

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

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование кафедры)

11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки)

Электронные приборы и устройства

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка системы для исследования пробойных свойств воздушной
среды»

Студент

Еськин К.В.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

Позднов М.В.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О.Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

“Промышленная электроника” к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О.Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019 г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Литературный обзор.....	6
1.1 Обзор аналогов	6
1.2 Виды разрядов в газах.....	7
1.3 Топологии высоковольтных преобразователей	9
1.4 Виды аппаратных платформ	11
2 Проектный раздел.....	14
2.1 Разработка структурной схемы установки	14
2.2 Силовая часть.....	15
2.2.1 Выбор компонентов силовой части.....	15
2.2.2 Выбор элементной базы силовой части.....	17
2.3 Система управления	18
2.3.1 Выбор компонентов системы управления.....	18
2.3.2 Написание программного кода	18
2.3.3 Выбор индикаторов входных-выходных данных	21
2.4 Механическая часть	22
2.4.1 Выбор компонентов механической части и написание для него программного кода	22
2.4.2 Система позиционирования шагового двигателя	25
2.5 Разработка системы передачи выходного напряжения.....	27
2.5.1 Разработка схемотехники для снятия результатов пробивного напряжения с высоковольтной стороны.	27
2.5.2 Модуляция напряжения и его передача.....	27
2.5.3 Выбор компанентов оптопередачи сигнала	29

2.5.4 Выбор компонентов системы измерения высоковольтного напряжения устройства	30
3 Экспериментальная часть	32
3.1 Сборка силовой части с платформой Arduino.....	32
3.2 Сборка схемы питания развязывающей системы на TL494	41
3.3 Работа с оптопередачей сигнала.....	48
3.4 Эксперименты с системой управления	67
4 Технологический раздел	70
4.1 Работа над разработкой платы в программе DipTrase.....	70
4.2 Травление печатной платы и пайка элементов	73
4.2.1 Технология изготовления печатной платы с использованием плёночного фоторезиста	73
4.2.2 Метод лазерно-утюжного травления (ЛУТ).....	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	78
ПРИЛОЖЕНИЯ	82

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования.

В настоящее время большинство провинциальных технических университетов сталкиваются с проблемой устаревания материальной базы лабораторных комплексов. Это приводит либо к изъятию из использования лабораторных установок, либо их использование с большими рисками для преподавателей и студентов. Приобретение современных установок на кафедры не всегда является возможным ввиду недостатка финансирования. В этом случае заменой дорогостоящего оборудования могут выступать устройства, которые будут разрабатываться при участии студентов и применяться впоследствии при проведении лабораторных работ.

На данный момент в Тольяттинском государственном университете на кафедре «Промышленная электроника» отсутствует установка для проведения лабораторных работ по исследованию пробойных свойств воздушной среды. Предыдущее оборудование (стенд АМИ-60) было убрано из использования ввиду значительного возраста и небезопасности в эксплуатации. Из-за этого в данный момент данная лабораторная работа не проводится. Это негативно сказывается на учебном процессе, так как студенты не могут получить изучаемый материал в полной мере.

Объект исследования.

Объектом исследования является новое схемотехническое решение высоковольтной установки для исследования пробоя воздуха.

Цель диссертационной работы: разработка нового схемного решения системы для исследования пробойных свойств воздушной среды.

Задачи исследования:

- 1) обзор рынка установок с аналогичными характеристиками и применением
- 2) разработка структурной схемы устройства,
- 3) выбор элементов системы управления и написание для него программы,
- 4) расчет и выбор элементов силовой и механической частей,
- 5) сборка и отладка отдельных узлов,
- б) проведение экспериментов и определение ключевых параметров установки.

Методы исследования:

Полученные осциллограммы работы узлов были зафиксированы опытным путем при помощи физических моделей схем. Значения параметров фиксировались при помощи специальной измерительной и записывающей аппаратуры.

Новизна работы:

Произведен выбор компактного схемотехнического решения высоковольтной установки с использованием дистанционного управления.

Практическая ценность:

Предложен вариант установки для исследования пробойных свойств воздуха, отличающийся от аналогов меньшими габаритами и стоимостью.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Схемотехническое решение высоковольтной установки
- 2) Программный код для микроконтроллера

Апробация работы:

– доклады на заседаниях кафедры “Промышленная электроника” в 2017-2019 гг;

– Основные положения работы раскрыты в статьях в научно-технической конференции «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» и научно-практической конференции «Дни науки ТГУ».

Публикации.

По теме диссертации опубликованы статьи в научно-технической конференции «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» и научно-практической конференции «Дни науки ТГУ».

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 84 страницах и содержащих 63 рисунка и 2 таблицы, списка литературы, включающего 31 наименование (в т.ч. 12 англоязычных).

1 Литературный обзор

1.1 Обзор аналогов

Чтобы приступить к созданию нового устройства, важно узнать, что на данный момент на рынке нет аналогичного устройства с равными или лучшими характеристиками. Для этого был выработан ряд требований к проектируемому устройству:

- 1) безопасность в эксплуатации;
- 2) незначительные массогабаритные показатели;
- 3) возможность студентов проводить лабораторные работы на данном стенде без непосредственного надзора преподавателя;
- 4) невысокая стоимость комплектующих.

После поиска аналогов [1] проектируемого устройства, был выбран список наиболее схожих с ним по характеристикам (таблица 1).

Таблица 1 – Перечень аналогов разрабатываемой установки и их характеристики

Наименование	Габариты (мм)	Вес (кг)	Стоимость (р.)
Скат М-100	470х370х315	41	189000
OLT-100М	540х315х320	32	400000
АИМ-90А	395х550х359	39	125000
OTS100AF	580х420х290	30	230000

Согласно данной таблице видно, что представленные устройства имеют значительные размеры и стоимость. Проектируемое устройство же по массе планируется не более 4 кг, а стоимость материалов не должна превысить 15000 рублей.

Таким образом, идея создания оборудования на базе кафедры является актуальной как в учебном плане, так и в техническом.

1.2 Виды разрядов в газах

В зависимости от различных физических факторов ученые выделяют четыре типа разрядов в газах [2]:

а) тлеющий – возможен при значениях давления близких к вакууму. Такого рода разряд можно получить между двумя металлическими электродами в замкнутой колбе с выкачанным воздухом.

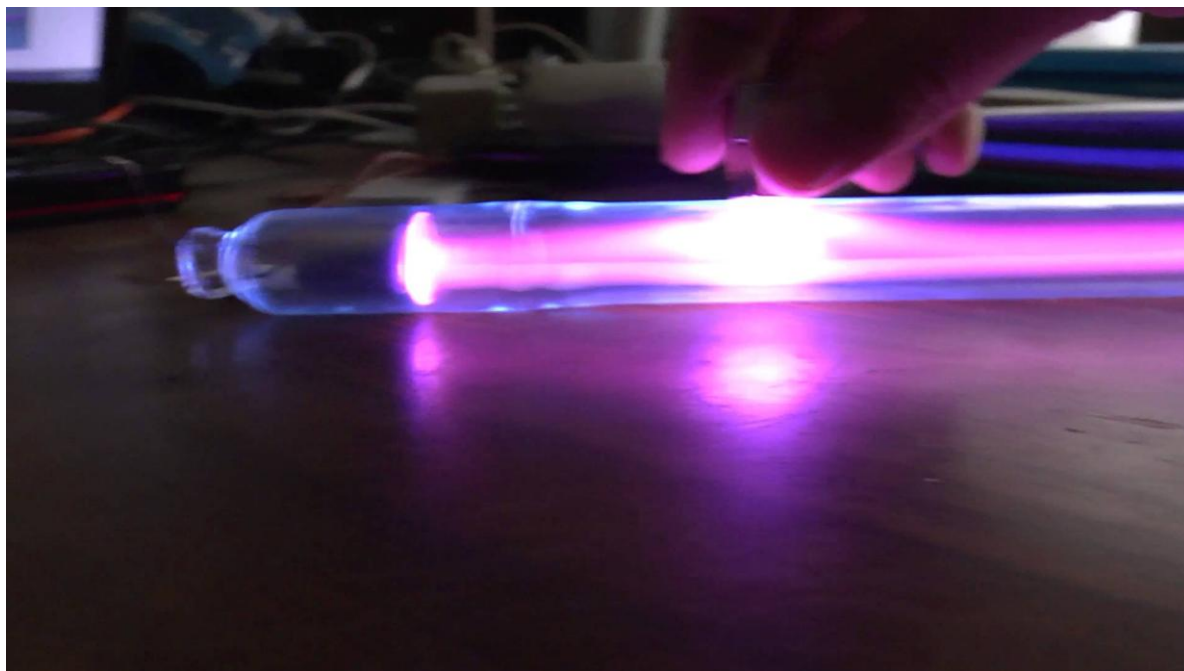


Рисунок 1 – Тлеющий разряд в замкнутой колбе

б) искровой – возможен при давлении равном или близком к атмосферному. Данный тип разряда прерывистый и состоит из большого числа искровых каналов. Длительность их существования очень короткая. Ярким примером такого разряда является молния.



Рисунок 2 – Искровой разряд на примере молнии

в) дуговой – является частным случаем искрового разряда. Он наблюдается, если расстояние между электродами уменьшается. В этом случае несколько искровых каналов смыкаются в одну непрерывную дугу.

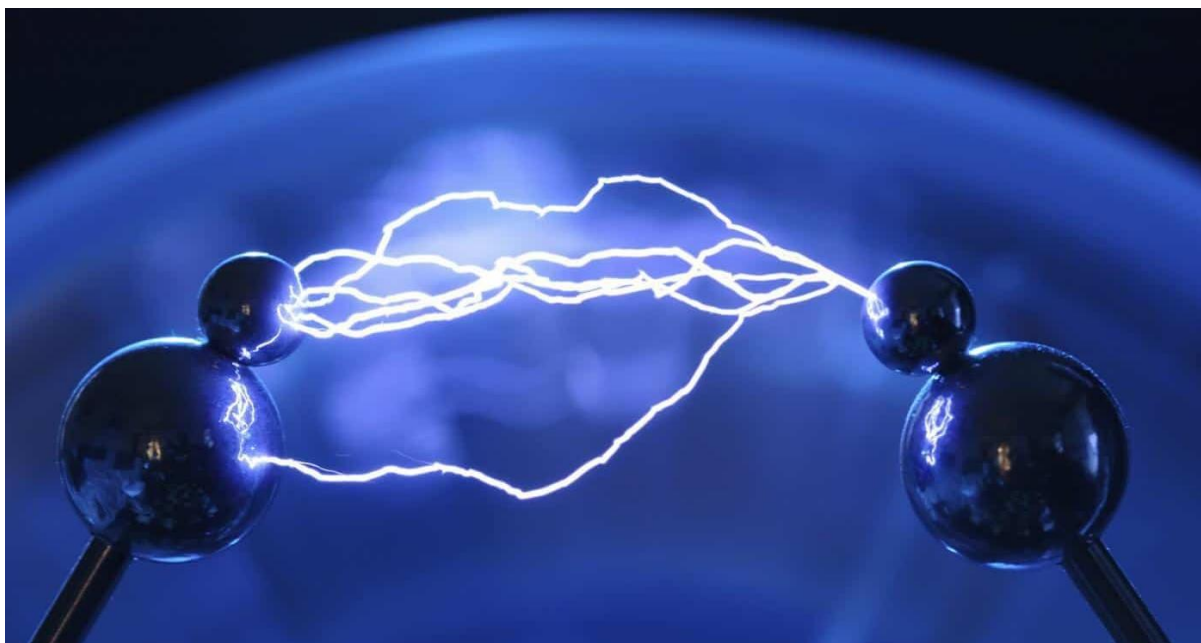


Рисунок 3 – Дуговой разряд между двумя электродами

г) коронный – данный тип разряда аналогичен дуговому. Его можно наблюдать вблизи электродов с малой площадью, например тонкого наконечника. При данном разряде присутствие парного электрода не обязательно.



Рисунок 4 – Коронный разряд на конце одного электрода

1.3 Топологии высоковольтных преобразователей

Существует большое количество схемных решений для получения высокого напряжения [3-5]. Наиболее компактными и часто используемыми из них являются три: прямоходовой, обратногоходовой и мостовой.

Обратногоходовой преобразователь (ОП) [6] имеет наиболее простую схему (рисунок 5). Транзистор Q1 на данной схеме выполняет роль ключа. Диод D_{out} осуществляет проводимость только в обратный такт работы транзистора, т.е. когда он закрыт. При открытом Q1 первичная обмотка трансформатора служит накопителем энергии. При закрытии ключа происходит переброс энергии во вторичную обмотку.

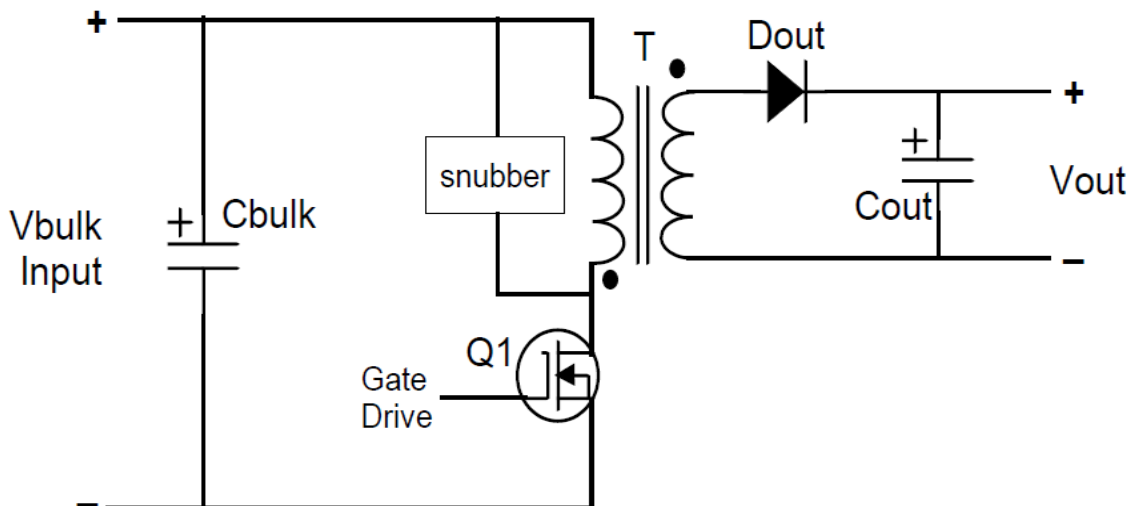


Рисунок 5 – Обратногоходовой преобразователь

Прямоходовой преобразователь (ПП) [7] имеет несколько типовых схемных решений первичной стороны. Наиболее распространенной из них является вариант с размагничивающей обмоткой (рисунке 6). Диод Dfwd здесь поставлен противоположно относительно обратногоходовой схемы. Таким образом, передача энергии происходит при открытом ключе. Особенность этой схемы заключается в наличии размагничивающей обмотки, служащей для размагничивания сердечника. Как и ОП данный тип используется при низких мощностях до 600Вт.

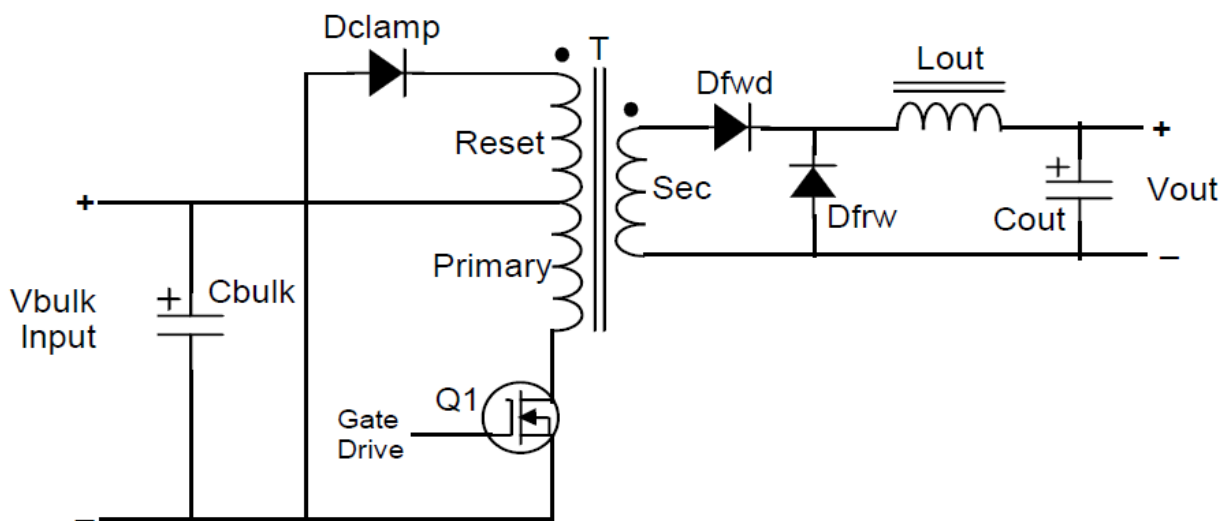


Рисунок 6 – Прямоходовой преобразователь с обмоткой сброса

Мостовой преобразователь (МП) отличается тем, что трансформатор передает через себя разнополярные импульсы. Управление транзисторами в данном случае осложнено возможностью возникновения сквозных токов. Схема данного преобразователя представлена на рисунке 7.

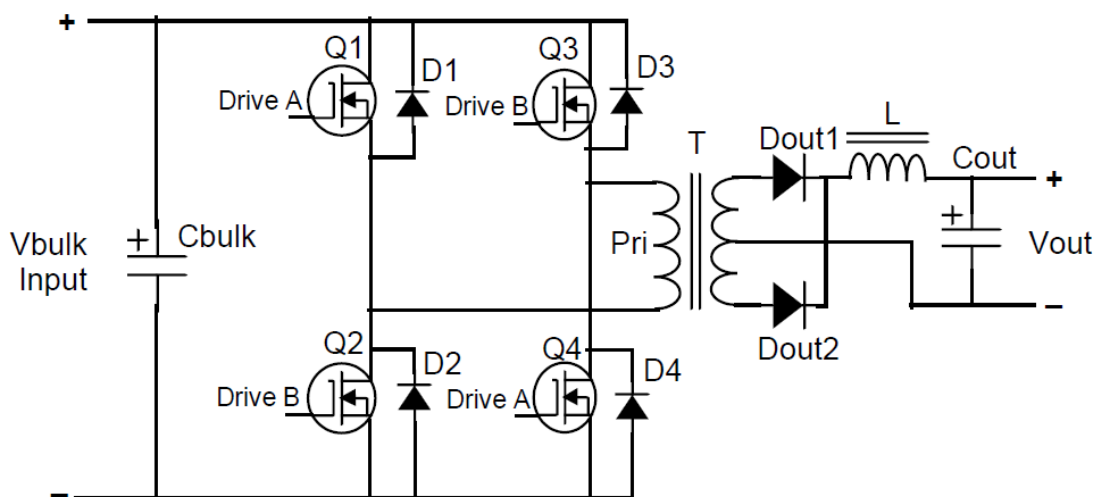


Рисунок 7 – Мостовой преобразователь

МП обычно используется в схемах для понижения напряжения при мощностях до 5 кВт.

В качестве топологии был выбран ОП ввиду наиболее простого схемотехнического решения и меньших энергетических потерь.

1.4 Виды аппаратных платформ

На данный момент на рынке можно найти большое количество программируемых контроллеров. Все они различаются способом программирования, ценой, надежностью и т.д. Наиболее популярными из них являются платформы Arduino [8] и Raspberry Pi [9].

Raspberry Pi – многофункциональная платформа, представляющая из себя миниатюрный персональный компьютер (рисунок 8). Особенностью данной платы является обязательная установка операционной системы Linux. Программирование данного модуля осуществляется подключением к нему периферии (монитор, клавиатура).

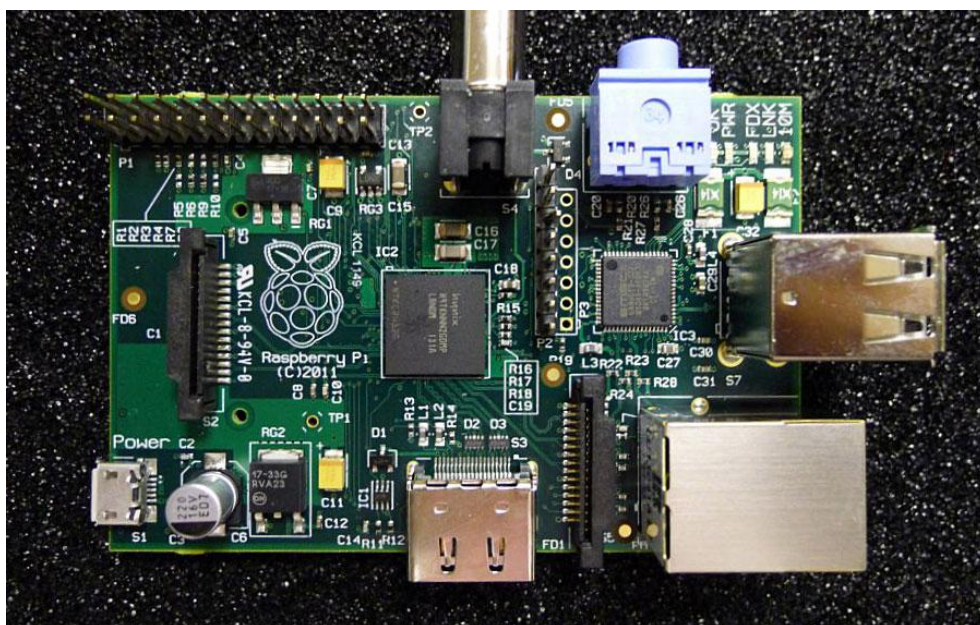


Рисунок 8 – Одноплатный компьютер Raspberry Pi

Платформа Arduino [10] (рисунок 9) имеет меньший функционал по сравнению с Raspberry Pi. Однако данный микроконтроллер имеет значительно меньшие размеры и гораздо дешевле. Его программирование не представляет проблем, т.к. программное обеспечение бесплатное.

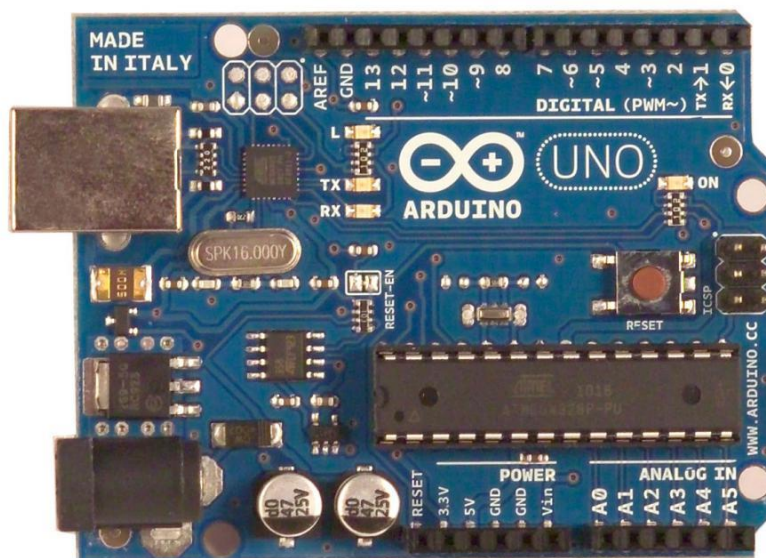


Рисунок 9 – Микроконтроллер Arduino (Arduino Uno)

Основываясь на техническом задании было решено в качестве системы управления использовать платформу Arduino, поскольку она является дешевле и легче в программировании, чем одноплатный компьютер Raspberry Pi.

2 Проектный раздел

2.1 Разработка структурной схемы установки

Начальным этапом при разработке устройства стало определение блоков из которых оно будет состоять. На рисунке 10 представлена структурная схема установки.

