite( in3, HIGH ); // на обмотку 1 подаётся высокий уровень сигнала
digitalWrite( in4, HIGH ); // на обмотку 2 подаётся высокий уровень сигнала
delay(dl);
}
```

3. Экспериментальная часть

Исправив код, для изменения стандартной частоты ШИМ, и измерив осциллографом новую частоту стало видно, что она увеличилась до частоты 15,72 кГц (рисунок 3.1).

Для того, чтобы использовать инфракрасный датчик была задействована библиотека IRremote, а, чтобы включить в работу ШИМ нужна функция analogWrite.

Текст программы, осуществляющий ШИМ и изменение его ширины импульса, посредством дистанционного управления, выглядит следующим образом:

```
#include "IRremote.h" // в начале указывается библиотека для работы с
нужным нам датчиком

IRrecv irrecv(11); // теперь необходимо указать вывод, к которому будет
подключаться приёмник

decode_results results;

int impulse = 0;    // теперь нужно задать начальное значение ширины
импульса

int steppamount = 6; // дальше задаёмся шагом импульса

void setup()
{
  TCCR1A = TCCR1A & 0xe0 | 3;
  TCCR1B = TCCR1B & 0xe0 | 0x09;
  irrecv.enableIRIn(); // теперь производим запуск приёма данных
  pinMode(9, OUTPUT); // задаём 9 выводу значение выхода
}

void loop() {
  analogWrite(9, impulse); // задаём ширину импульса

  if ( irrecv.decode( &results )) { // когда данные пришли, выполнять
следующие действия

    switch ( results.value ) {
```

```

case 0xFFA857: // код кнопки пульта соответствующий «+»

impulse = impulse + stepamount; // прибавляем шаг

break; // осуществляем выход из цикла

case 0xFFE01F: //код кнопки пульта соответствующий «-»