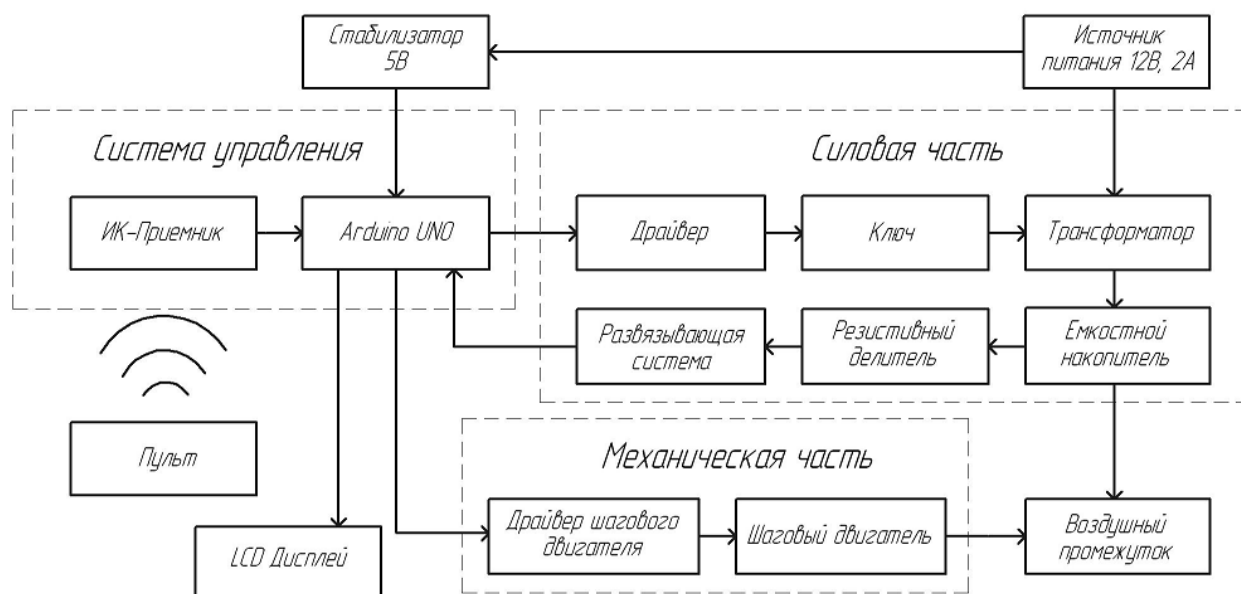


Рисунок 10 – Структурная схема установки

Устройство будет делиться на 3 крупных блока: систему управления, силовую часть и механическую часть.

Система управления, основой которой является микроконтроллер должна осуществлять управление силовой и механической частями. Это такие параметры как значение напряжения пробоя и величина зазора между электродами.

Силовая часть призвана получать высоковольтное напряжение и осуществлять пробой воздушного промежутка. Также одной из ее задач служит передача выходных данных напряжения пробоя через систему развязки, для предотвращения пробоя внутри стенда.

Механическая часть необходима для задания ширины воздушного зазора в котором будет осуществляться пробой.

Дистанционное управление обеспечит возможность работы с установкой без непосредственного контакта с ней. Этот выбор обусловлен тем, что установка является высоковольтной и может представлять опасность.

На дисплей будут выводиться как входные, так и выходные параметры.

2.2 Силовая часть

2.2.1 Выбор компонентов силовой части

На рисунке 11 представлена структурная схема силовой части.

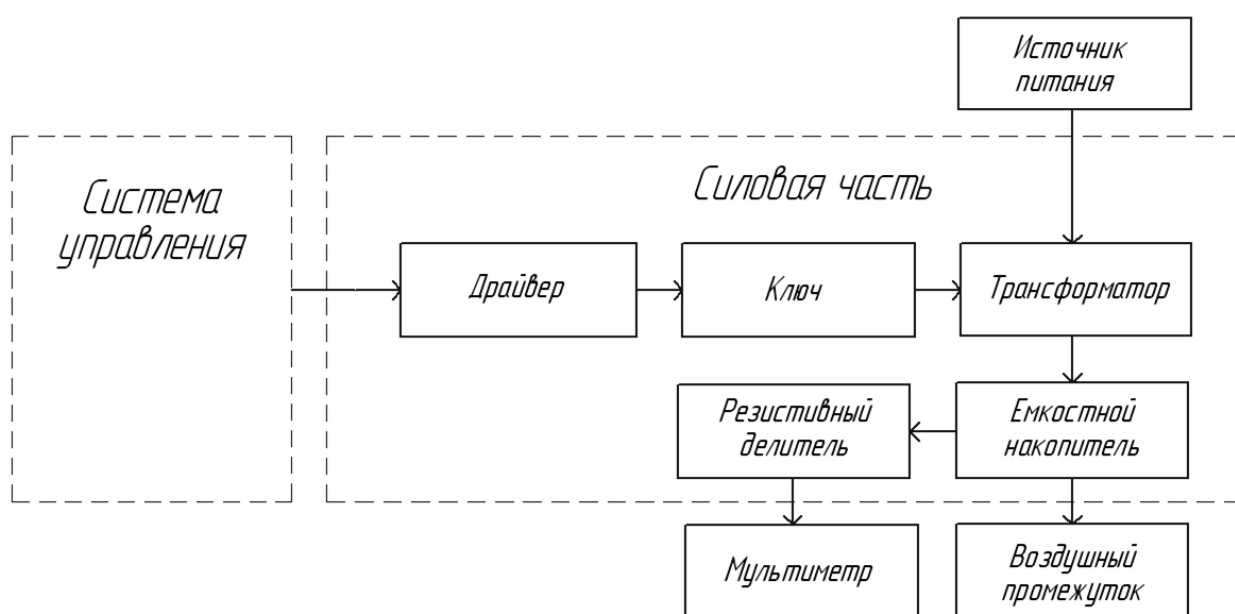


Рисунок 11 – Структурная схема силовой части

Первым вопросом разработки силовой части стал выбор топологии высоковольтного преобразователя. Среди нескольких вариантов наиболее компактный и простой в конструировании является обратноходовой преобразователь (рисунок 12), который и было принято использовать в схеме.

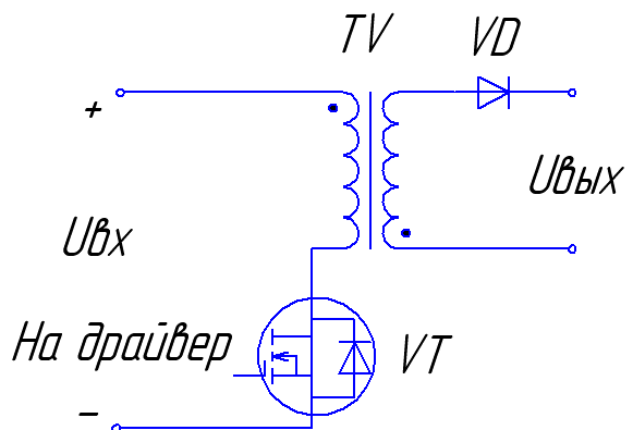


Рисунок 12 – Обратногододовая топологiя силового преобразователя

Следующим важным моментом разработки стал выбор системы элементов вторичной обвязки. Было рассмотрено два варианта: с присутствием конденсатора для заряда и без него (рисунки 13-14).

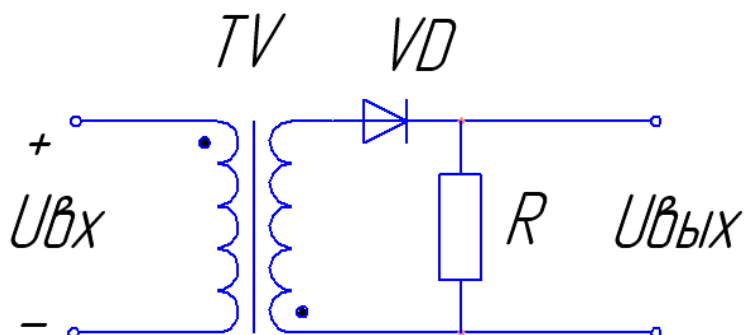


Рисунок 13 – Вторичная обвязка без конденсатора

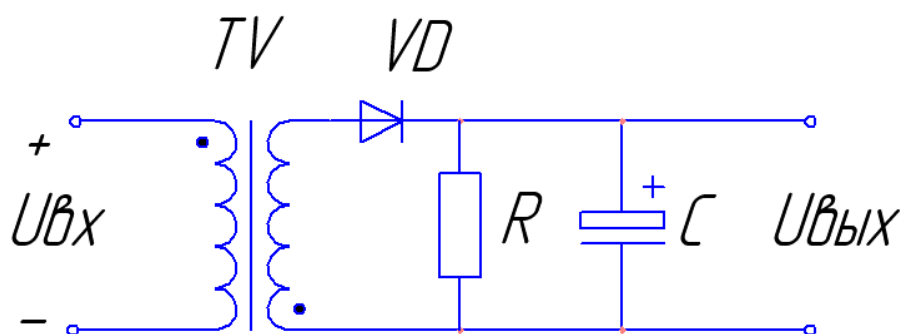


Рисунок 14 – Вторичная обвязка с конденсатором

В данном случае был выбран вариант с зарядным конденсатором, т.к. он позволяет накопить в себе энергию за несколько тактов перед пробоем воздушного промежутка, что значительно упрощает возможность детектирования пробойного напряжения.

2.2.2 Выбор элементной базы силовой части

На рисунке 15 изображена принципиальная схема силовой части установки

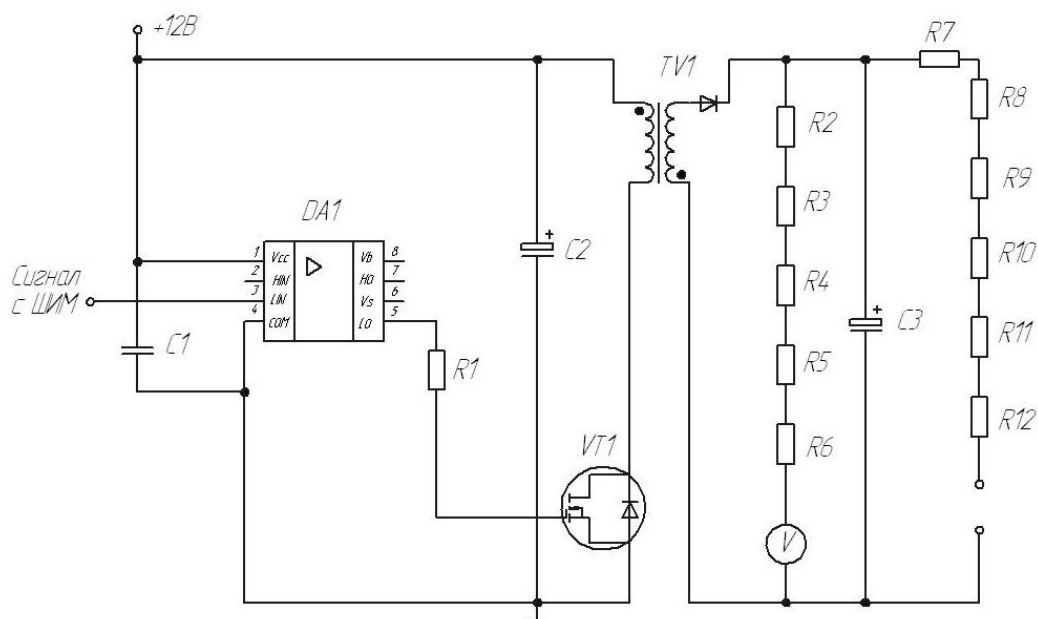


Рисунок 15 – Принципиальная схема силовой части установки

Драйвером в схеме выступает микросхема IR2101 (DA1) [11]. Она позволяет улучшить сигнал и сделать его более четким. Ключ представляет из себя полевой транзистор IRFZ44 (VT1) [12]. Он рассчитан на 60 В, 20 А, что с запасом хватит для схем такого типа. Для получения высоковольтного напряжения был выбран трансформатор РЕТ22-22В (TV1) [13]. Источником питания выступил блок питания 2А, 12 В. Зарядным конденсатор С3 рассчитан на 15 кВ, т.к. планируется, что установка будет выдавать не более 10 кВ.

2.3 Система управления

2.3.1 Выбор компонентов системы управления

В качестве «мозгов» устройства был выбран микроконтроллер Arduino Uno. Данная платформа имеет низкую стоимость и проста в программировании.

Для обеспечения безопасного эксплуатации установки было решено обеспечить ей дистанционное управление. Наиболее подходящим для данной установки является передача управляющего сигнала посредством инфракрасного канала (ИК) [14]. Данные передатчики имеют маленькие размеры и стоимость. Осуществлять подачу сигнала можно с любого ИК пульта. Однако кодировка каждого пульта может отличаться, поэтому перед началом программирования необходимо определить кодировки кнопок пульта.

Основываясь на том, что для работы трансформатора необходим переменный сигнал, то встает необходимость инвертировать постоянное напряжение. В этом случае логично применить ШИМ регулирование.

2.3.2 Написание программного кода

Стандартная частота ШИМ Arduino равна 0,5 кГц, что недостаточно для проектируемой установки. При проектировании данного устройства опорной частотой ШИМ должна быть выбрана частота не менее 10 кГц.

Для увеличения несущего сигнала ШИМ для выходов 9 и 10 микроконтроллера необходимо написать небольшой скетч:

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

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

После чего частота ШИМ увеличится до 15 кГц (рисунок 16).

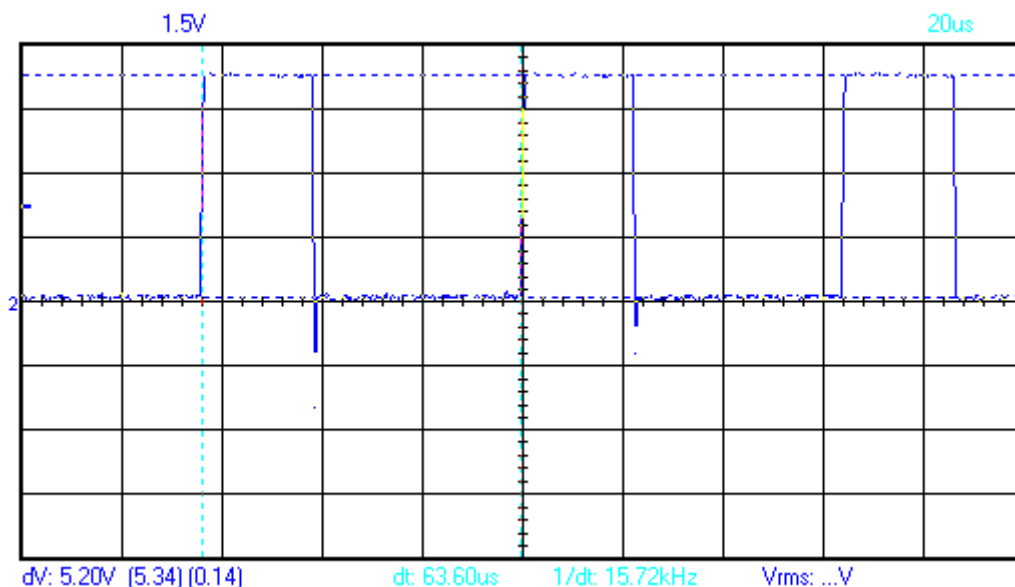


Рисунок 16 – ШИМ с увеличенной частотой 15,72 кГц

Код программы для микроконтроллера Arduino базируется на языке C++. Для написания кода используется программа Arduino (рисунок 17).

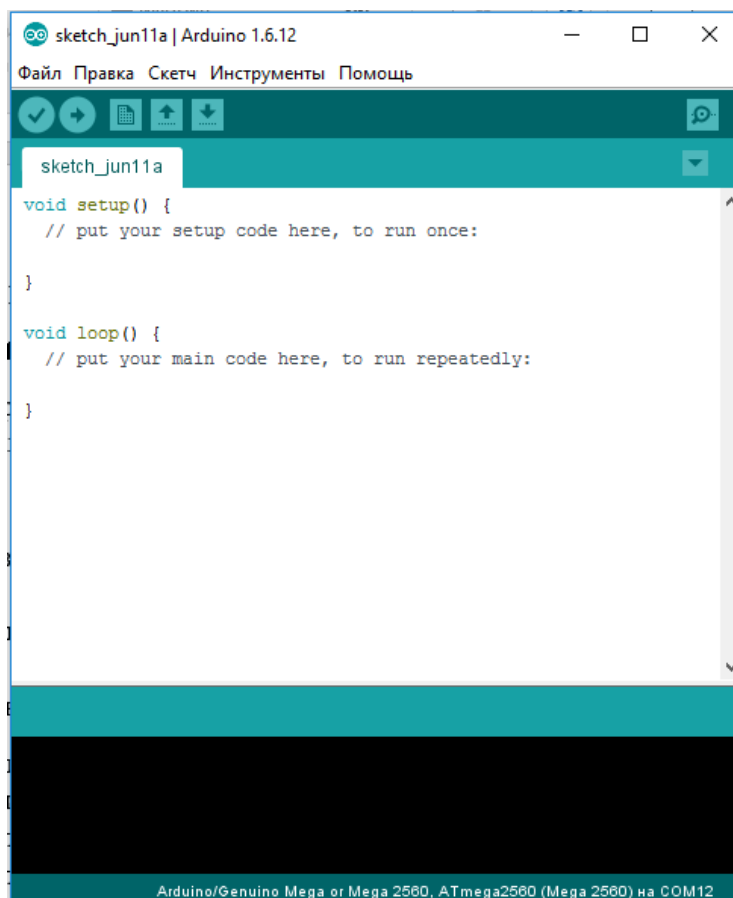


Рисунок 17 – Окно программы семейства микроконтроллеров Arduino.

Чтобы не писать многострочный код для подключения инфракрасного датчика воспользовались библиотекой IRremote.

Текст программы, осуществляющий ШИМ и его управление, при помощи дистанционного управления, представлен ниже:

```
#include "IRremote.h" // библиотека распознавания ИК датчика [15]
IRrecv irrecv(7); // определяем 7 пин как вывод для приёмника
decode_results results;

int shim = 0; // начальное значение ШИМ
int step = 10; // шаг ШИМ

void setup()
{
  irrecv.enableIRIn();
  pinMode(10, OUTPUT); // определяем 10 пин как выход
}

void loop() {
  analogWrite(10, shim); // присваивание ШИМ
  if ( irrecv.decode( &results )) {
    switch ( results.value ) {
      case 0xFFD947: // команда на увеличение ШИМ
        shim = shim + step;
        break; //

      case 0xFFW57Y: // команда на уменьшение ШИМ
```

```

shim = shim - step;

    break;
}

irrecv.resume();
}
}

```

Переменная `shim` определяет текущее значение ШИМ. Переменная `step` является величиной изменения величины ШИМ при выполнении конкретной команды (нажатие клавиши на пульте). В конкретном случае `step` равна 10, что характеризует изменение ШИМ на 1% в большую или меньшую сторону. Величина 1% объясняется тем, что `shim` является 10 битным числом.

2.3.3 Выбор индикаторов входных-выходных данных

Важным этапом в разработке устройства является вывод параметров на элементы индикации. Для Arduino идеально подходит LCD дисплей с I2C интерфейсом [16].

Основные величины, которые необходимо контролировать при проведении экспериментов являются: текущее значение величины зазора, величина ШИМ, текущее напряжение на высоковольтной части, максимальное напряжение на высоковольтной части в ходе эксперимента.

В представленных выше отрывках программы уже производился подсчет переменной l – текущее значение величины зазора. Аналогично вводится переменная h , которая определяет величину ШИМ.

С параметрами текущего напряжения и максимального напряжения на высоковольтной части в ходе эксперимента дело обстоит иначе. На один из аналоговых входов Arduino будет подаваться сигнал эквивалентный величине напряжения на высоковольтной части. Затем будет осуществляться пересчет полученного значения в реальное значение напряжения на высоковольтной части, которое и будет отображаться на экране. Максимальное значение напряжения будет фиксироваться при помощи сравнения предыдущего максимального значения

напряжения с текущим, и в случае если текущее больше, тогда максимальное будет переписано.

2.4 Механическая часть

2.4.1 Выбор компонентов механической части и написание для него программного кода

В процессе разработки стенда для исследования пробоя воздуха встал вопрос о включении в состав устройства механической части, которая будет реализовывать заданную величину исследуемого воздушного зазора. При пробое воздушного промежутка на электродах типа «острие-острие» на 1 мм зазора приходится порядка 1,5 кВ. Следовательно, значение величины пробойного промежутка должно изменяться не резко, с небольшим шагом. Это необходимо для более точного задания данного параметра и получения более точных результатов при исследовании пробоя воздушной среды. Оптимальным шагом в данном случае решено выбрать 1 мм.

Для решения данной задачи, были выбраны шаговые двигатели [17-22], т.к. они обладают малым шагом и следовательно большой точностью. Стандартным модулем для используемой в данной работе платформы Arduino является униполярный шаговый двигатель 28BYJ-48В с драйвером ULN2003 [23]. Однако для данного двигателя необходимо разработать систему механической конструкции движущейся части и передаточных узлов. Чтобы дополнительно не заниматься данным вопросом было решено рассмотреть шаговый двигатель из CD-ROM компьютера, так как он уже вмонтирован в корпус с рабочей кареткой. Это значительно упрощает процесс разработки устройства. Для работы данным с двигателем также необходим драйвер, который обеспечивает управление. Однако двигатель из CD-ROM является биполярным, следовательно ему не подойдет драйвер ULN2003. В ходе поиска выяснилось, что для данного типа двигателя подходит микросхема L293D. На рисунке 19 представлена реализация схемы шагового двигателя с драйвером.

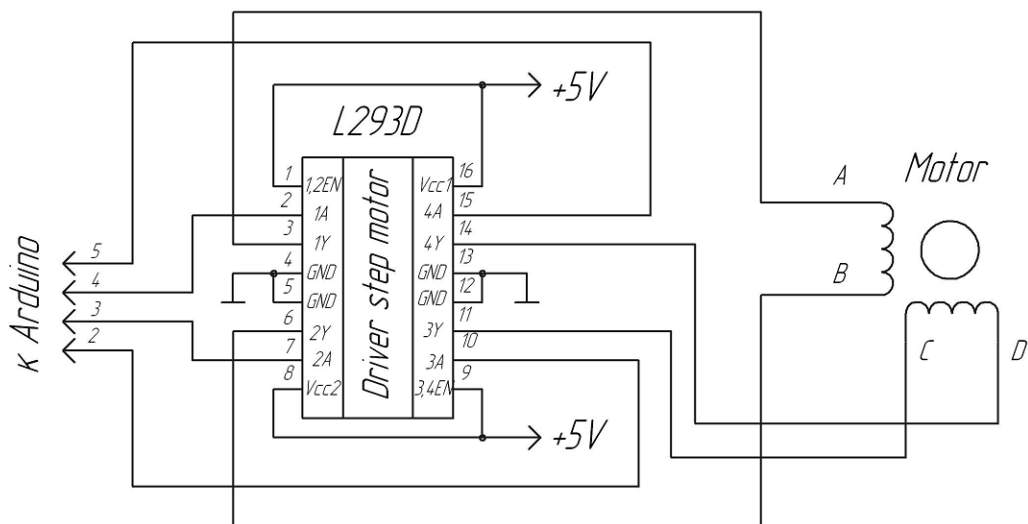


Рисунок 19 – Подключение шагового двигателя

При работе с двигателем из CD-ROM выяснилось, что перемещение на расстояние в 1 мм каретка осуществляет за 4 шага вала. Опираясь на данное условие, был написан управляющий код программы. Для написания данного кода для вращения шагового двигателя применялась библиотека IRremote. Отдельными подпрограммами были прописаны функции движения вала в прямом направлении и реверса. Так как задание параметров системы управления осуществляется посредством ИК передачи с пульта, было решено осуществлять управление шаговым двигателем также нажатием на заданные кнопки пульта. Часть кода программы с описанием представлено далее:

```
int shag = 1; // задание величины шага для счетчика величины зазора
int l = 1; // начальная величина зазора 1мм (выбор описан далее)
void stepp() // подпрограмма для пуска двигателя в прямом направлении
{
    digitalWrite( in1, HIGH );
    digitalWrite( in2, LOW );
    digitalWrite( in3, LOW );
    digitalWrite( in4, LOW );
    delay(500);
}
```

```

... // in1, in2, in4 – LOW
digitalWrite( in3, HIGH );
delay(500);
... // in1, in3, in4 – LOW
digitalWrite( in2, HIGH );
delay(500);
... // in1, in2, in3 – LOW
digitalWrite( in4, HIGH );
delay(500);
}

void step_reverse() // подпрограмма реверса (аналогична stepp, но с обратной
последовательностью)
{
...
}

void loop() {
...

case 0xFF52AD: // подаем команду с пульта на вращение
    stepp();
    l = l + shag; // счетчик величины зазора прибавляет величину шага (1мм)
    delay(100);
    break;

case 0xFF42BD: // подаем команду с пульта на реверс
    step_reverse();
    l = l - shag; // // счетчик величины зазора отнимает величину шага (1мм)
    delay(100);

```



```

break;
case 0xFF4AB5: // команда на обнуление тока в обмотках шагового двигателя
digitalWrite( in1, LOW );
... // in2, in3, in4 – LOW
delay(500);
}

```

2.4.2 Система позиционирования шагового двигателя

Следующей важной задачей является вопрос позиционирования шагового двигателя. Это необходимо для отображения корректных входных данных величины зазора на LCD экран. Для решения данной проблемы было решено применить следующее схмотехническое решение: параллельно оси электродов будут располагаться два контакта, которые будут касаться друг друга, когда величина между электродами будет равна 1 мм (рисунок 20).

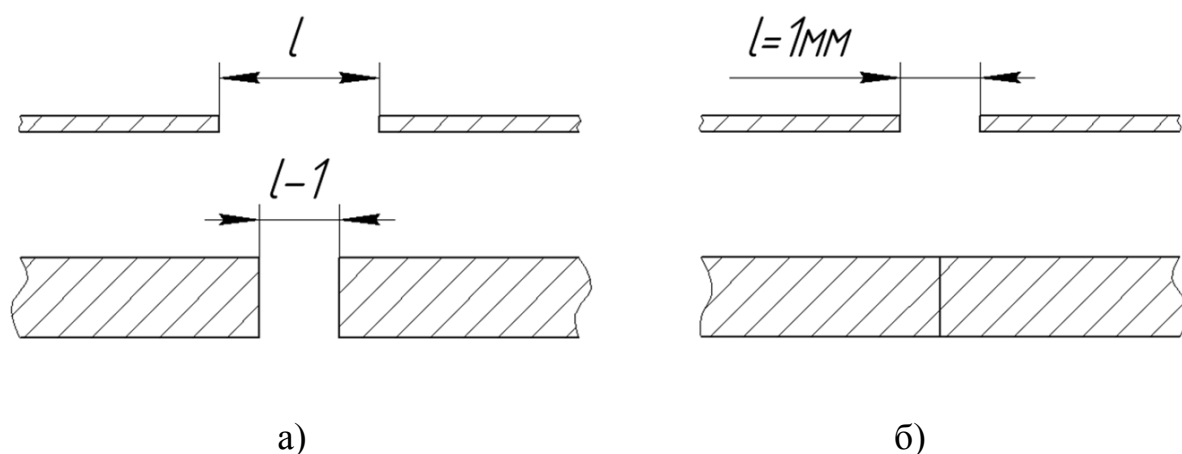


Рисунок 20 – Система отслеживания начального положения электродов с помощью дополнительных контактов: а) контакты разомкнуты; б) контакты замкнуты

Данное расстояние в 1 мм примем за начало отсчета. При включении станда и загрузке программы будет проверяться условие замыкания этих контактов. Если данное условие не выполнено, включится программа реверса, и она будет повторяться пока условие не выполнится, т.е контакты замкнутся. Затем сработает

триггер, который завершит данную программу, и на дисплее отобразится величина зазора 1 мм. После чего можно начинать работу с установкой. Далее представлен фрагмент кода, осуществляющего данное условие:

```
void loop() {  
    int zad = 10; // пин триггера  
    int con = digitalRead(6); // пин считывающий показания триггера  
    int val = digitalRead(8); // пин контролирующей положение отслеживающих  
    КОНТАКТОВ  
    if (val == LOW && con == LOW) // условие при котором отслеживающие  
    контакты разомкнуты и триггер отключен  
    {  
        step_reverse(); // включается подпрограмма реверса  
    }  
    else // если контакты замкнуты, а триггер еще не переключился; либо триггер  
    уже переключился и установка в работе  
    {  
        digitalWrite(zad, HIGH); // переключение триггера  
    }  
    delay(100);  
    ...  
}
```

2.5 Разработка системы передачи выходного напряжения.

2.5.1 Разработка схемотехники для снятия результатов пробивного напряжения с высоковольтной стороны.

Для снятия значения напряжения высоковольтной стороны необходимо предусмотреть ряд условий, т.к. оно будет достигать значений 12 кВ. Следовательно, необходимо разработать безопасную передачу информационного сигнала, чтобы исключить возможность пробоя измеряющей цепи. Оптопередача сигнала отлично подойдет, т.к. также осуществляет гальваноразвязку цепей. Однако, использование оптопар в DIP корпусах в данном случае недопустимо из-за их невысокого пробивного напряжения (~6 кВ). Поэтому, было решено разработать ИК-светоканал, где на удалении (больше чем максимальный зазор электродов) будут располагаться светоизлучатель и фотоприемник.

Сам процесс снятия выходного напряжения будет заключаться в измерении пропорционально ему напряжения на одном из резисторов резистивного делителя. Напряжение на резистивном делителе будет равно выходному, т.е. пробивному напряжению. Рассчитывая номиналы, добьемся того, чтобы напряжение на одном из резисторов делителя было мало и его можно было подавать на модулирующее устройство.

2.5.2 Модуляция напряжения и его передача

Для модуляции напряжения полученного с резистора делителя воспользуемся микросхемой TL494 [24]. Она представляет из себя ШИМ [25-27] (TL494) с регулируемой рабочей частотой. Диапазон входных напряжений у нее составляет 0-3 В. Для исследования его свойств была собрана схема представленная на рисунке 21.

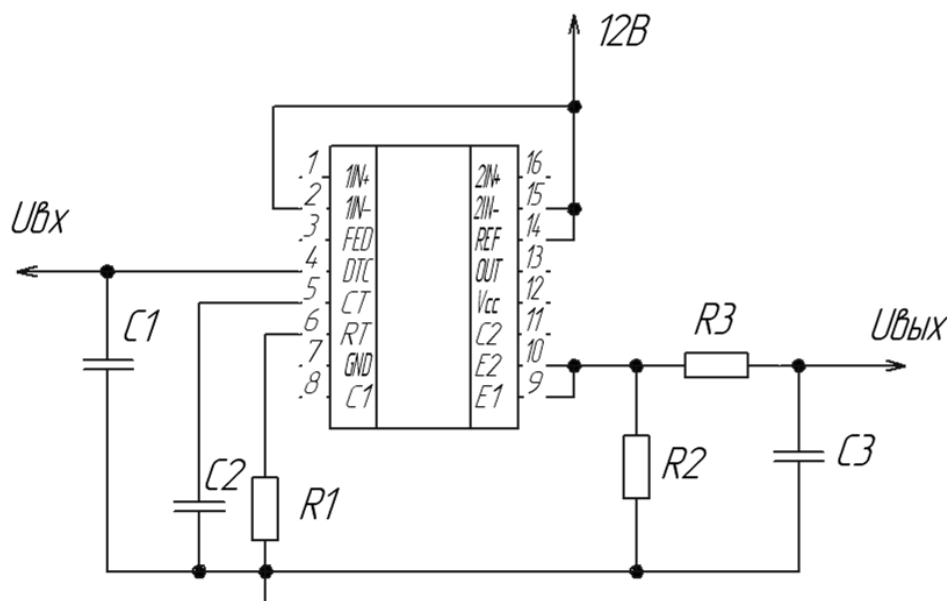


Рисунок 21 – Типовая схема включения TL494

В данной схеме конденсатор $C1$ является фильтром помех входного напряжения. Был выбран керамический конденсатор 470 нФ. Связка $C2$ - $R1$ задает несущую частоту ШИМ согласно документации на TL494, которая рассчитывается по формуле 1:

$$f_H = \frac{1,1}{C2 * R1}. \quad (1)$$

Решено было установить частоту $f_H = 25$ кГц и емкость $C2 = 15$ нФ. То сопротивление $R1$ рассчитывается по формуле 2:

$$R1 = \frac{\tau_H * 1,1}{C2} = \frac{1,1 * 40 * 10^{-6} \text{с}}{15 * 10^{-9} \text{Ф}} = 2,926 * 10^3 \text{Ом}, \quad (2)$$

где $\tau_H = \frac{1}{f_H} = \frac{1}{25000} = 40 * 10^{-6} \text{с}$ – период ШИМ сигнала.

Был выбран резистор $R1 = 2,7$ кОм.

Резистор $R2$ выступает в данной схеме нагрузкой. Его номинал примем равным 560 Ом. Также для снятия среднего выходного напряжения воспользуемся фильтром низких частот $C3$ - $R3$. Его параметры выбираются из условия, что $R3$ на порядок больше $R2$, а частота этой цепи должна быть на два порядка ниже несущей частоты ШИМ. Она рассчитывается по формуле 3:

$$f\phi = \frac{1}{2\pi * C2 * R1}. \quad (3)$$

Исходя из этих условий примем $R3 = 5,6 \text{ кОм}$, $f\phi = 500 \text{ Гц}$. Т.о емкость $C3$ рассчитывается по формуле 4:

$$C3 = \frac{\tau\phi}{2\pi * R3} = \frac{2 * 10^{-3} \text{ с}}{2\pi * 5,6 * 10^3 \text{ Ом}} = 56,89 * 10^{-9} \text{ Ф}, \quad (4)$$

где $\tau\phi = \frac{1}{f\phi} = \frac{1}{500} = 2 * 10^{-3} \text{ с}$ – период фильтра $C3$ - $R3$.

Был выбран конденсатор $C3 = 64 \text{ нФ}$.

2.5.3 Выбор компонентов оптопередачи сигнала

Для осуществления оптопередачи сигнала необходим обоснованный и корректный выбор свето- и фотоэлементов. Было решено осуществлять передачу при помощи элементов, работающих в ИК диапазоне для исключения влияния видимого света на результаты эксперимента. Выбор производился из доступной элементной базы. На рисунке 22 изображена схема для тестирования выбранных элементов.

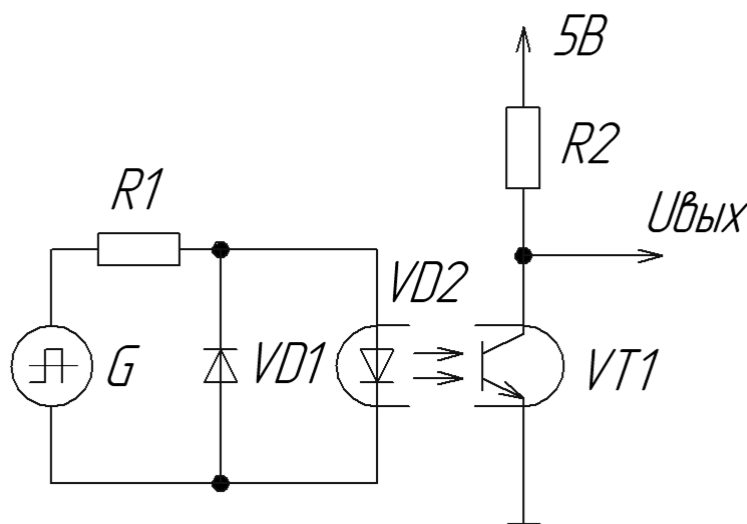


Рисунок 22 – Схема тестирования свето- и фотоэлементов

Подачу входного сигнала осуществляет генератор импульсов G частотой 100 Гц и скважностью 2 . Кремниевый диод $VD1$ необходим, чтобы к светодиоду не прикладывалось обратное напряжение. Резистор $R1$ был выбран из условия

протекания необходимого максимального тока $i = 10 \text{ мА}$, а амплитуда сигнала генератора составляет 1 В. Следовательно R1 должен быть не менее 100 Ом, взяли $R1 = 360 \text{ Ом}$. Сопротивление R2 подбиралось из трех вариантов 270 Ом, 8.2 кОм, 120 кОм, чтобы оценить их влияние на фотоприемник. Опыты проводились при непосредственном соприкосновении излучателя и приемника на одной оси, при этом оптоканал был открытым.

2.5.4 Выбор компонентов системы измерения высоковольтного напряжения устройства

Важным этапом работы стал вопрос выбора схемы питания участка цепи для снятия результатов пробивного напряжения с высоковольтной стороны. Для реализации данной задачи было решено выбрать вариант с трансформаторной гальваноразвязкой. Данный вариант был выбран для защиты первичной управляющей цепи от высоковольтной стороны для избежания пробоя и выхода из строя устройства.

Суть данного решения (рисунок 23) заключается в моделировании при помощи фиксированного ШИМ (DA1) постоянного напряжения 12 В в прямоугольное, которое подается на трансформатор (TV1) в обратном ходовом подключении. На вторичной стороне происходит выпрямление трансформированного напряжения при помощи диода (VD1). Далее производится стабилизация напряжения (DA2) равного 12 В, которое осуществляет питание микросхемой TL494.

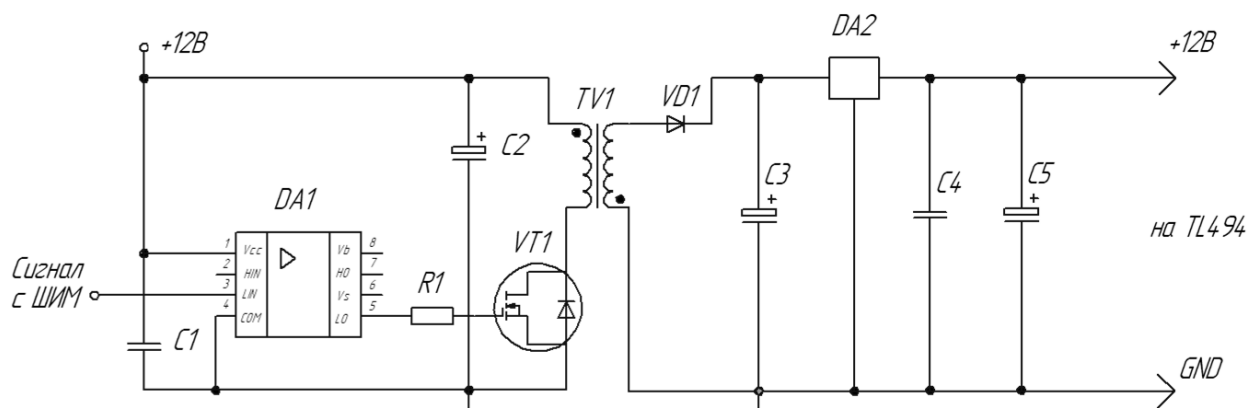


Рисунок 23 – Схема питания измерительной системы высоковольтного напряжения

Данная схема аналогична схеме питания высоковольтного напряжения изображенной на рисунке 15. Поэтому для этой схемы были взяты аналогичные элементы: драйвер DA1 – IR2101, транзистор VT1 – BUZ11A, трансформатор TV1 – PCT19-00. В качестве выпрямителя был использован диод 1N4001, а стабилизатором была выбрана микросхема L7812CV.

3 Экспериментальная часть

3.1 Сборка силовой части с платформой Arduino.

После сборки и отладки силовой части и программирования микроконтроллера, была собрана схема силовой части.

Для начала необходимо было определить, насколько фронты ШИМ у Arduino четкие. На рисунке 24 изображено напряжение на выходе ШИМ Arduino

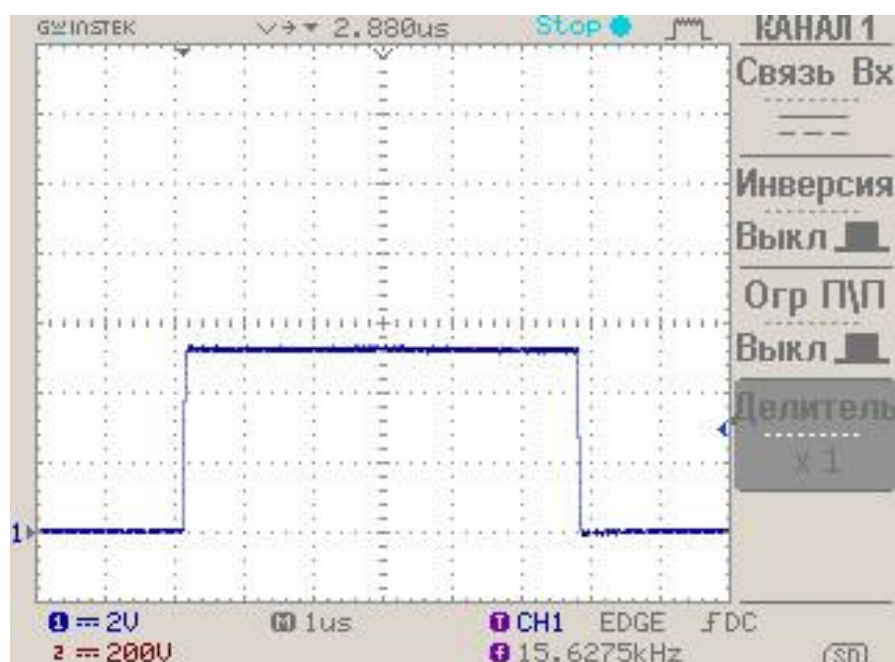


Рисунок 24 – Напряжение на выходе ШИМ Arduino

На данном рисунке видно, что фронты сигнала четкие и необходимости их коррекции не требуется.

Далее на выход Arduino был подключен драйвер, после чего был снят сигнал на выходе драйвера (рисунок 25).

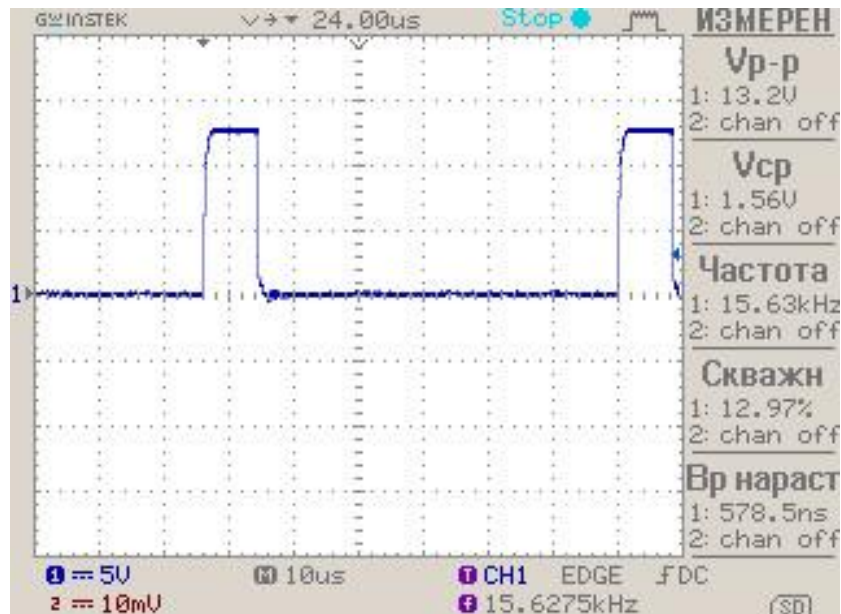


Рисунок 25 – Напряжение на выходе драйвера

Напряжения с выхода драйвера полностью идентично тому, которое подается с Arduino.

Следующим этапом стало подключение транзистора. Для проверки корректности его работы была снята характеристика напряжения на затворе-истоке (рисунок 26).

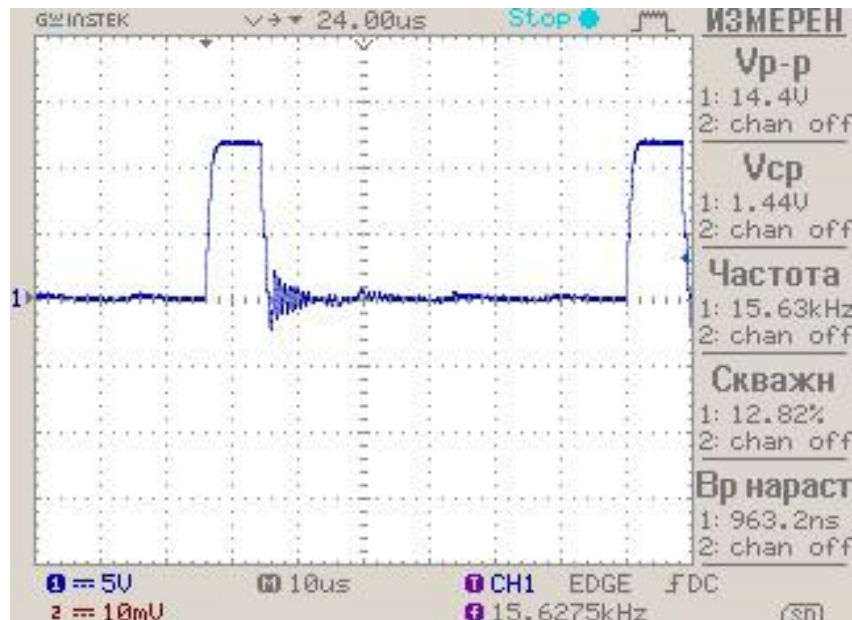


Рисунок 26 – Напряжение на затворе-истоке транзистора

Данное напряжение на затворе-истоке транзистора аналогично тому, которое подается с драйвера. Небольшим отличием можно считать наличие колебательного

процесса на спаде сигнала. Данный процесс обусловлен емкостными свойствами транзистора и не имеет отрицательного влияния.

Затем к схеме была подключена пробойная система с трансформатором и вторичной обмоткой. Для понимания процессов проходящих в транзисторе были сняты осциллограммы тока стока и напряжения стока-истока (рисунок 27 и рисунок 28).

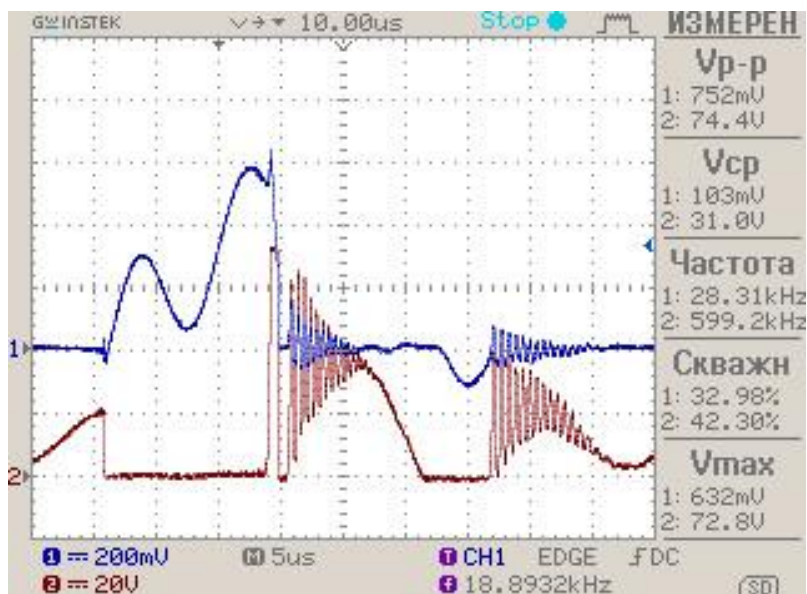


Рисунок 27 – 1 канал – Напряжение на стоке-истоке; 2 канал – ток (1:3) при пробое воздушного промежутка

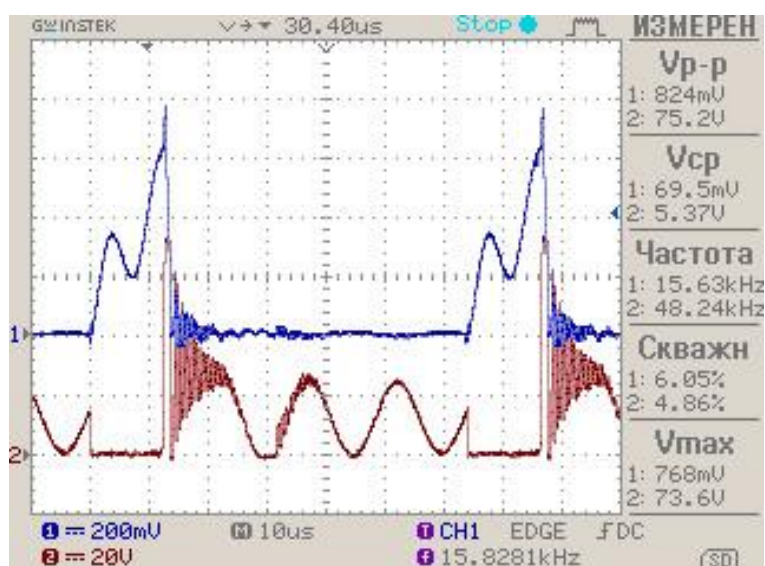


Рисунок 28 – 1 канал – напряжение на стоке-истоке транзистора при нескольких периодах; 2 канал – ток (1:3) при пробое воздушного промежутка

Здесь можно отметить несколько важных моментов. При открытом транзисторе ток через него плавно нарастает. В момент закрытия транзистора, энергия запасенная в первичной обмотке трансформатора перебрасывается во вторичную обмотку. При этом напряжение на транзисторе подсакивает и ограничивается обратным диодом встроенным в транзистор. Ток через транзистор при этом падает до нуля.