impulse = impulse - stepamount; // убавляем шаг

break; // осуществляем выход из цикла

}

irrecv.resume(); // ожидаем когда придёт следующая команда

}

}

```

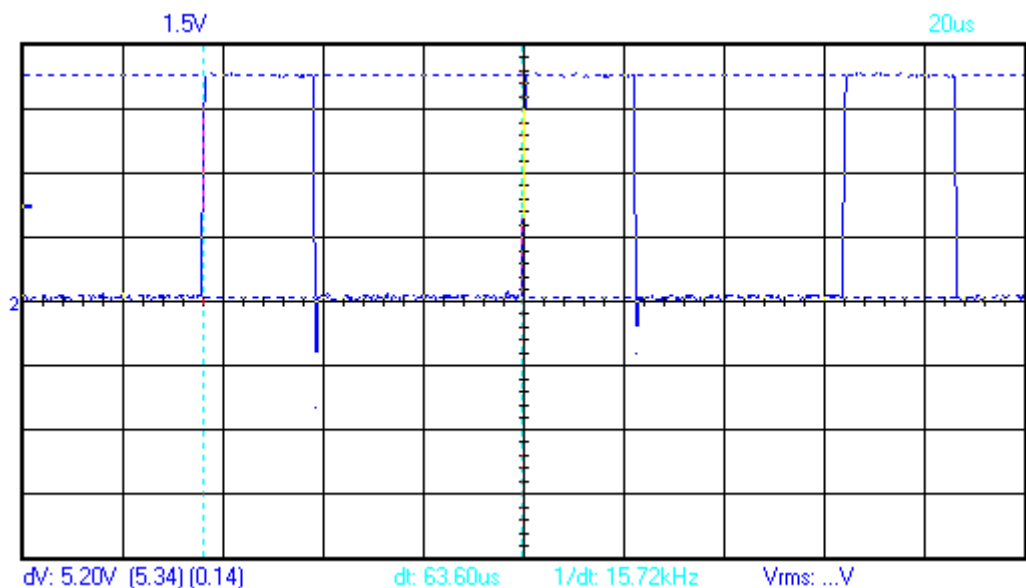


Рисунок 3.1 – ШИМ с увеличенной частотой 15,72 кГц

Переменная отвечающая за изменение ширины импульса это `stepamount` и она равна шести, если рассматривать данный текст программы. При таком шаге импульс каждый раз, когда происходит нажатие кнопки, увеличивается или уменьшается на 2,3 % от рабочего цикла.

Когда появится необходимость в шаге другого значения, его можно будет задать в программе. Например, когда требуется точность при установке нужного напряжения, то параметру `stepamount` нужно задать новое значение, определяемое по формуле:

$$\text{stepamount} = \frac{\text{Ш}\%}{100} \cdot 255, \quad (3.1)$$

где Ш% – величина шага (%).

Предложенный способ на практике очень хорошо себя показал и в результате была получена зависимость напряжения разрядного конденсатора от переменной `impulse` (рисунок 3.2).

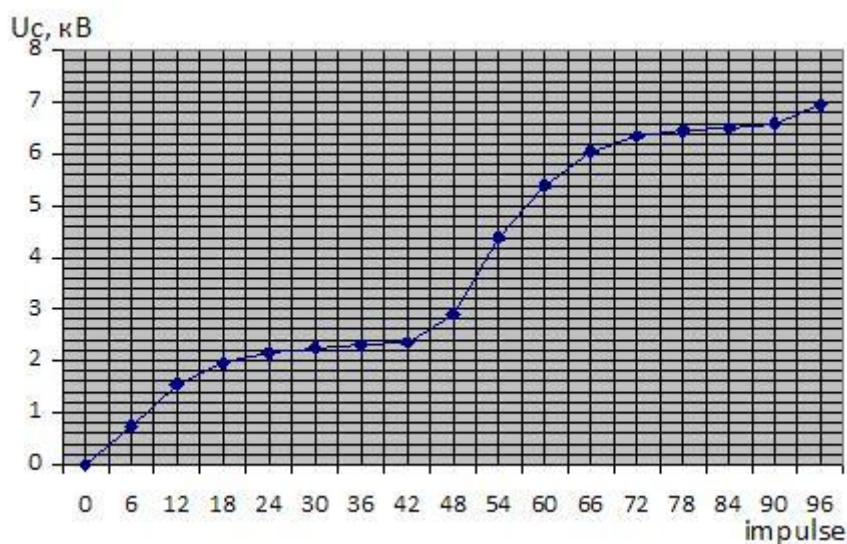


Рисунок 3.2 – Зависимость напряжения конденсатора U_c от переменной `impulse`.

В разрабатываемом стенде используются электроды формы остриё-остриё. Для того чтобы проанализировать какой должна быть характеристика электрической прочности воздуха, смоделируем похожую ситуацию в программной среде Elcut (Приложение).

Заключение

Изучив необходимую литературу была разработана система управления стендом для исследования пробойных свойств воздуха.

В качестве микроконтроллера была выбрана программно-аппаратная платформа Arduino. Поскольку она обладает значительным функционалом, простотой в использовании, имеет небольшие габариты и низкую стоимость.

Для обеспечения безопасности эксплуатации стенда, используется дистанционное управление посредством инфракрасного канала передачи данных. В качестве приёмника используется фотоприёмник TSOP4838 [14], а передатчиком служит пульт дистанционного управления, взятый от mp3.

Для того, чтобы изменять расстояние между электродами используется шаговый двигатель, взятый из CDROM компьютера. В качестве управления двигателем был выбран драйвер ULN2003 который обычно поставляется со стартовыми наборами Arduino.

Изменение напряжения в пробойном промежутке производится методом ШИМ. Источником ШИМ выступает программно-аппаратная платформа Arduino.

Программный код для обеспечения управления стендом (Приложение) пишется на языке программирования C++. [15][16]

В итоге система управления показала свою работоспособность был получен пробой воздушного промежутка и сняты его значения (Приложение). В дальнейшем планируется осуществить возможность использования электродов разных форм.

Список используемой литературы

1 Raspberry Pi [Электронный ресурс] // Официальный сайт Википедия. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi

2 Arduino [Электронный ресурс] // Официальный сайт Википедия. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Arduino#.D0.98.D0.BD.D1.82.D0.B5.D1.80.D0.B5.D1.81.D0.BD.D1.8B.D0.B5_.D0.BF.D1.80.D0.BE.D0.B5.D0.BA.D1.82.D1.8B

3 Принцип работы ИК пульта управления [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Элекс. Режим доступа: http://led-displays.ru/ir_remote_theory.html

4 IR Remote Control Theory [Электронный ресурс] // Официальный сайт SB-Projects. Режим доступа: <http://www.sbprojects.com/knowledge/ir/index.php>

5 Настройка bluetooth-модулей HC-05/06 [Электронный ресурс] // Официальный сайт ROBOT CLASS. Режим доступа: <http://robotclass.ru/articles/bluetooth-hc-05-06/>

6 Контроллер шагового двигателя [Электронный ресурс] // Официальный сайт KAZUS.RU. Режим доступа: <http://kazus.ru/shemes/showpage/0/843/1.html>