Проверка стабильности напряжения питания (рисунок 29) является важным этапом работы, т.к. при его просадке могут изменяться параметры схемы, что повлечет нежелательные процессы.

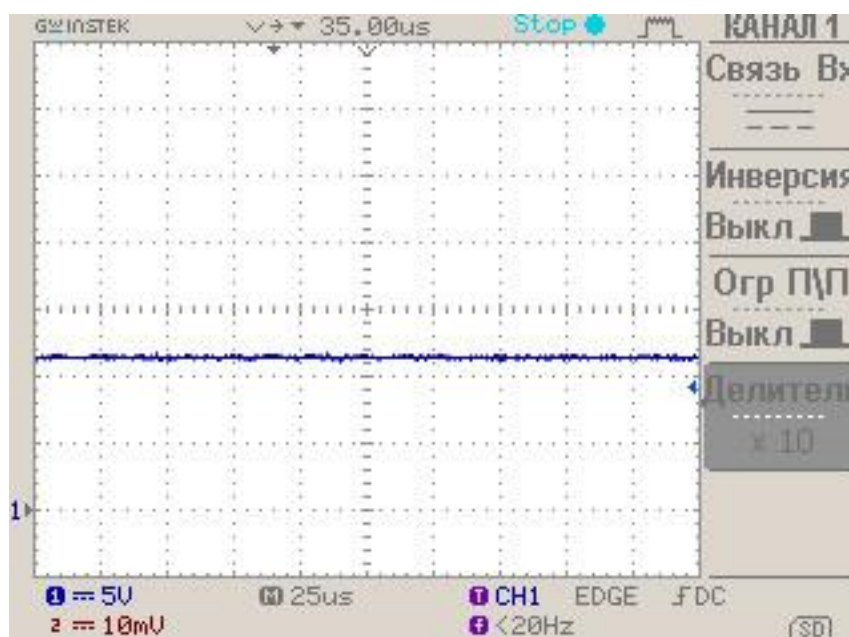


Рисунок 29 – Напряжение питания схемы

Из осциллограммы видно, что напряжение питания постоянно на всем промежутке работы схемы.

Следующим этапом стало определение напряжения на разрядном конденсаторе без пробоя (рисунок 30). Для этого параллельно ему был подключен резистивный делитель общим сопротивлением 51 Мом. К резистору 1 Мом был подключен осциллограф, вследствие чего значения снимаемое осциллографом напряжение относится как 1:51.

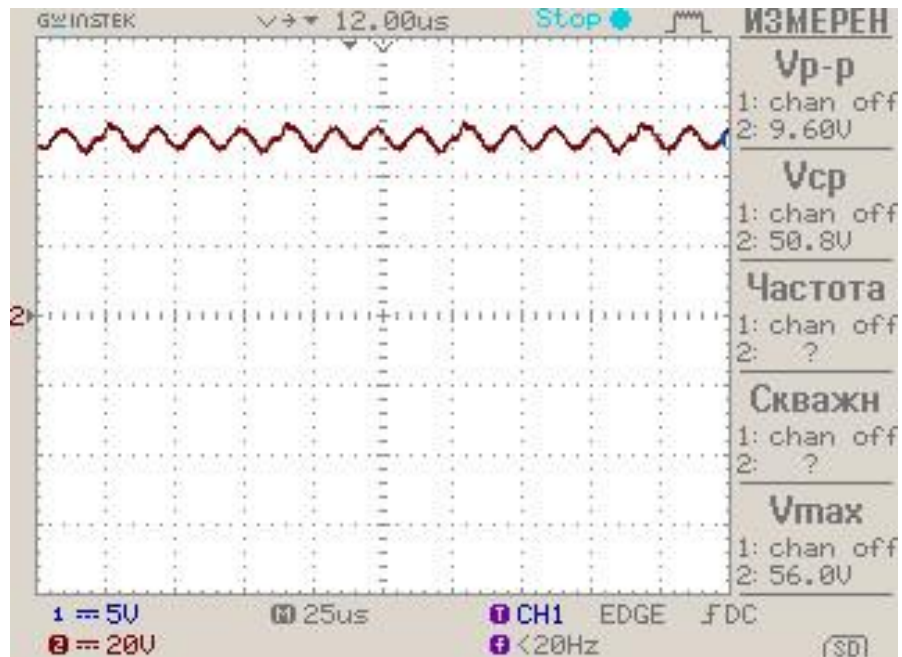


Рисунок 30 – Напряжение на разрядном конденсаторе (1:51) без пробоя воздушного промежутка

Напряжение на разрядном конденсаторе без пробоя воздушного промежутка имеет пульсирующий установившийся характер. Это обусловлено тем, что конденсатор насытился, т.е. за время такта конденсатор разряжается ровно на ту величину напряжения которую ему сообщает система.

Важным с точки зрения определения параметров схемы стала регистрация напряжения на разрядном конденсаторе при пробое воздушного промежутка. Были сняты осциллограммы данного напряжения при разных значениях размера воздушного промежутка (рисунки 31 – 34).

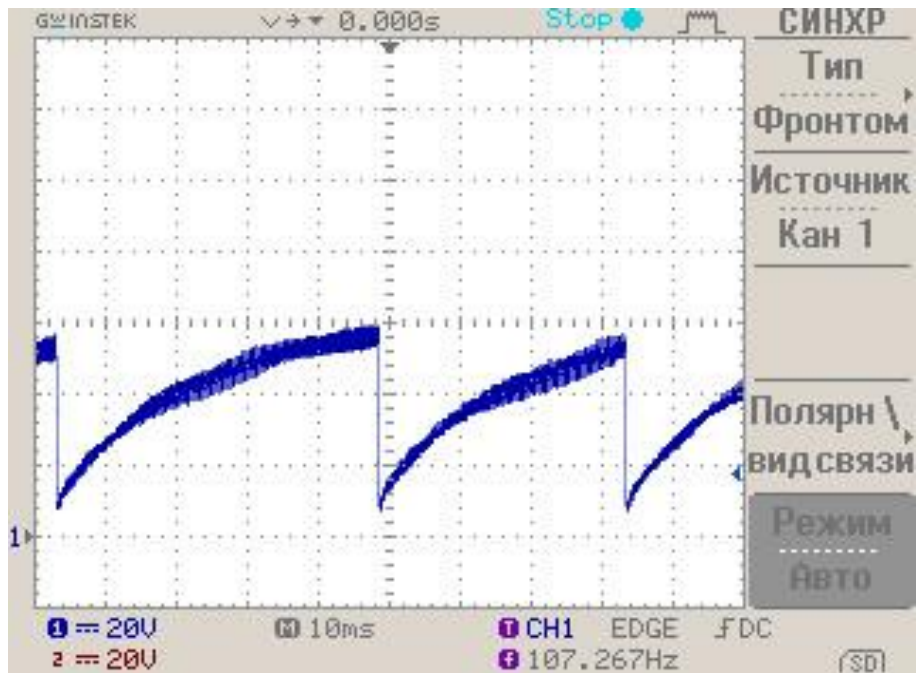


Рисунок 31 – Напряжение на разрядном конденсаторе при зазоре 1мм (1:51) при пробое воздушного промежутка

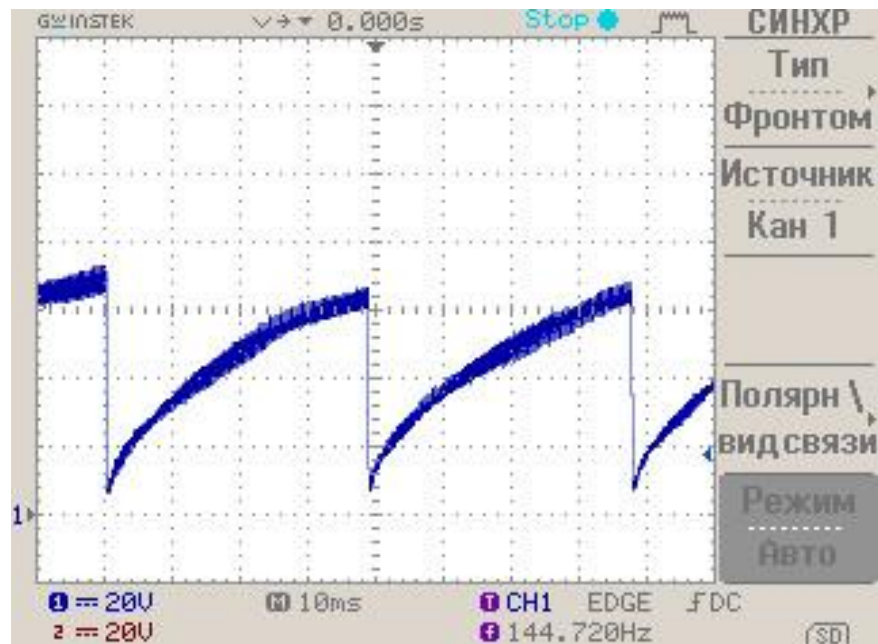


Рисунок 32 – Напряжение на разрядном конденсаторе при зазоре 2мм (1:51) при пробое воздушного промежутка

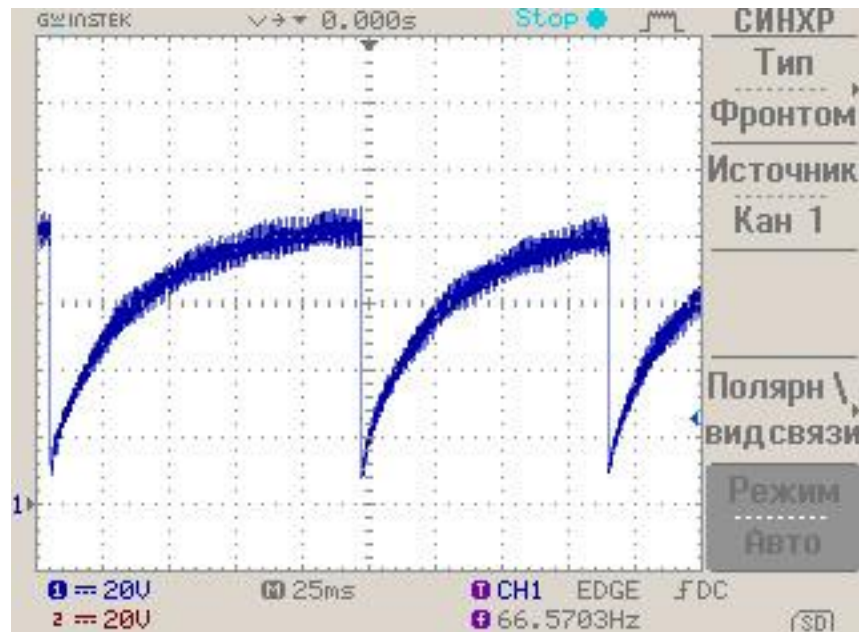


Рисунок 33 – Напряжение на разрядном конденсаторе при зазоре 3мм (1:51) при пробое воздушного промежутка

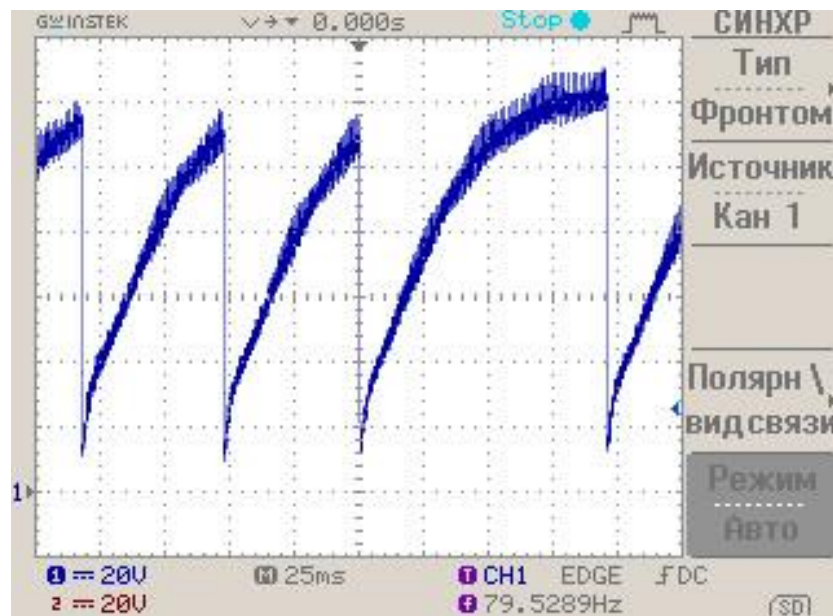


Рисунок 34 – Напряжение на разрядном конденсаторе при зазоре 8мм (1:51) при пробое воздушного промежутка

Из данных осциллограмм видно, что напряжение на конденсаторе нарастает порциями. При достижении критического напряжения происходит пробой воздушного промежутка, при этом напряжение на конденсаторе падает в ноль.

Также были сняты значения тока разрядного конденсатора при разных размерах зазора (рисунки 35-36).

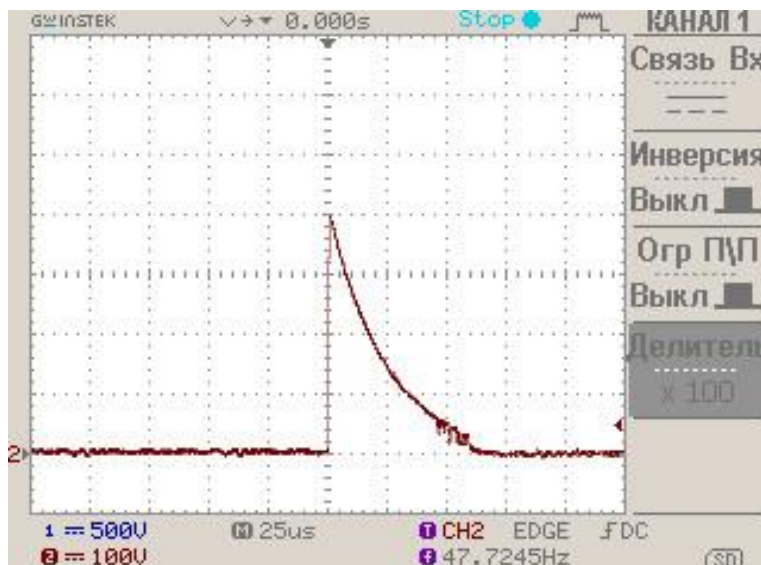


Рисунок 35 – Ток разрядного конденсатора при зазоре 1мм (820:1) при пробое воздушного промежутка

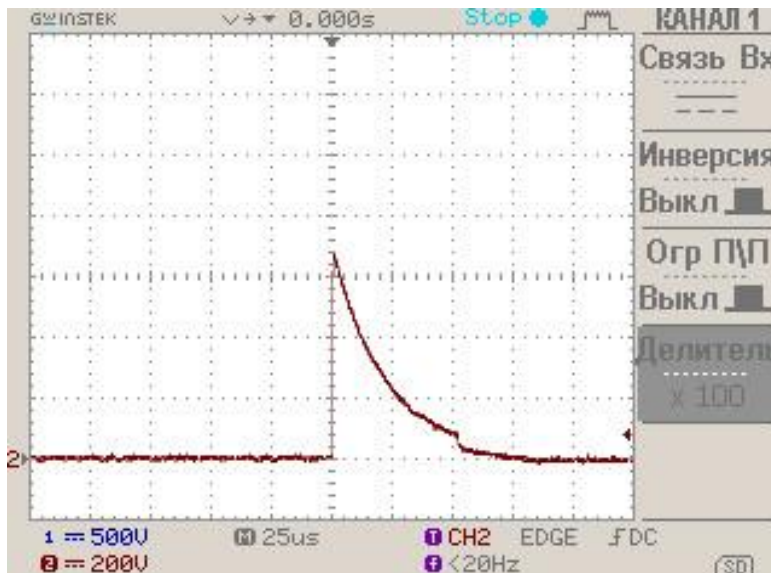


Рисунок 36 – Ток разрядного конденсатора при зазоре 2мм (820:1) при пробое воздушного промежутка

Можно заметить, что при начале пробоя ток резко возрастает. В течение периода разряда конденсатора ток в промежутке уменьшается и к завершению

пробоя становится равным нулю. Аналогично напряжению на разрядном конденсаторе значение его тока также увеличивается при увеличении расстояния воздушного зазора.

Одной из важных задач, является создание устойчивой зависимости напряжения разрядного конденсатора от ширины импульса, задаваемого нами при помощи пульта. Была снята зависимость данного напряжения при изменении величины ШИМ (рисунок 37).

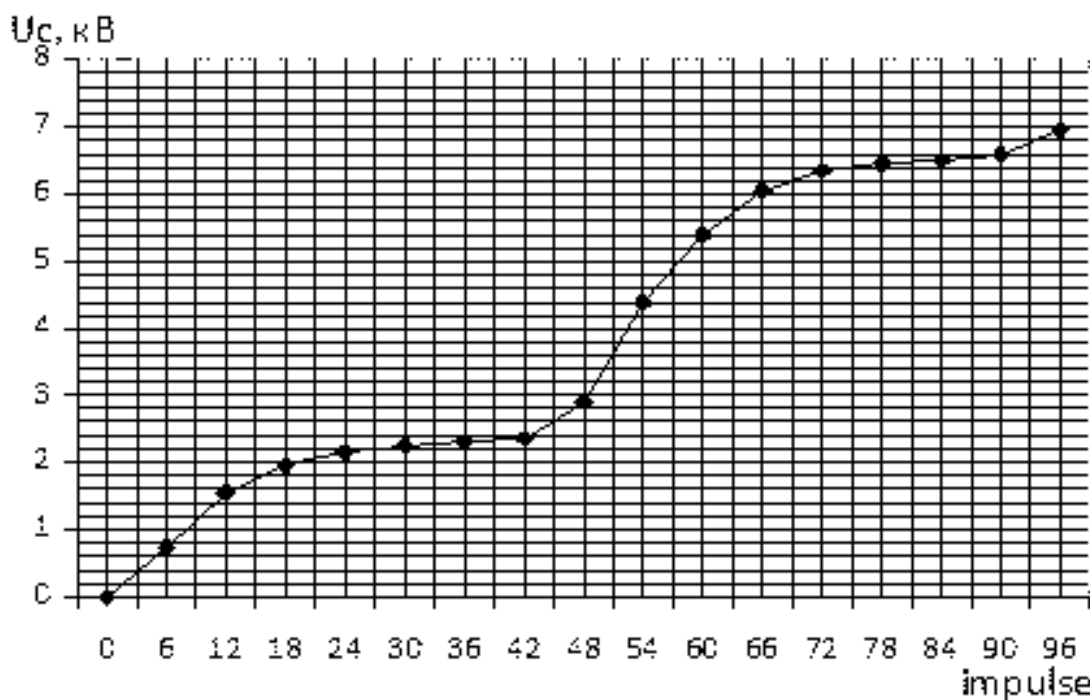


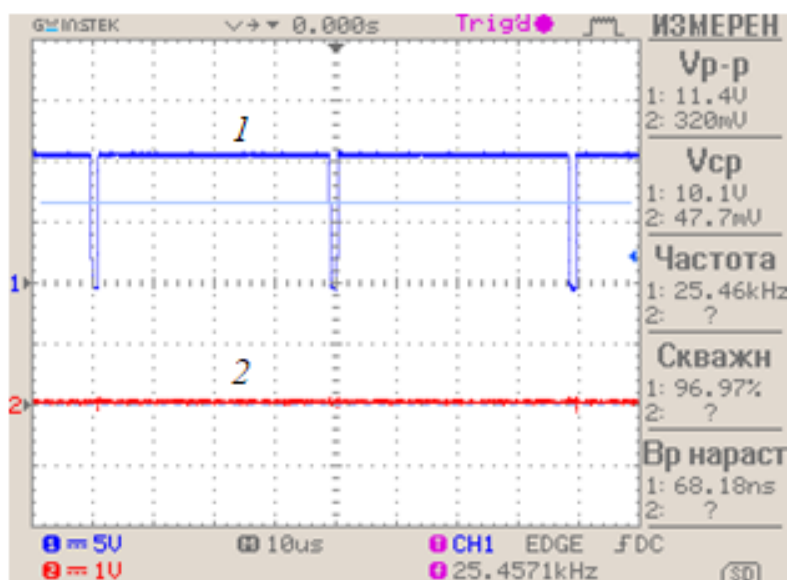
Рисунок 37 – Зависимость напряжения конденсатора U_c от значения ШИМ.

По полученной зависимости можно судить о том, что при увеличении ширины импульса напряжение прямолинейно увеличивается, следовательно данная схема полностью выполняет поставленное условие регулирования.

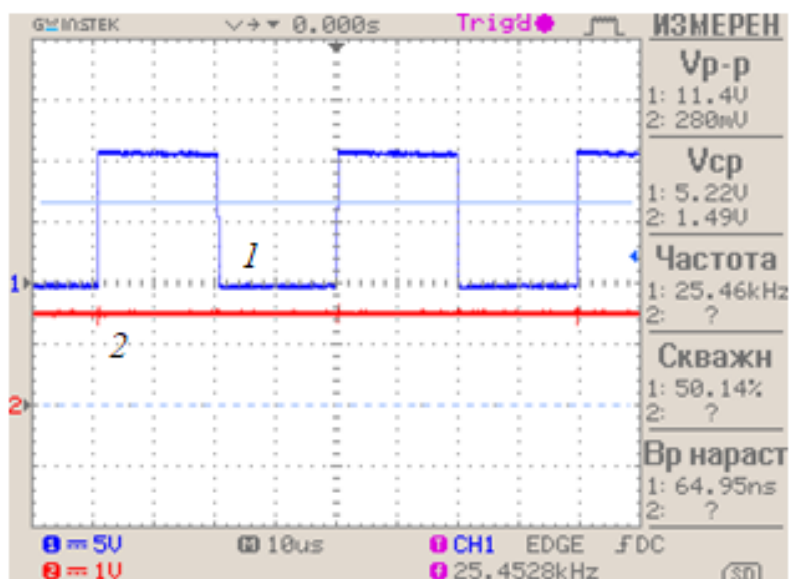
Согласно данным полученным в этой главе данным, можно сделать вывод, что силовая часть работает корректно.

3.2 Сборка схемы питания развязывающей системы на TL494

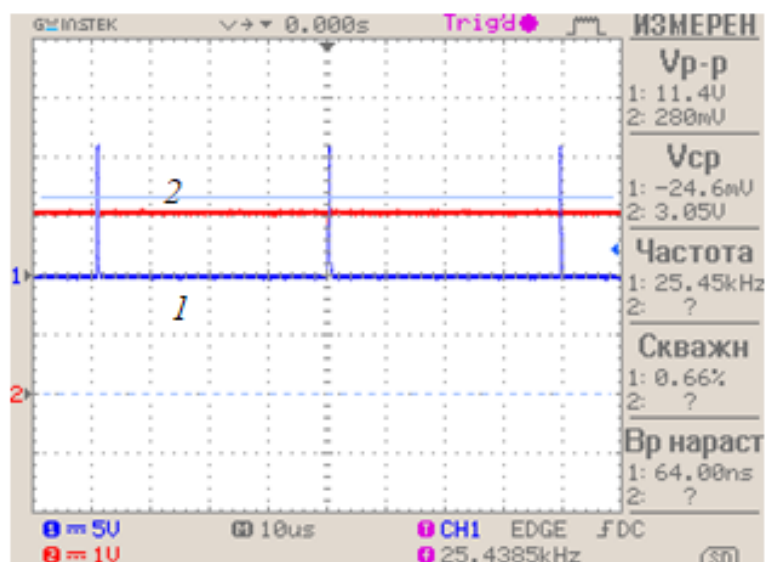
После сборки схемы (рисунок 21) на макетной плате был снят ШИМ сигнал при различных величинах входного напряжения: $U_{вх} = 0$ В; 1,5 В; 3 В (рисунок 38).



а)



б)

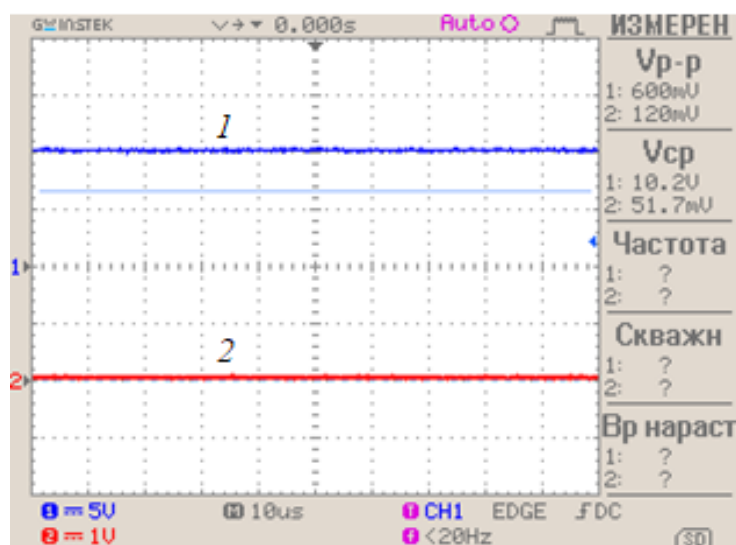


в)

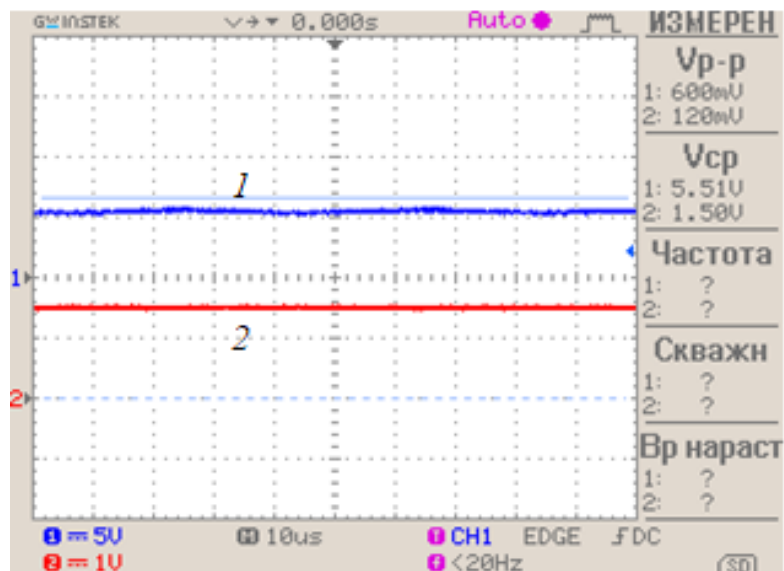
Рисунок 38 – ШИМ сигнал (канал 1) при различных величинах $U_{вх}$ (канал 2): а) $U_{вх} = 0$ В; б) $U_{вх} = 1,5$ В; в) $U_{вх} = 3$ В

При минимальном входном напряжении ширина импульса максимальная, т.к. схема включена с общим эмиттером. При увеличении входного напряжения ширина импульса соответственно уменьшалась и стала минимальной при напряжении 3 В. При дальнейшем увеличении $U_{вх}$ сигнала изменение ШИМ не наблюдалось.

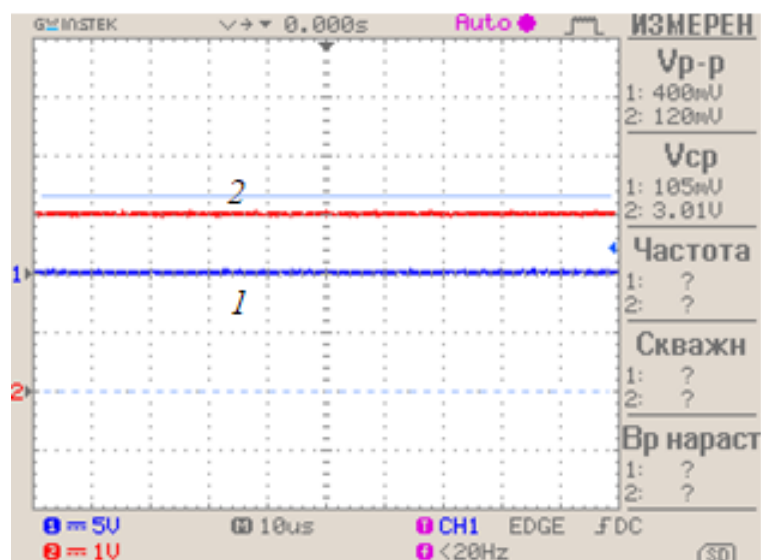
Аналогично рисунку 38 сняли величину выходного напряжения на фильтре при различных величинах входного напряжения (рисунок 39).



а)



б)

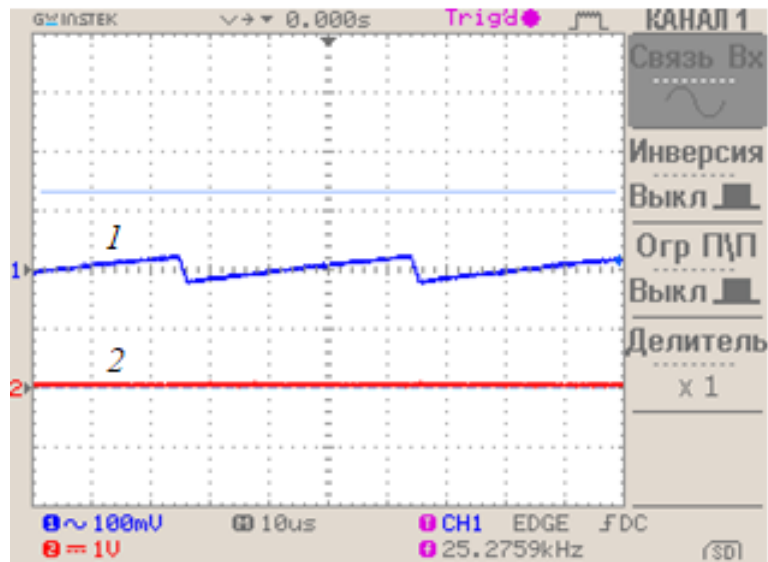


в)

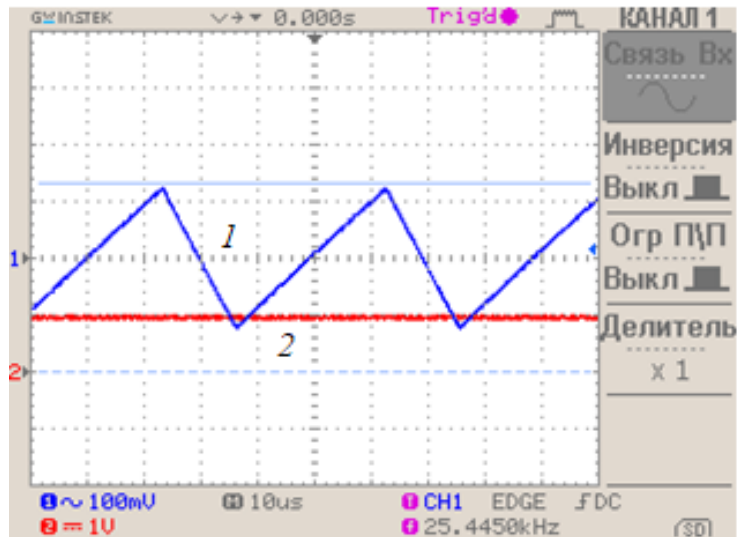
Рисунок 39 – Выходное напряжение на фильтре (канал 1) при различных величинах $U_{вх}$ (канал 2): а) $U_{вх} = 0$ В; б) $U_{вх} = 1,5$ В; в) $U_{вх} = 3$ В

После установки С3-R3 фильтра $U_{вых}$ также соответственно уменьшалось при увеличении $U_{вх}$.

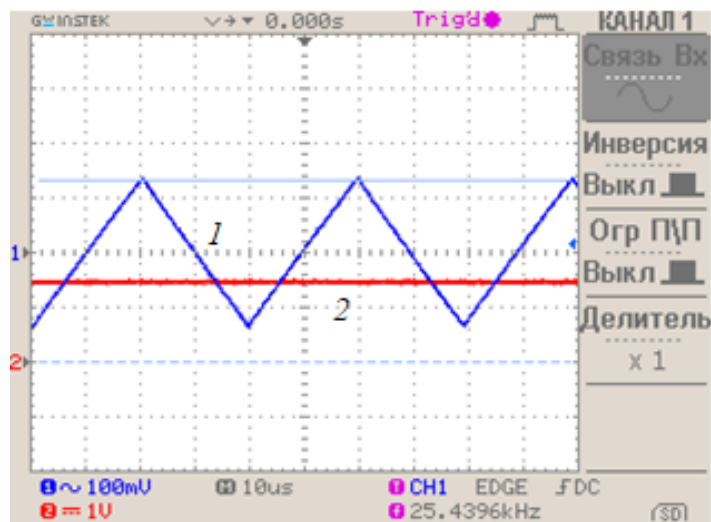
После этого сняли амплитуду пульсаций $U_{вых}$ при различных величинах $U_{вх}$: 0 В, 1 В, 1,5 В, 2В, 3В (рисунок 40).



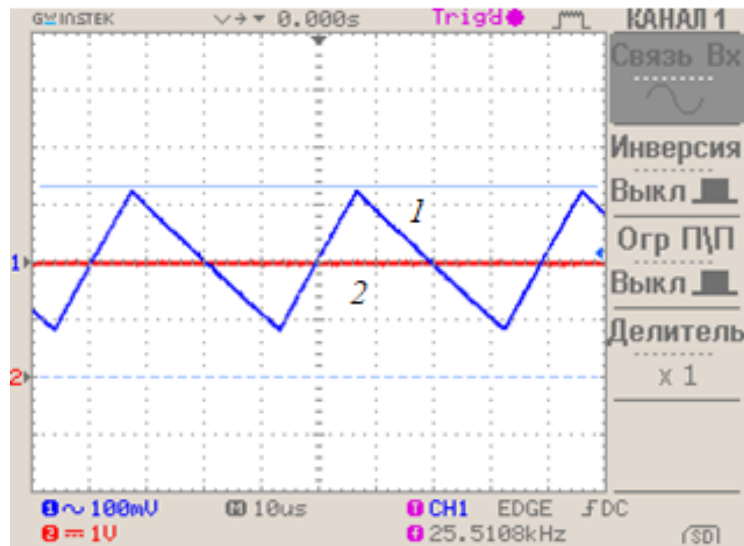
a)



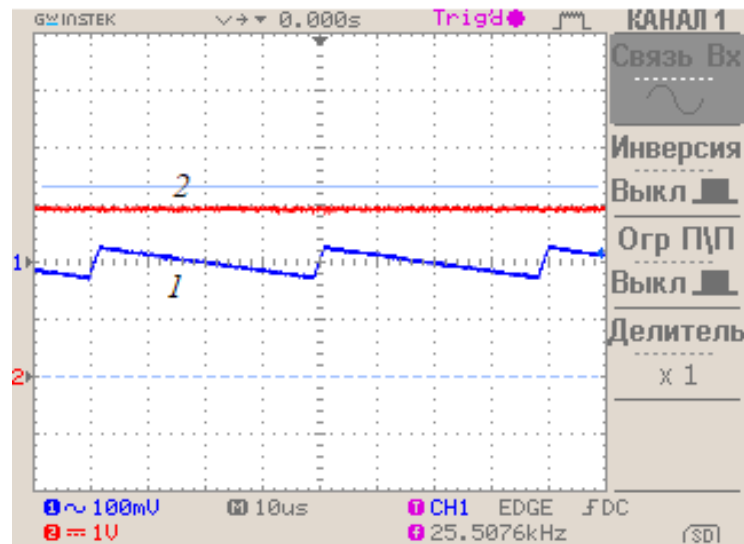
б)



в)



г)



д)

Рисунок 40 – Амплитуда пульсаций $U_{\text{вых}}$ (1 канал) при различных величинах $U_{\text{вх}}$ (2 канал): а) 0 В; б) 1 В; в) 1,5 В; г) 2В; д) 3В

По результатам была построена аппроксимирующая кривая представленная на рисунке 41.

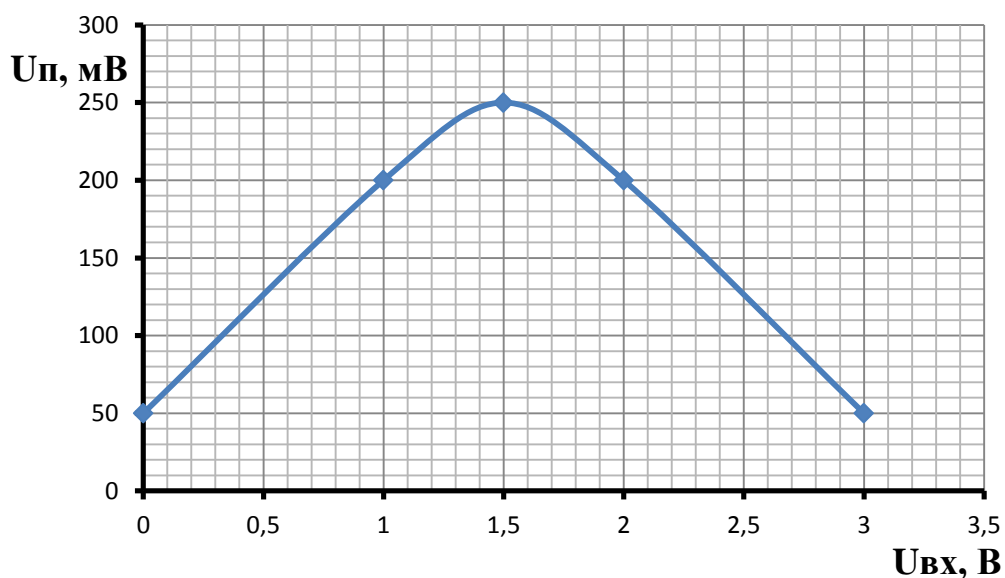
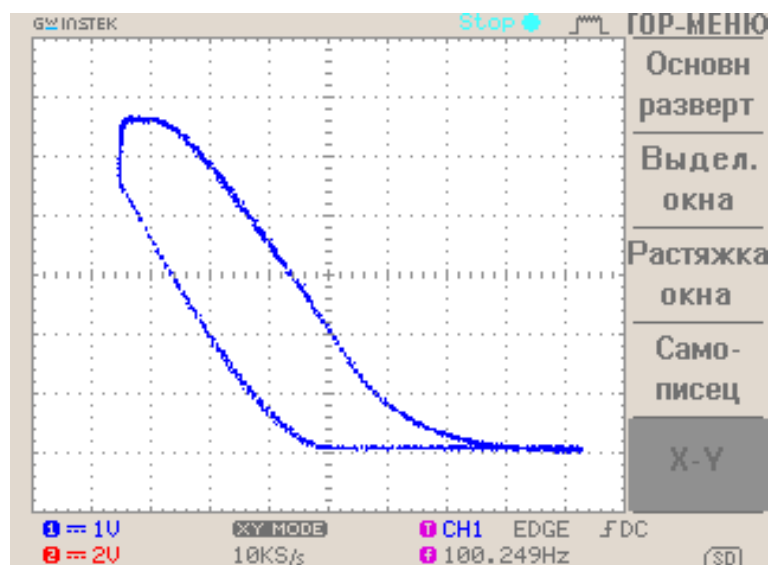
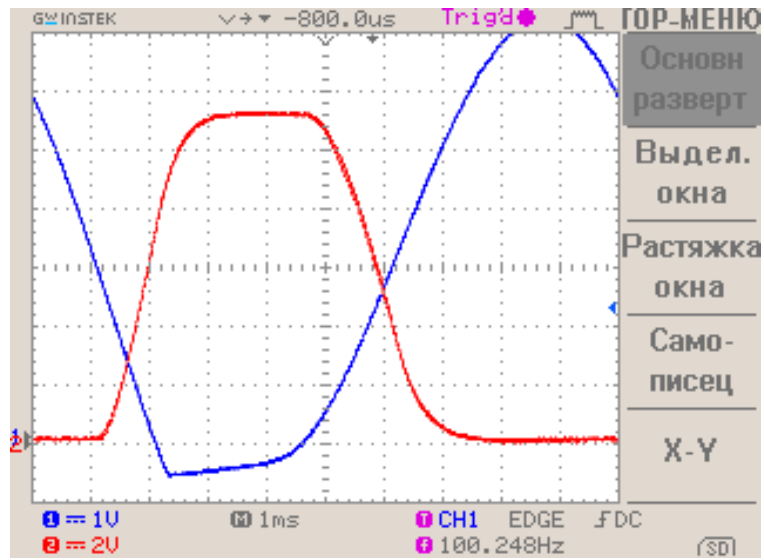


Рисунок 41 – Экспериментальная зависимость двойной амплитуды пульсаций выходного напряжения от величины входного с аппроксимирующей ее кривой

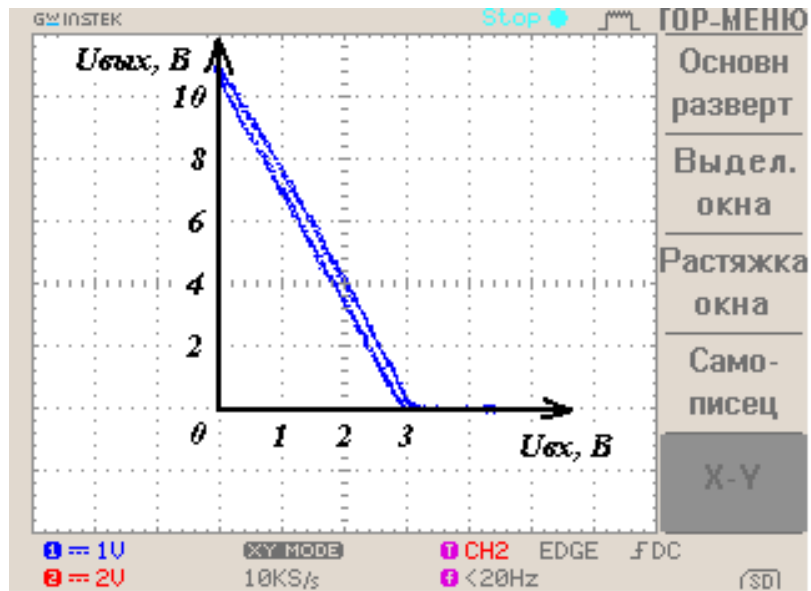
На рисунке 41 видно, что в середине рабочего диапазона двойная амплитуда пульсаций максимальная и достигает 250 мВ. Изменением величины емкости можно добиться уменьшения этих пульсаций.

Далее было решено снять передаточную характеристику. Для этого с генератора импульсов через диод подали сигнал на вход TL494. Установили поочередно частоту 100 Гц и 10 Гц. На рисунке 42 изображены результаты эксперимента.

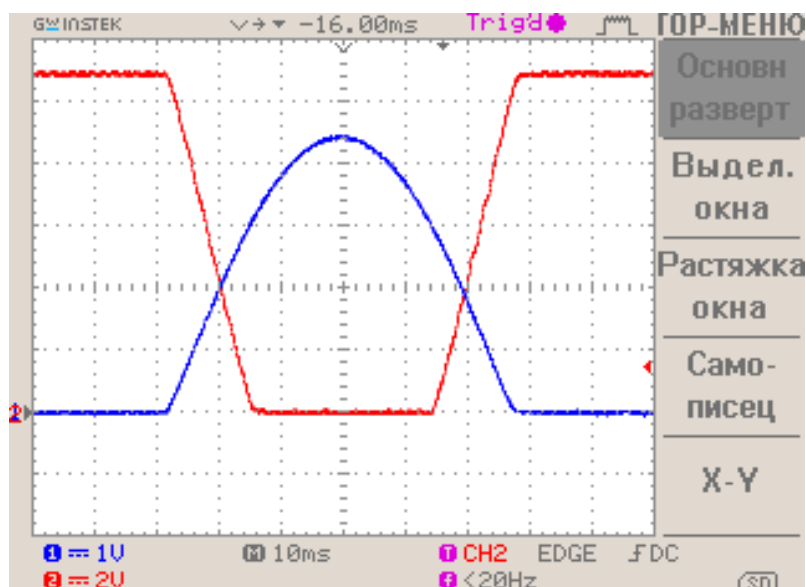




б)



в)



г)

Рисунок 42 – Передаточная характеристика: а) в виде графика (100 Гц); б) с временной осью (100 Гц); в) в виде графика (10 Гц); г) с временной осью (10 Гц)

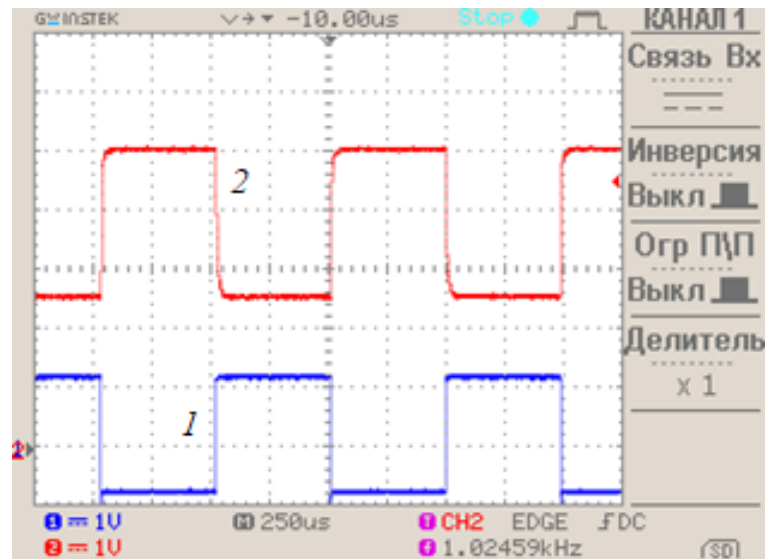
На рисунке 42.а видно, что изменение $U_{вых}$ обратнопропорционально $U_{вх}$. Однако можно заметить, что характеристика имеет своего рода гистерезис. Это можно объяснить из рисунка 42.б тем, что между входным и выходным сигналами появляется задержка, обусловленная свойствами выходного фильтра. При уменьшении частоты (рисунки 42.в, 42.г) наблюдается уменьшение запаздывания, и передаточная характеристика принимает форму линии. В данной установке будет исследоваться статические характеристики выходного сигнала, поэтому задержки при динамике не будут оказывать влияния.

Таким образом в ходе работы с ШИМ TL494 удалось определить его основные характеристики. Была доказана линейность передаточной характеристики (рисунок 42.б), дополнительно было получено, что передаточная характеристика не имеет гистерезис при измерении входного сигнала с частотным набором до 10 Гц.

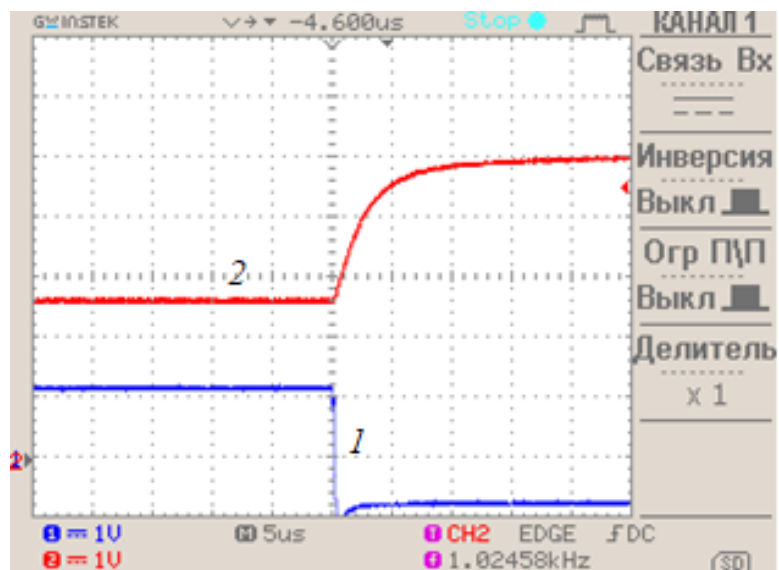
3.3 Работа с оптопередачей сигнала

На рисунках 43 – 44 представлены результаты включений различных комбинаций светоизлучателей и фотоприемников. Также в опытах изменялась величина R_2 . Главными величинами, которые необходимо измерить в опытах, является рабочий диапазон напряжения и время фронтов сигнала.

Исследуем пару фотодиод (ф.д.) BPW41N – светодиод (с.д.) FYL-5013IRAB при сопротивлении $R_2 = 8,2$ кОм (рисунок 43).