7 Kausik Chakraborty, Nisarga Chand, Bappaditya Roy (Department of ECE Mallabhum Institute Of Technology ,Bishnupur, WB, India), Pabitra Kumar Nandi (Department of ECE Birbhum Institute of Engg. & Technology, Suri, WB, India). Design and Development Stepper Motor Position Control System Using Atmel 85c51 Microcontroller. International Journal of Emerging Research in Management &Technology, 2013. http://www.ermt.net/docs/papers/Volume_2/issue12_December2013/V2N12-123.pdf

8 N. Sreekanth, N. Yeshwanth Kumar, G. Venkata Sai Kumar, J.V.V Sivaraju, B. V. Yaswanth Kumar Goud (Department of Electronics and Electrical Engineering, G. Pullaiah College of Engineering and Technology). Stepper Motor Control using PC. IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development, Vol. 4, Issue 02, 2016. <http://www.ijssrd.com/articles/IJSRDV4I20008.pdf>

9 M.G. Hogg, I.V. Timoshkin, S.J. MacGregor, M.P.Wilson and M.J. Given, T. Wang. Electrical breakdown of short non-uniform air gaps. University of Strathclyde Glasgow, 2013, 15 295 symbols. https://pure.strath.ac.uk/portal/files/39975308/Michael_Hogg_Electrical_Breakdown_of_Short_Non_uniform_Air_Gaps_10072013.pdf

10 M. Rezouga, A. Tilmatine, R. Ouiddir, K. Medles. Experimental Modelling of the Breakdown Voltage of Air Using Design of Experiments. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2009, 19 953 symbols. <https://doaj.org/article/48c249969df14d94bf4f18bf2b93bcd3>

11 Pavel Zaskalicky. Dynamic Model of Reluctance Step Motor. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2005, 4(1):18-22. <https://doaj.org/article/9cce5c6021df4db4ad0a1a663be1752a>

12 Процессы в диэлектриках под действием сильных электрических полей [Электронный ресурс] // Официальный сайт Электрофизика. Режим доступа: <http://sermir.narod.ru/lec/lect9.htm>

13 Еськин К.В., Ахметханов И.А., Позднов М.В. Установка для исследования пробоя воздушной среды: выбор компонентов силовой части // «Студенческие дни науки в ТГУ»: Научно-практическая конференция (Тольятти, 1-25 апреля 2017 года): сборник студенческих работ (в печати).

14 IR Receiver Modules for Remote Control Systems [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Vishay. Режим доступа: <https://www.vishay.com>.

15 Урок 37. Широтно-импульсная модуляция в Ардуино [Электронный ресурс] // Официальный сайт MY PRACTIC. Режим доступа: <http://mypractic.ru/urok-37-shirotno-impulsnaya-modulyaciya-v-arduino.html>.

16 Программирование Ардуино [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Arduino. Режим доступа: <http://arduino.ru/Reference>.

17 И.А. Ахметханов, К.В. Еськин, Позднов М.В. Установка для исследования пробоя воздушной среды: выбор компонентов системы управления // «Студенческие дни науки в ТГУ»: Научно-практическая конференция (Тольятти, 1-25 апреля 2017 года): сборник студенческих работ (в печати).

18 Raspberry Pi — что за фрукт? [Электронный ресурс] // Официальный сайт Занимательная робототехника. Режим доступа: <http://edurobots.ru/2014/04/raspberry-pi-что-za-frukt/>

19 Применение Raspberry Pi в быту и нестандартные применения [Электронный ресурс] // Официальный сайт electro.guru. Режим доступа: <https://elektro.guru/dlya-proizvodstva/primenenie-raspberry-pi-v-bytu-i-nestandartnye-primeneniya.html>

20 Аппаратная часть платформы Arduino [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Arduino. Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware>

21 Ардуино: шаговый двигатель 28BYJ-48 и драйвер ULN2003
[Электронный ресурс] // Официальный сайт ROBOT CLASS. Режим доступа:
<http://robotclass.ru/tutorials/arduino-stepper-28byj-48-uln2003/>