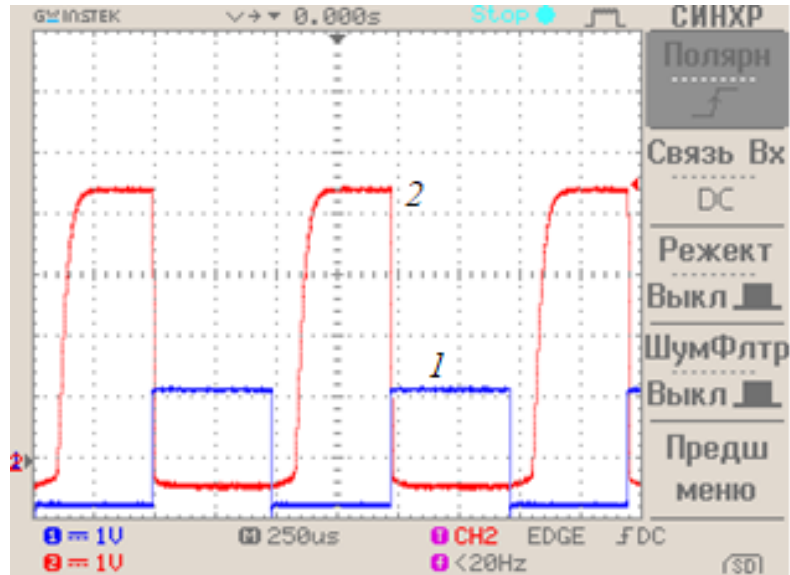
а)



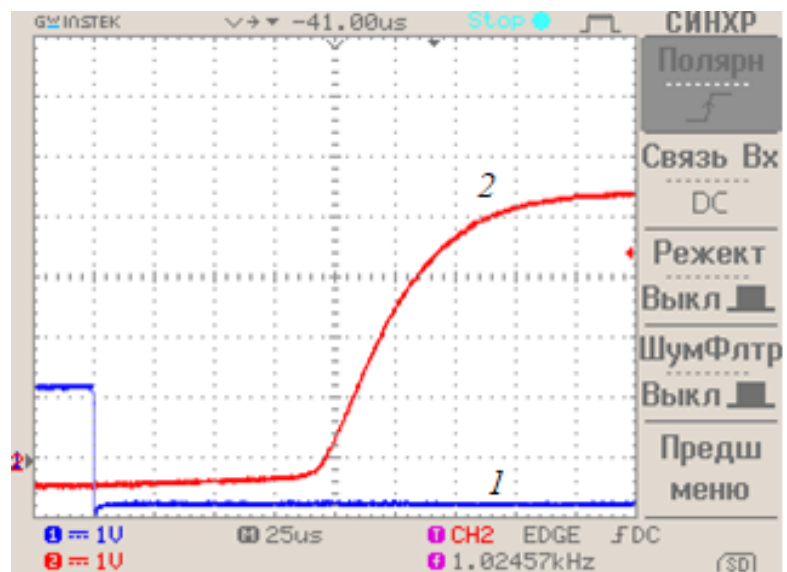
б)

Рисунок 43 – Пара ф.д. BPW41N – с.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R_2 = 8,2$ кОм: а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 43.а

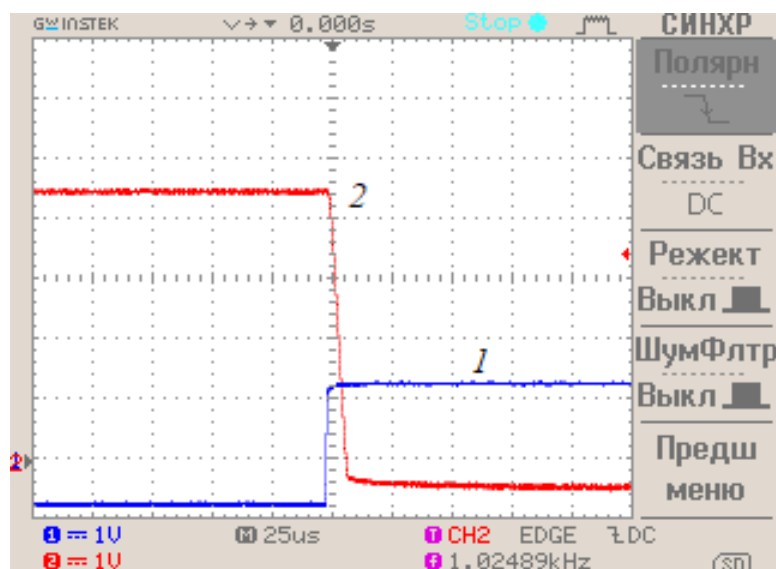
В паре ф.д. BPW41N – с.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R2 = 8,2 \text{ кОм}$ рабочий диапазон ($U_{рл}$) 2,5 – 5 В, а суммарная длительность фронтов ($t_{фр}$) не превышает 15 мкс. Заменяем $R2$ на 120 кОм (рисунок 44).



а)



б)



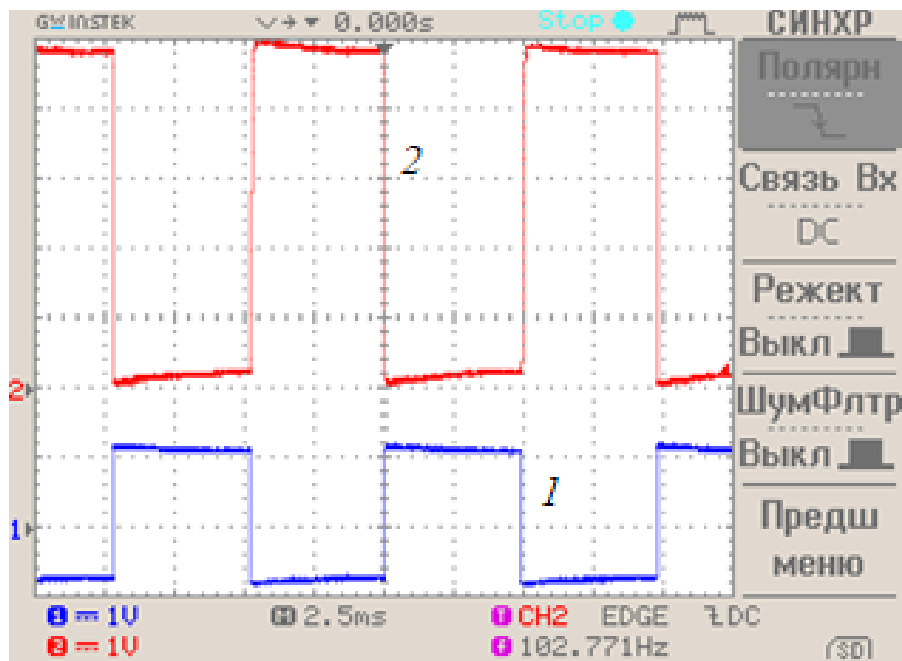
в)

Рисунок 44 – Пара ф.д. ВРW41N – с.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R2 = 120$ кОм: а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 44.а; в) развернутый срез рис. 44.а

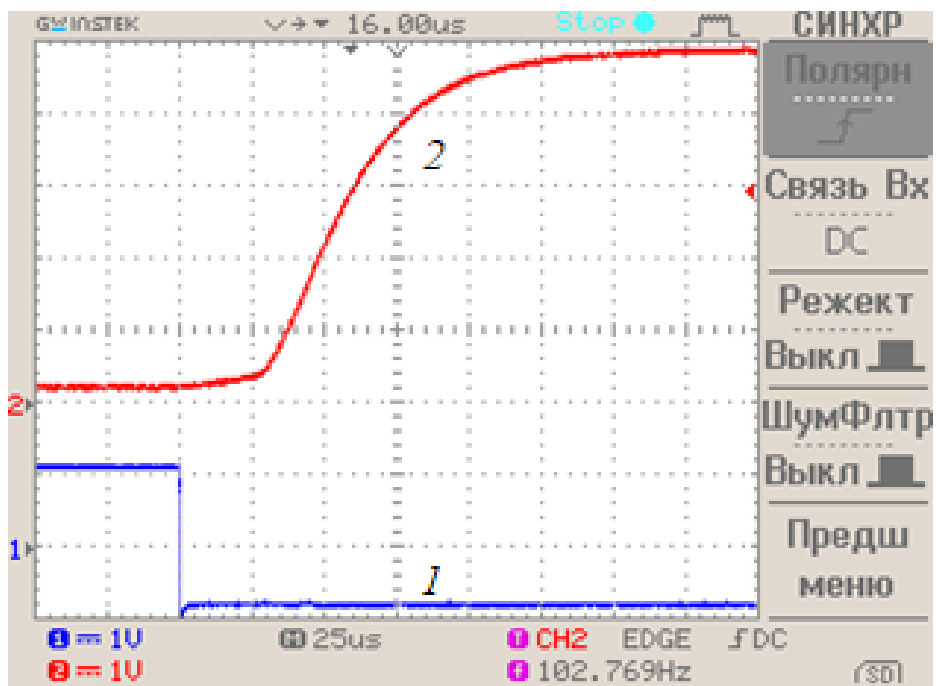
Оказалось, что при $R2 = 120$ кОм $U_{рд}$ увеличилось до $-0,5 - 5$ В, однако и $t_{фр}$ увеличилось до 85 мкс. Значение напряжения меньше нуля означает работу фотодиода в фотогальваническом режиме, т.е. он начинает работать как источник тока.

Из данных экспериментов можно сделать вывод, что при увеличении $R2$ происходит увеличение рабочего диапазона изменения напряжения на фотодиоде ВРW41N, однако, также увеличивается и общее время фронтов. В данной установке приоритетным является диапазон работы, скорость изменения фронтов и спадов не так важна. Важно чтобы суммарно длительность фронта и спада была на порядок меньше чем частота ШИМ и которая соответственно на 1-2 порядка выше частоты получения выходного сигнала. Если принять частоту выходного сигнала 1-10 Гц, то частота ШИМ 0,1-1 кГц. При этом период ШИМ 1 мс, а следовательно суммарно фронт и спад должны быть менее 0,1 мс.

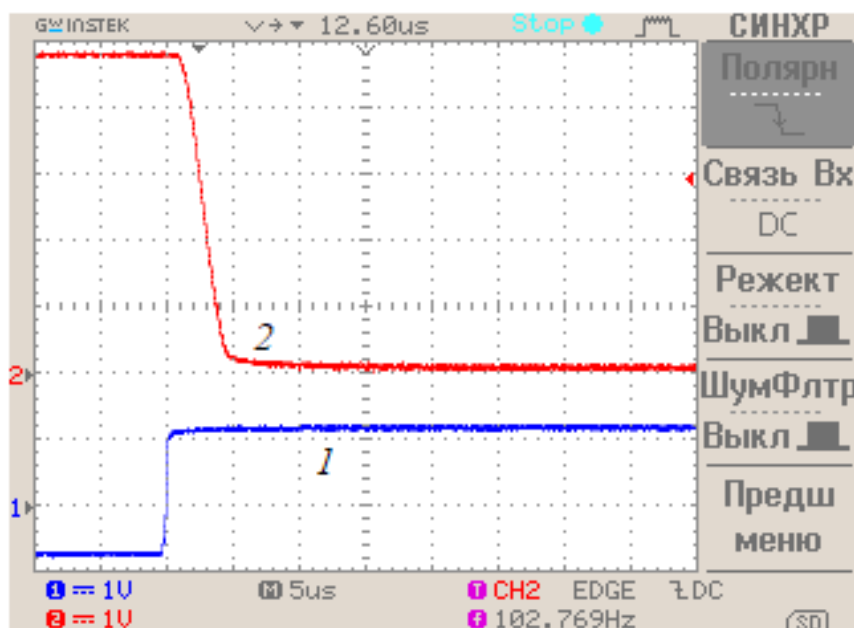
Следующей парой включили фототранзистор (ф.т.) ВРW85В – с.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R2 = 8,2$ кОм (рисунок 45).



a)



б)



в)

Рисунок 45 – Пара ф.т. ВРW85В – с.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R2 = 8,2$ кОм: а) сигнал с генератора (1канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 45.а; в) развернутый срез рис. 45.а

При данном $R2$ $U_{рд} = 0 - 5$ В, $t_{фр} = 80$ мкс. Попробовали изменить $R2 = 120$ кОм (рисунок 46).

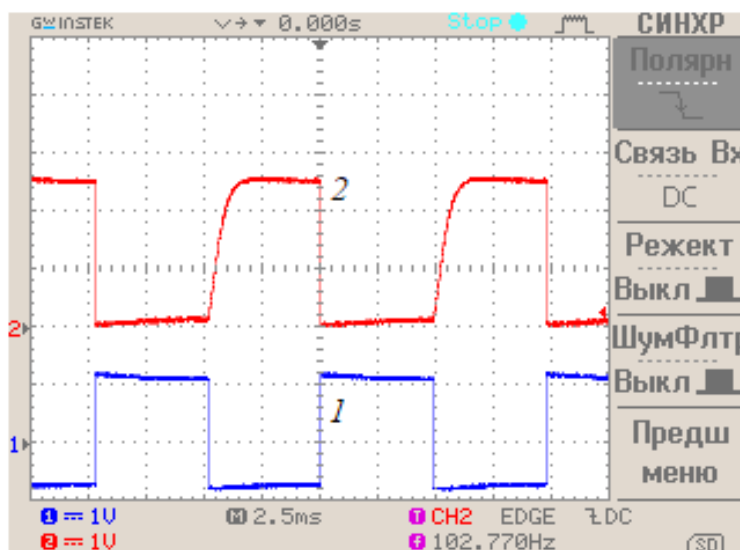
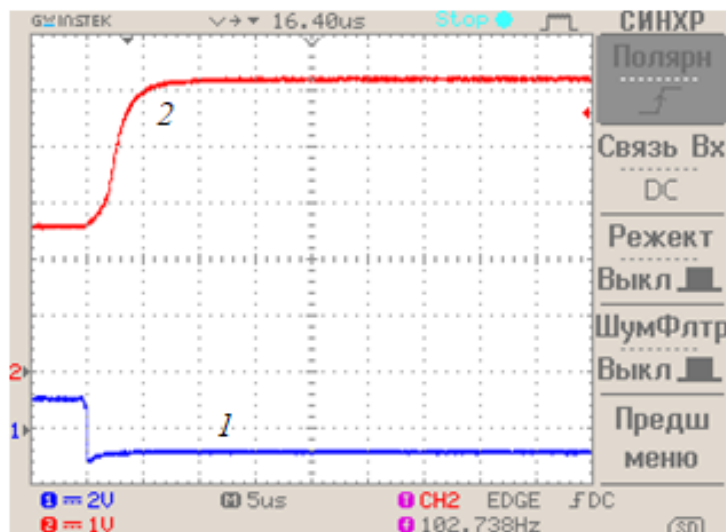
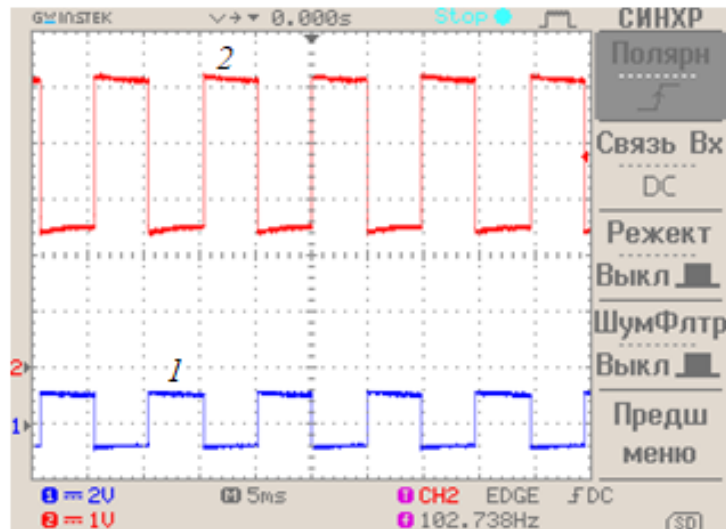
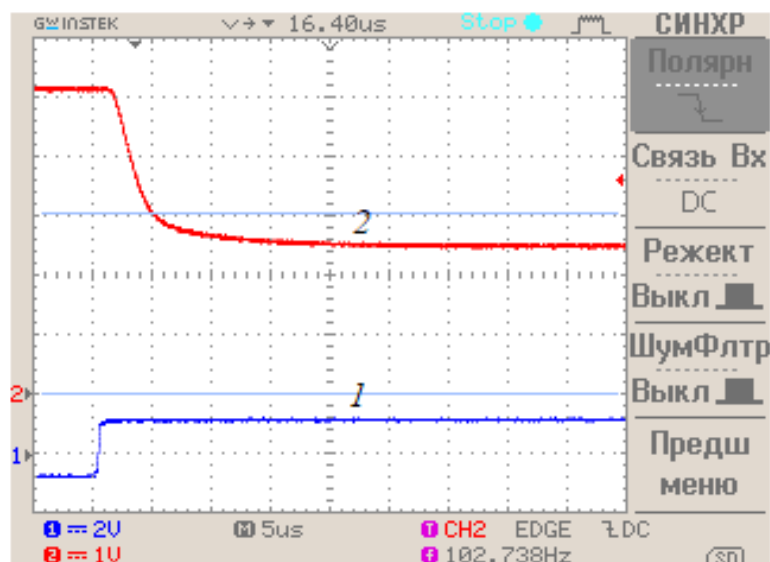


Рисунок 46 – Пара ф.т. ВРW85В – с.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R2 = 120$ кОм: сигнал с генератора (1канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал)

При таком сопротивлении R2, верхняя граница $U_{рд}$ опустилась до 2,5 В из-за того, что на большом сопротивлении происходит основное падение напряжения, вследствие чего напряжение на фототранзисторе ограничено.

Было решено поставить в цепь $R2 = 270 \text{ Ом}$ (рисунок 47).





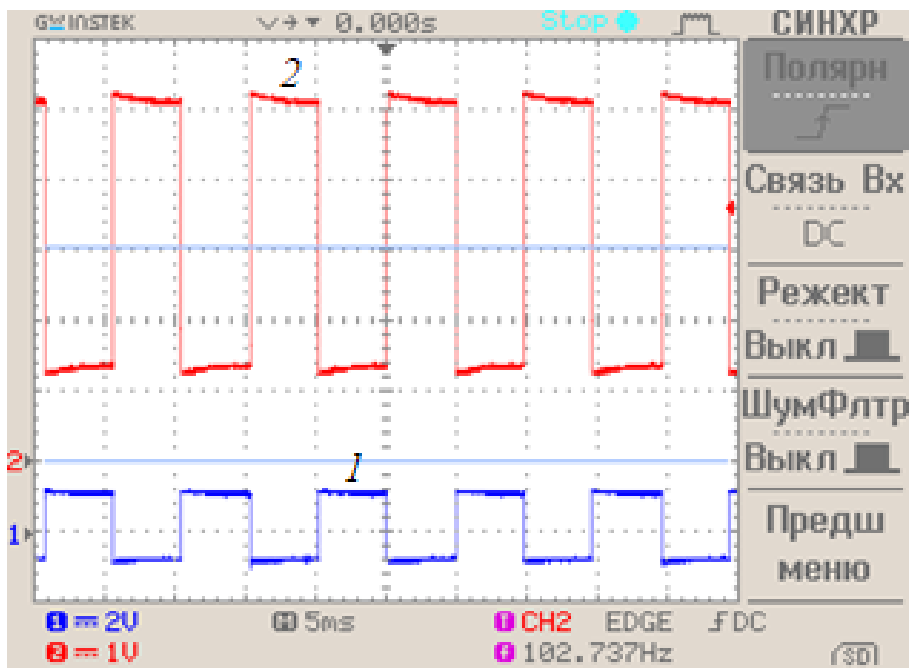
в)

Рисунок 47 – Пара ф.т. BPW85B – с.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R2 = 270$ Ом: а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотозаэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 47.а; в) развернутый срез рис. 47.а

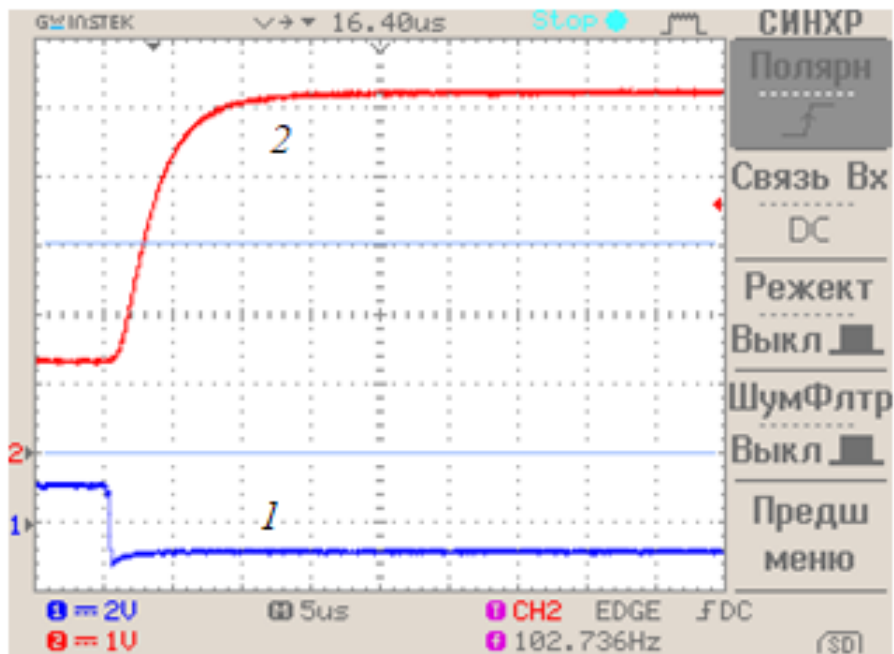
В данном случае $U_{рд} = 2,5 - 5$ В. Напряжение изменилось вследствие того, что теперь сопротивление фототранзистора теперь много больше $R2$ и на нем происходит основное падение напряжения. Поэтому $U_{рд}$ не проседает до нуля. Однако стало заметно, что $t_{фр}$ значительно уменьшилось и не превышает 10 мкс.

Таким образом стало известно, что при $R2$ равном порядка 10 кОм на фототранзисторе BPW85B $U_{рд}$ максимальное.

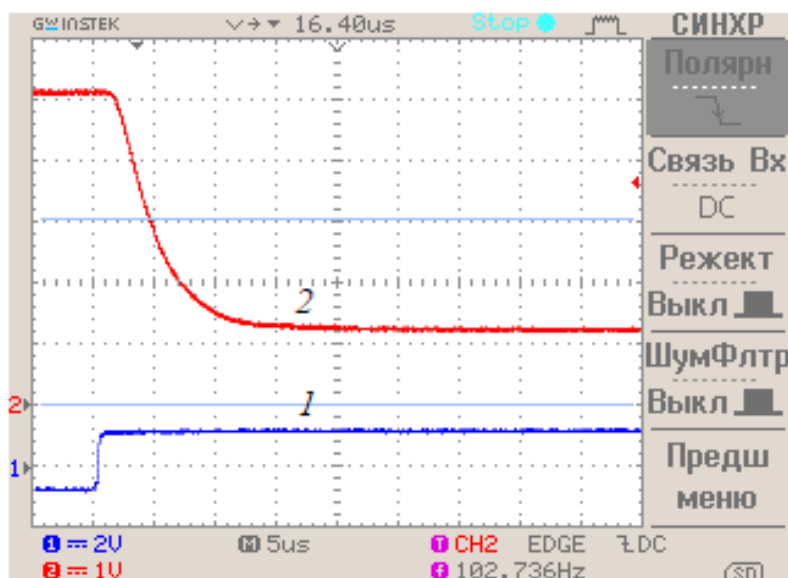
Далее была исследована пара ф.т. L3DP3C – ф.д. FYL-5013IRAB при сопротивлениях $R2$ равных 270 Ом (рисунок 48), 8,2 кОм (рисунок 49) 120 кОм (рисунок 50).



а)

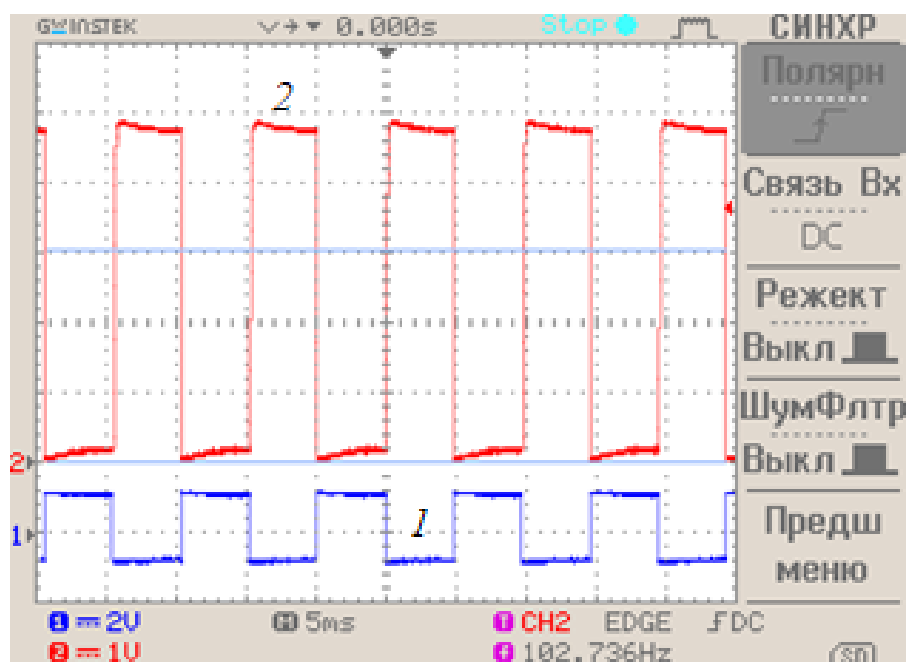


б)

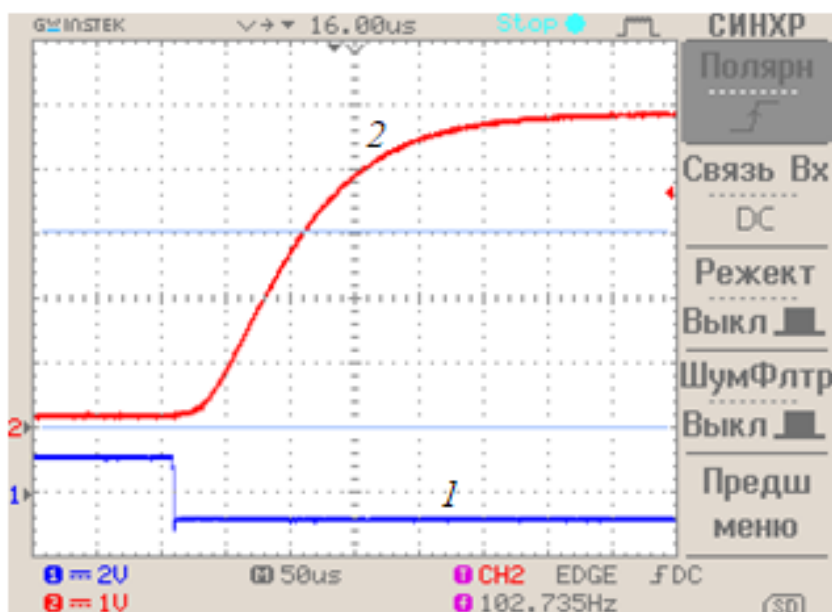


в)

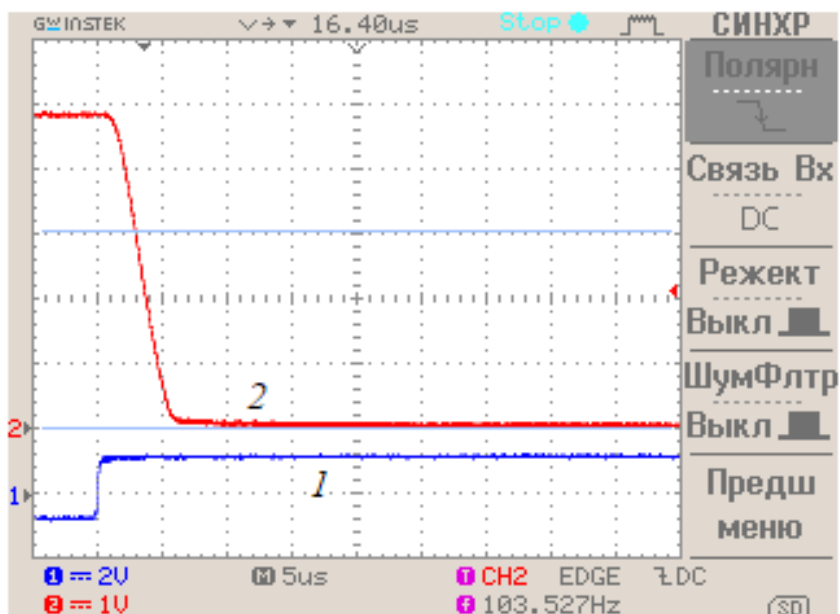
Рисунок 48 – Пара ф.т. L3DP3С – ф.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R_2 = 270$ Ом: а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 48.а; в) развернутый срез рис. 48.а



а)

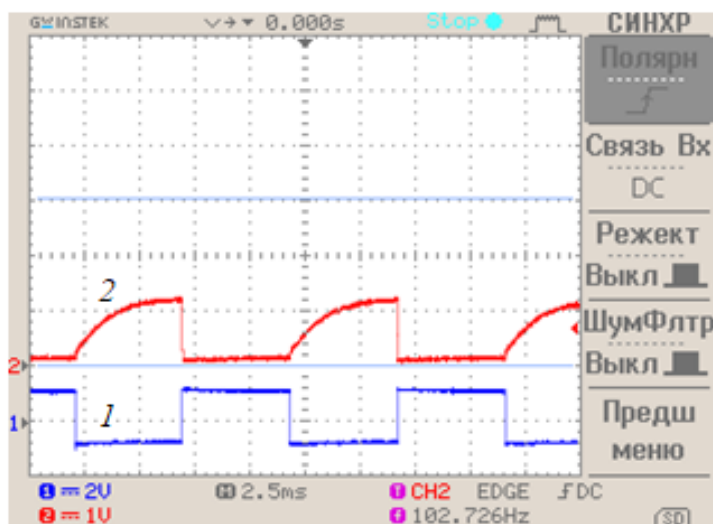


б)

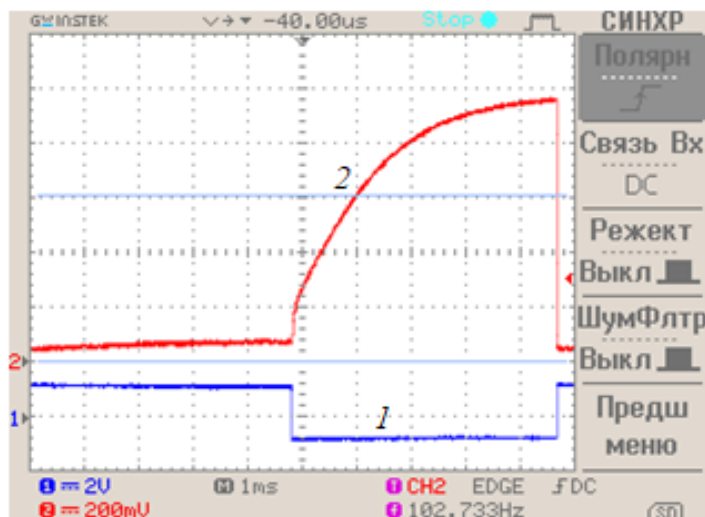


в)

Рисунок 49 – Пара ф.т. L3DP3С – ф.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R_2 = 8,2$ кОм: а) сигнал с генератора (1канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 49.а; в) развернутый срез рис. 49.а



а)

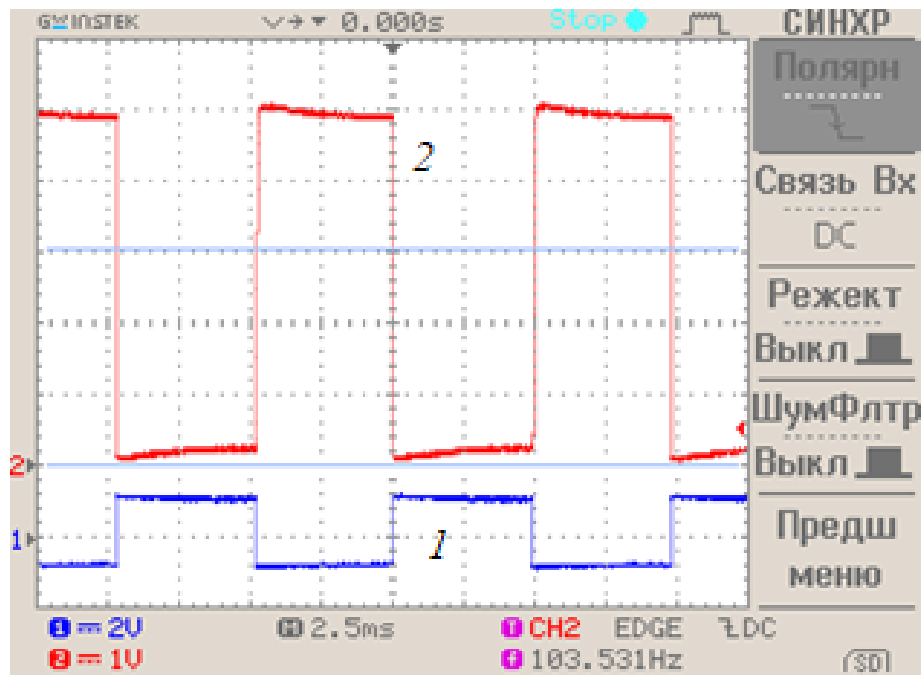


б)

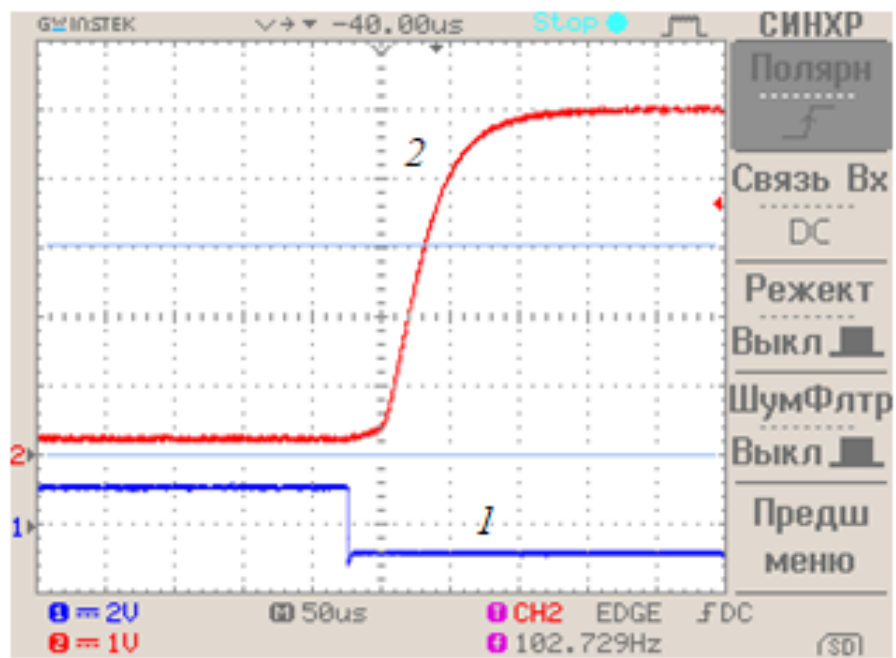
Рисунок 50 – Пара ф.т. L3DP3C – ф.д. FYL-5013IRAB при сопротивлении $R_2 = 120$ кОм: а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 50.а

Видно, что ф.т. L3DP3C практически аналогичен ф.т. BPW85B и имеет схожие характеристики при схожих условиях. Однако фронты у BPW85B немного уже, поэтому далее продолжим эксперименты с ним.

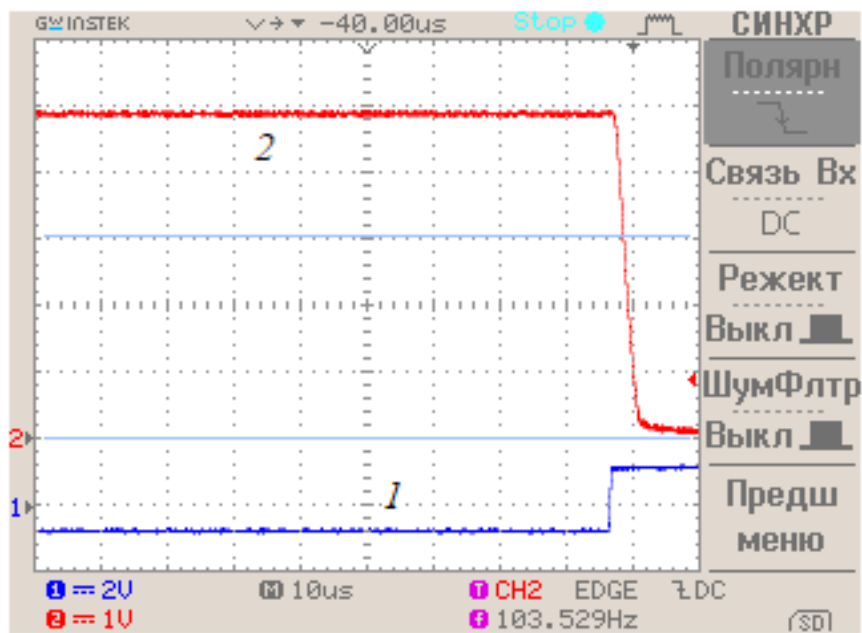
Следующим шагом стало изменение светодиодов и поиск лучшего из них. Были сняты результаты пар ф.т. BPW85B – с.д. TSAL4400 при $R_2 = 8,2$ кОм (рисунок 51) и $R_2 = 270$ Ом (рисунок 52). Также была исследована пара ф.т. BPW85B – с.д. L34F3C при $R_2 = 270$ Ом (рисунок 53) и $R_2 = 8,2$ кОм (рисунок 54).



а)

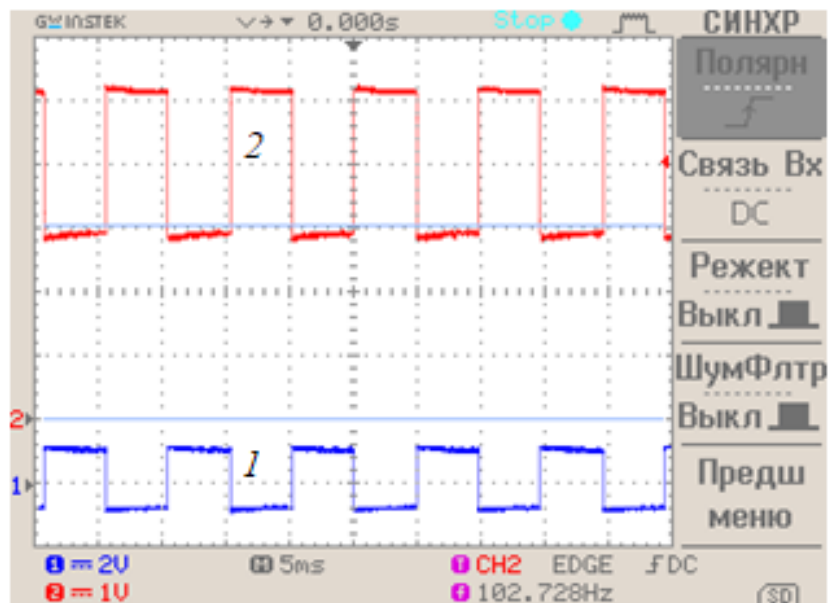


б)

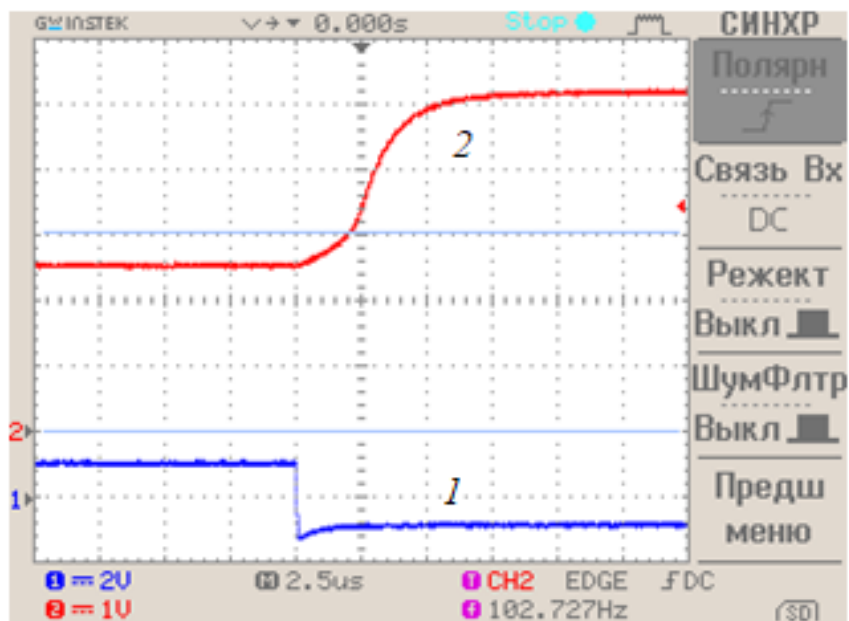


в)

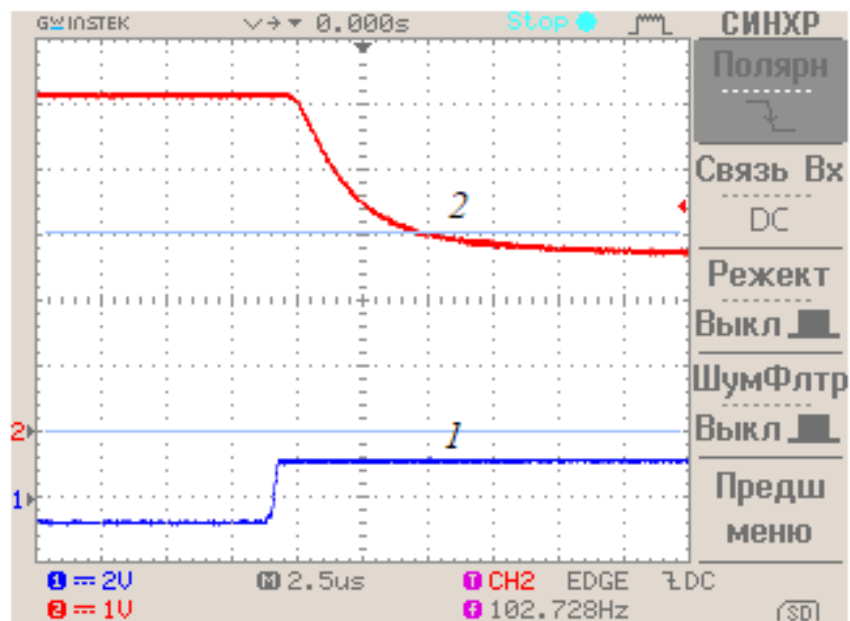
Рисунок 51 – Пара ф.т. BPW85B – с.д. TSAL4400 при сопротивлении $R_2 = 8,2 \text{ кОм}$:
 а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б)
 развернутый фронт рис. 51.а; в) развернутый срез рис. 51.а



а)

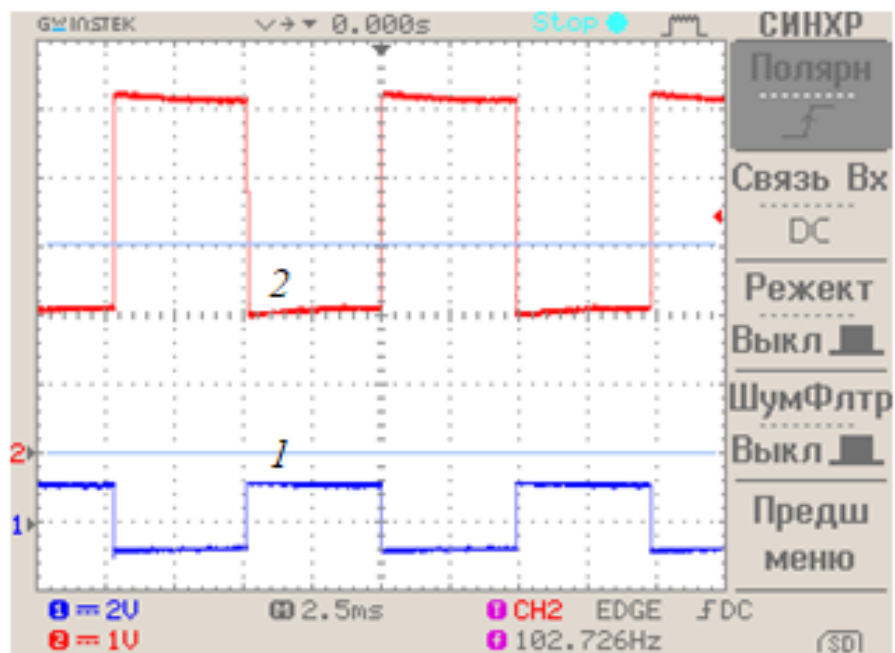


б)

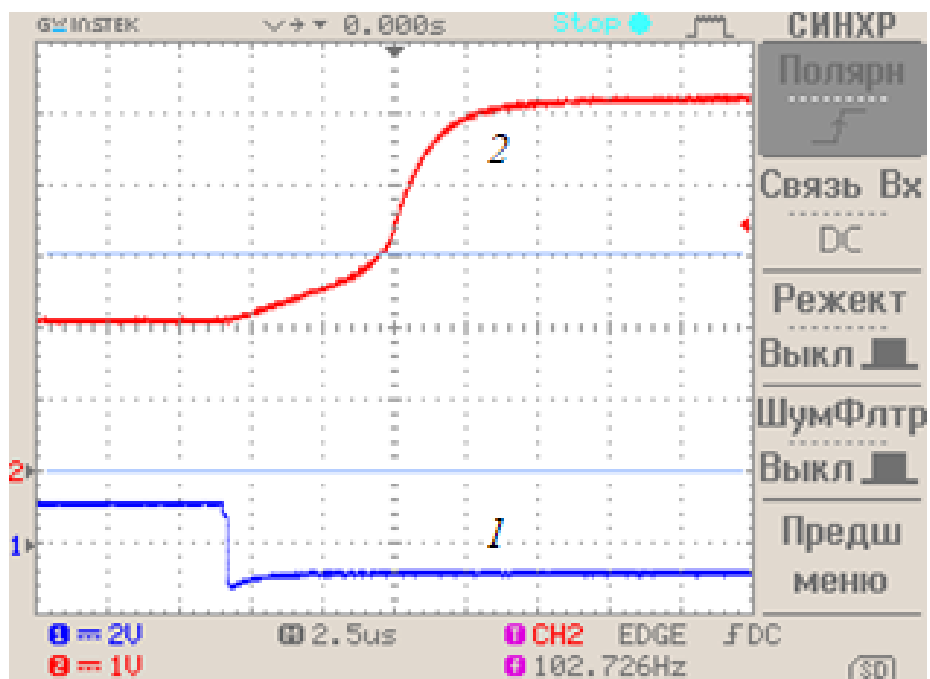


в)

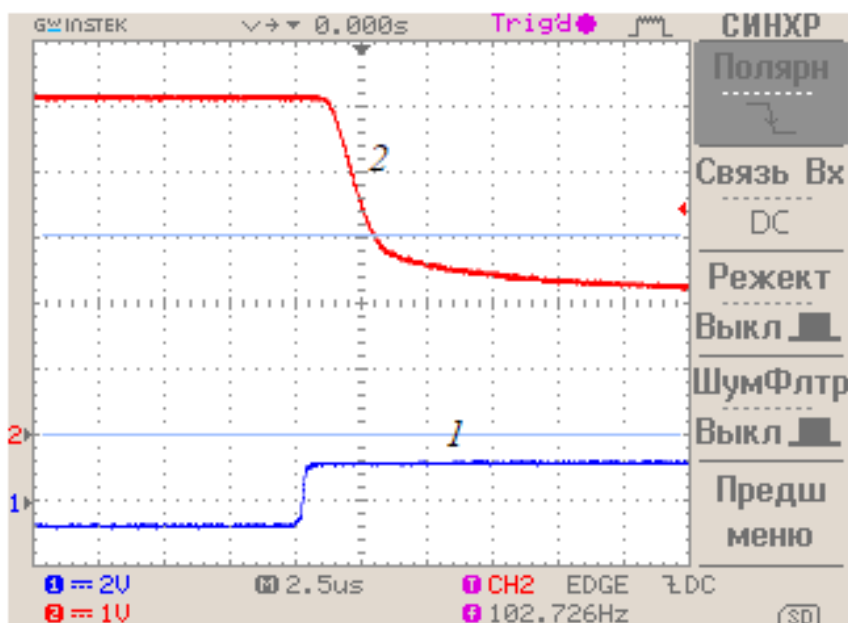
Рисунок 52 – Пара ф.т. BPW85B – с.д. TSAL4400 при сопротивлении $R_2 = 270 \text{ Ом}$:
 а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б)
 развернутый фронт рис. 52.а; в) развернутый срез рис. 52.а



а)

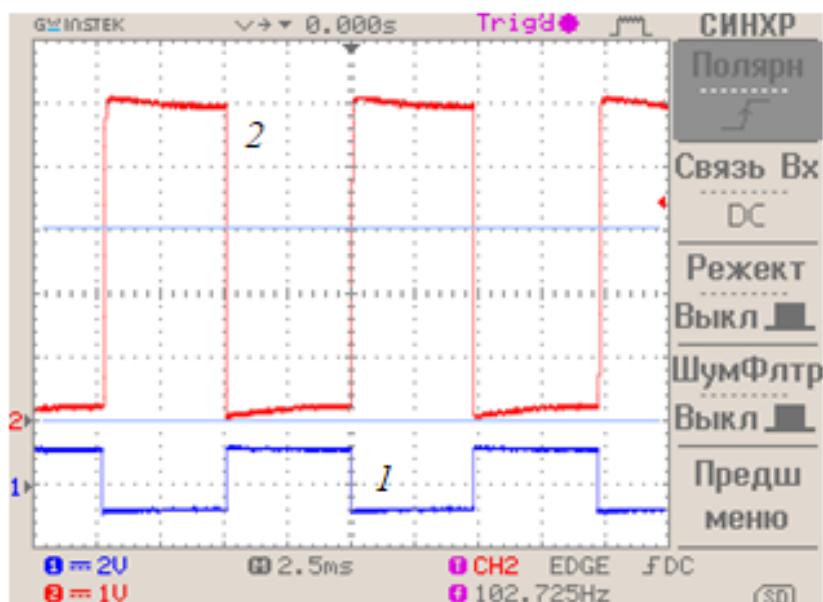


б)

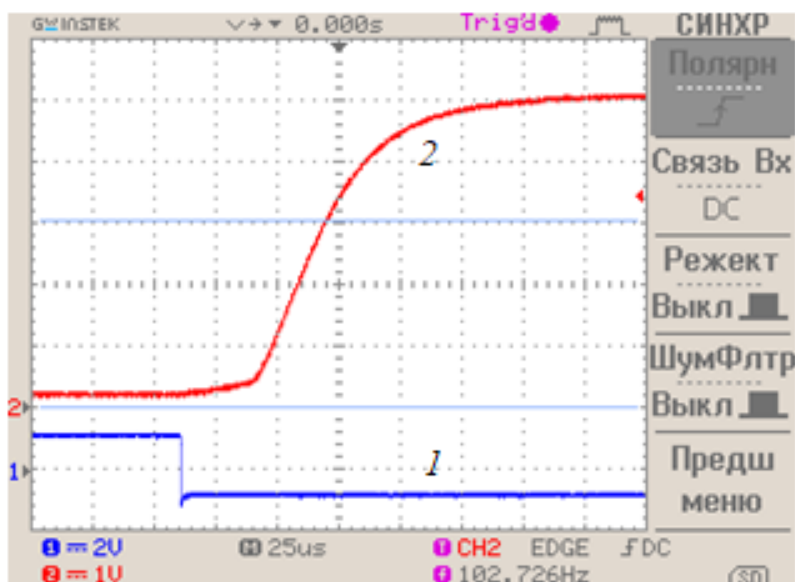


в)

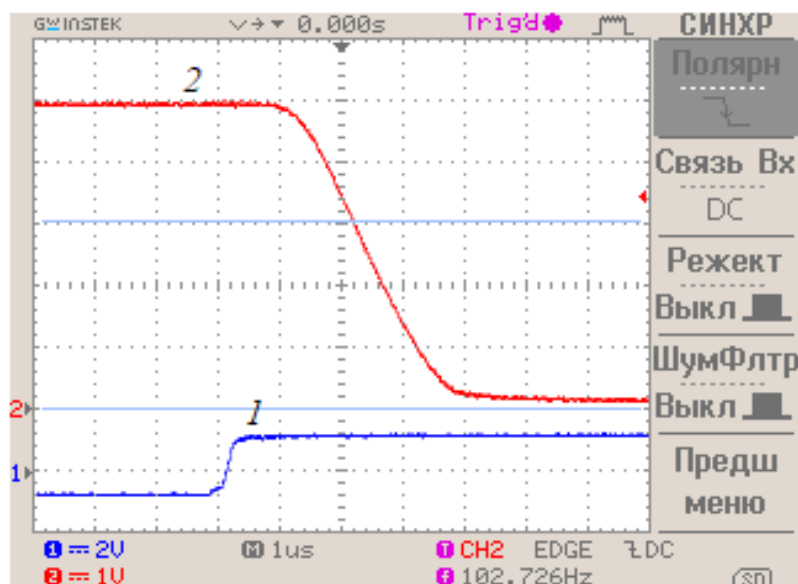
Рисунок 53 – Пара ф.т. ВРW85В – с.д. L34F3С при сопротивлении $R_2 = 270 \text{ Ом}$: а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 53.а; в) развернутый срез рис. 53.а



а)



б)



в)

Рисунок 54 – Пара ф.т. ВРW85В – с.д. L34F3С при сопротивлении $R2 = 8,2$ кОм: а) сигнал с генератора (1 канал), напряжение на фотоэлементе (2 канал); б) развернутый фронт рис. 54.а; в) развернутый срез рис. 54.а

Из данных рисунков видно, что фотодиоды практически не отличаются между собой.

Таким образом были сняты характеристики работы свето- и фотоприборов при различной их комбинации. В таблице 2 представлены данные результаты.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики при использовании пары светоизлучатель-фотоприемник при различных сочетаниях приборов.

Фото Свето		VD (BPW41N)				VT (BPW85B)				VT (L3DP3C)			
		tr, мкс	tc, мкс	Umin, В	Umax, В	tr, мкс	tc, мкс	Umin, В	Umax, В	tr, мкс	tc, мкс	Umin, В	Umax, В
VD1	R1	-	-	-	-	5	10	2,5	5	5	10	1,5	5
	R2	7,5	5	2,5	5	75	3	0	5	150	5	0	5
	R3	75	10	-0,5	5	-	-	0	2,5	-	-	0	1,5
VD2	R1	-	-	-	-	7,5	7,5	2,5	5	-	-	-	-
	R2	-	-	-	-	75	3	0	5	-	-	-	-
	R3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VD3	R1	-	-	-	-	5	7,5	2,5	5	-	-	-	-
	R2	-	-	-	-	75	3	0	5	-	-	-	-
	R3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание к Таблице 2: VD1 – FYL-5013IRAB; VD2 – TSA4400; VD3 – L34F3C. R1 – 270 Ом; R2 – 8,2 кОм; R3 – 120 кОм. tr – время нарастания фронта (мкс); tc – время среза (мкс); Umin – минимальное напряжение на фотоэлементе (В); Umax – максимальное напряжение на фотоэлементе (В).

Из таблицы 2 можно сделать несколько выводов:

- все ИК светодиоды обладают одинаковыми характеристиками (анализируя при постоянном BPW85B)

- фототранзисторы имеют одинаковые рабочие характеристики напряжений при одинаковых условиях, однако BPW85B имеет меньшее суммарное значение фронтов (78мкс)

- фотодиод, имеет практически одинаковую длительность фронтов с BPW85B при одинаковом рабочем диапазоне напряжений, однако он выдает малый ток, который необходимо усиливать. В фототранзисторах такой проблемы нет, т.к. они уже усиливают сигнал.

Основываясь на этом заключении было решено выбрать рабочую пару светодиод FYL-5013IRAB и фототранзистор BPW85B, как наиболее оптимальное.

3.4 Эксперименты с системой управления

После сборки схемы была проведена отладка и проведены испытания. На рисунке 55 изображена осциллограмма напряжений первичной и вторичной сторон трансформатора. Здесь видно, что напряжение на вторичной стороне подсакивает, когда напряжение на первичной стороне падает до нуля. Это подтверждает обратногоходовой характер схемы.

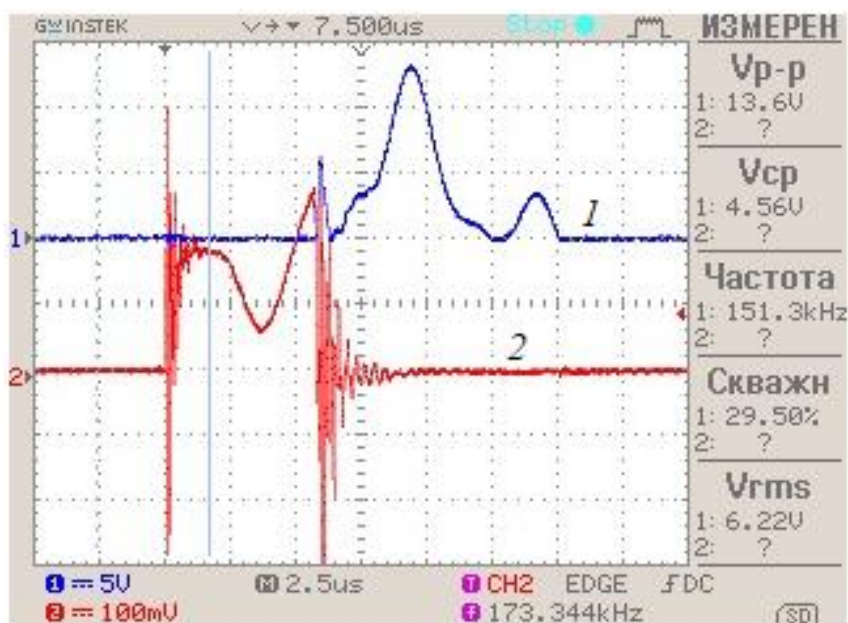


Рисунок 55 – Осциллограммы напряжений первичной и вторичной сторон трансформатора (1канал – напряжение на вторичной стороне, 2 канал – напряжение стока-истока транзистора на Rшунта = 0,39 Ом)

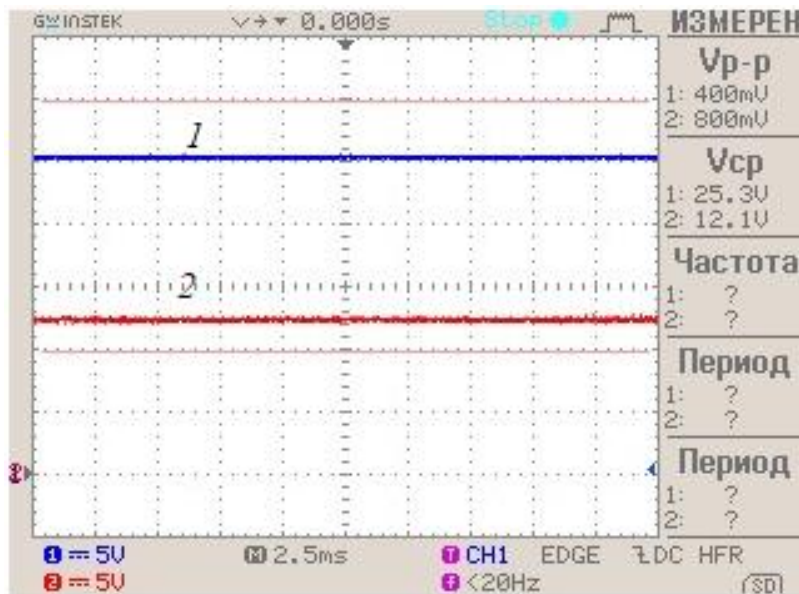
Следующим этапом стала подборка значения ШИМ, которое необходимо для подачи на схему. Данное значение опытным способом было определено как 40/1024.

Важными факторами при определении этого значения были:

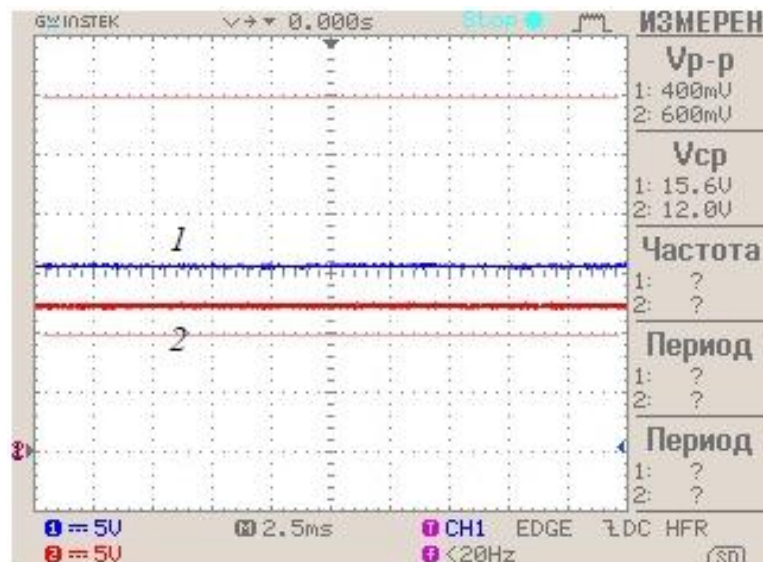
- 1) условие, что напряжение до стабилизатора должно быть в промежутке 14...40 В (по документации на стабилизатор);

2) необходимо учитывать то, что напряжение до стабилизатора обратно зависит от потребления микросхемой TL494 и ее обвязкой.

Второе условие означает, что при отсутствии нагрузки напряжение до стабилизатора будет максимальным. Проведя эксперименты было установлено, что минимальная нагрузка TL494 эквивалентна 1,3 кОм, максимальная – 360 Ом. На рисунке 56 представлены осциллограммы напряжений до стабилизации при подстановке эквивалентных сопротивлений.



а)



б)

Рисунок 56 – Напряжение до стабилизации (1 канал) и после стабилизации (2 канал): а) при эквивалентном сопротивлении 1,3 кОм; а) при эквивалентном сопротивлении 360 Ом

Таким образом данные осциллограммы показывают, что напряжения находятся в рабочих промежутках входного напряжения стабилизации и не превышает 26 В и схема работоспособна.

4 Технологический раздел

4.1 Работа над разработкой платы в программе DipTrase

После определения схемотехники устройства и выбора компонентов установкой следующим шагом стал вопрос о разработке печатной платы. Для этой цели была выбрана программа DipTrase, т.к. она проста в использовании. Данная программа позволяет создать принципиальную схему и преобразовать ее в плату. На рисунках 57-60 представлены участки принципиальной схемы устройства разработанной в DipTrase.

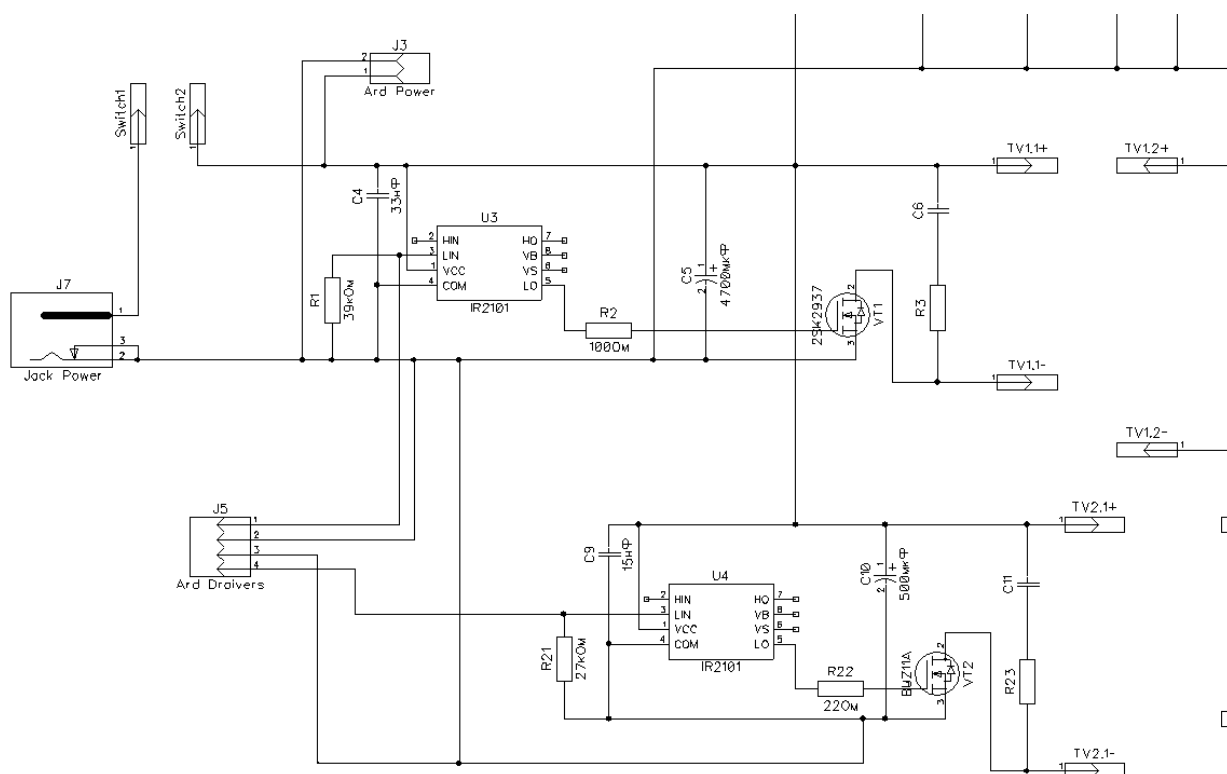


Рисунок 57 – Схемы управления трансформаторными цепями (верхняя – задает величину выходного высоковольтного напряжения, нижняя – осуществляет гальванически развязанное питание измерительной цепи высоковольтного напряжения)

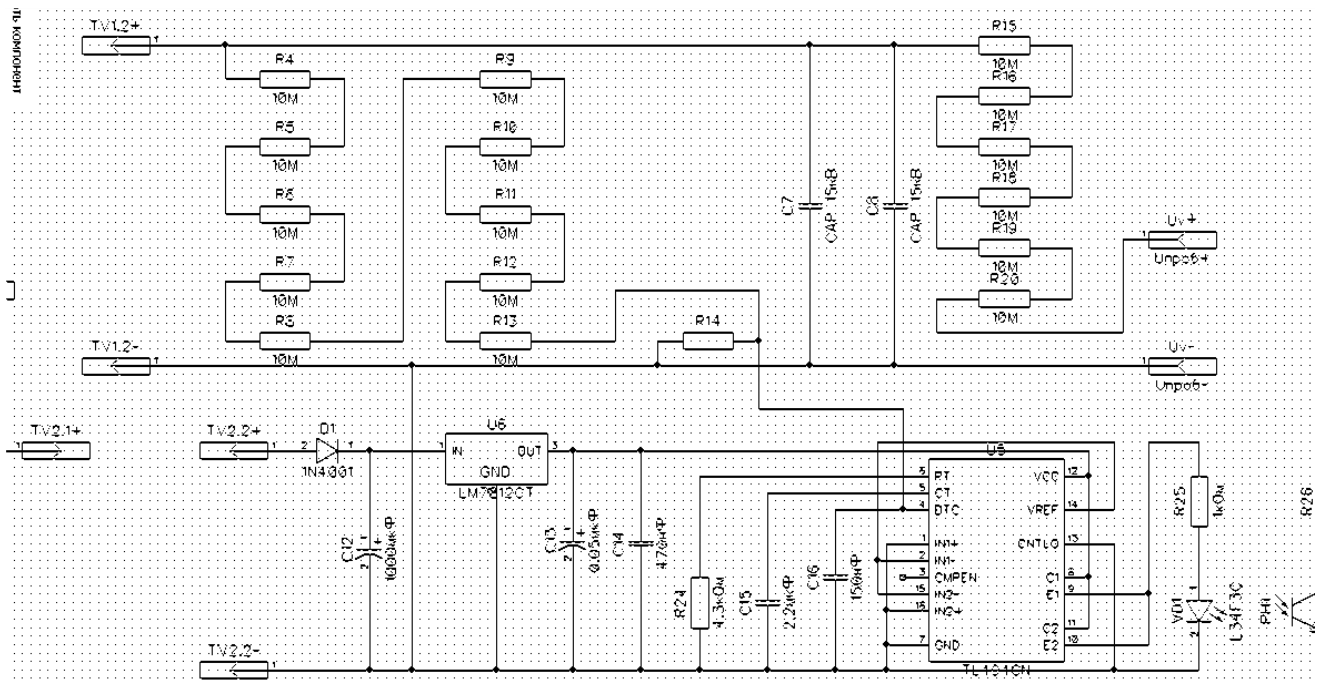


Рисунок 58 – Схемы вторичных сторон трансформаторных цепей (верхнее – схема пробойной цепи, нижняя – схема измерения высоковольтного напряжения)

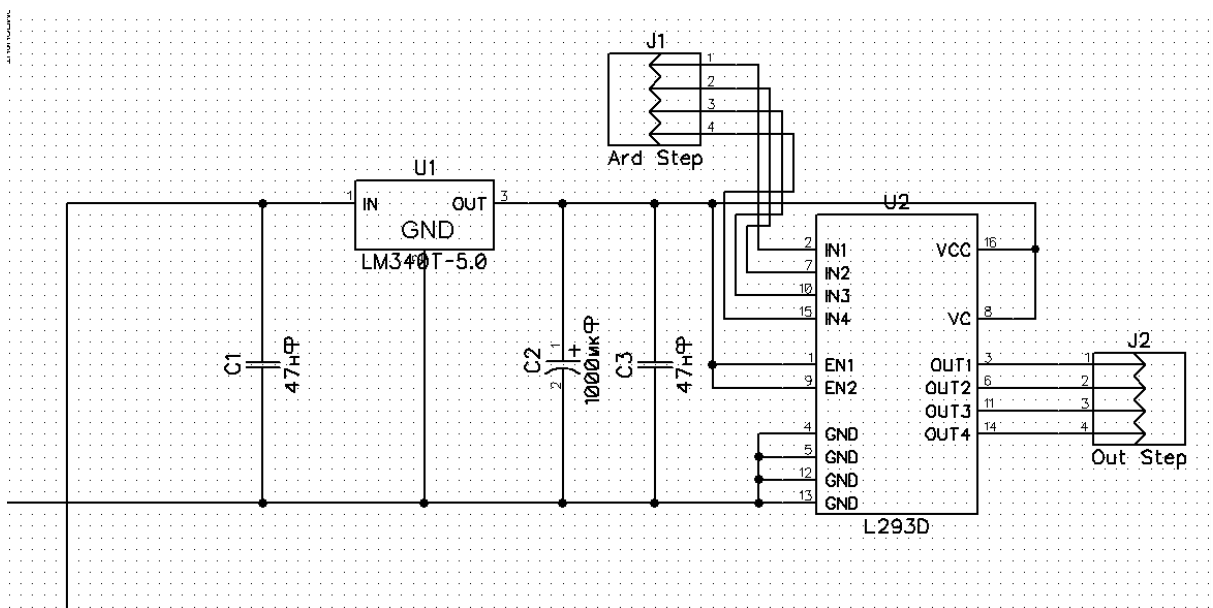


Рисунок 59 – Схема управления шаговым двигателем

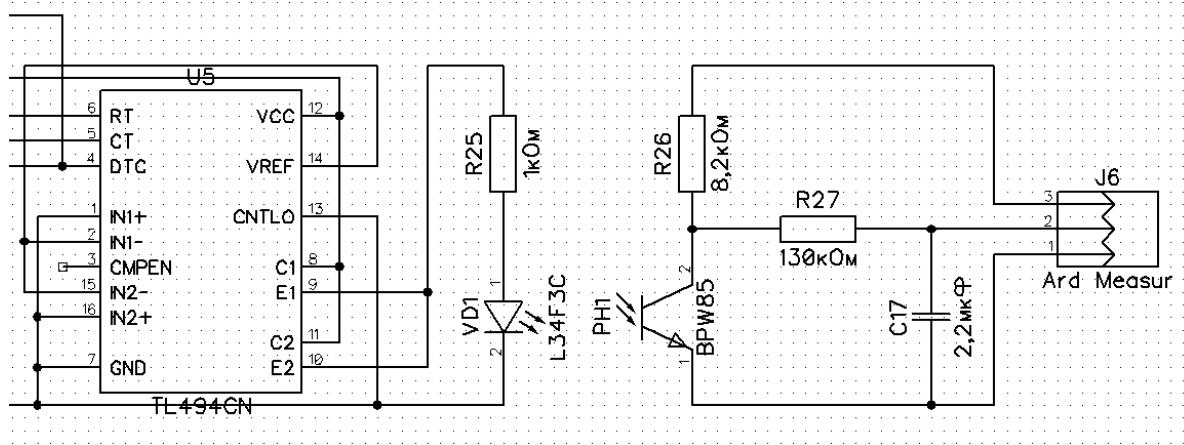


Рисунок 60 – Схема гальваноразвязки, предающей информацию о величине пробойного напряжения на контроллер

После построения принципиальной схемы была проведена трассировка печатной платы. На рисунке 61 изображен готовый вариант разводки.

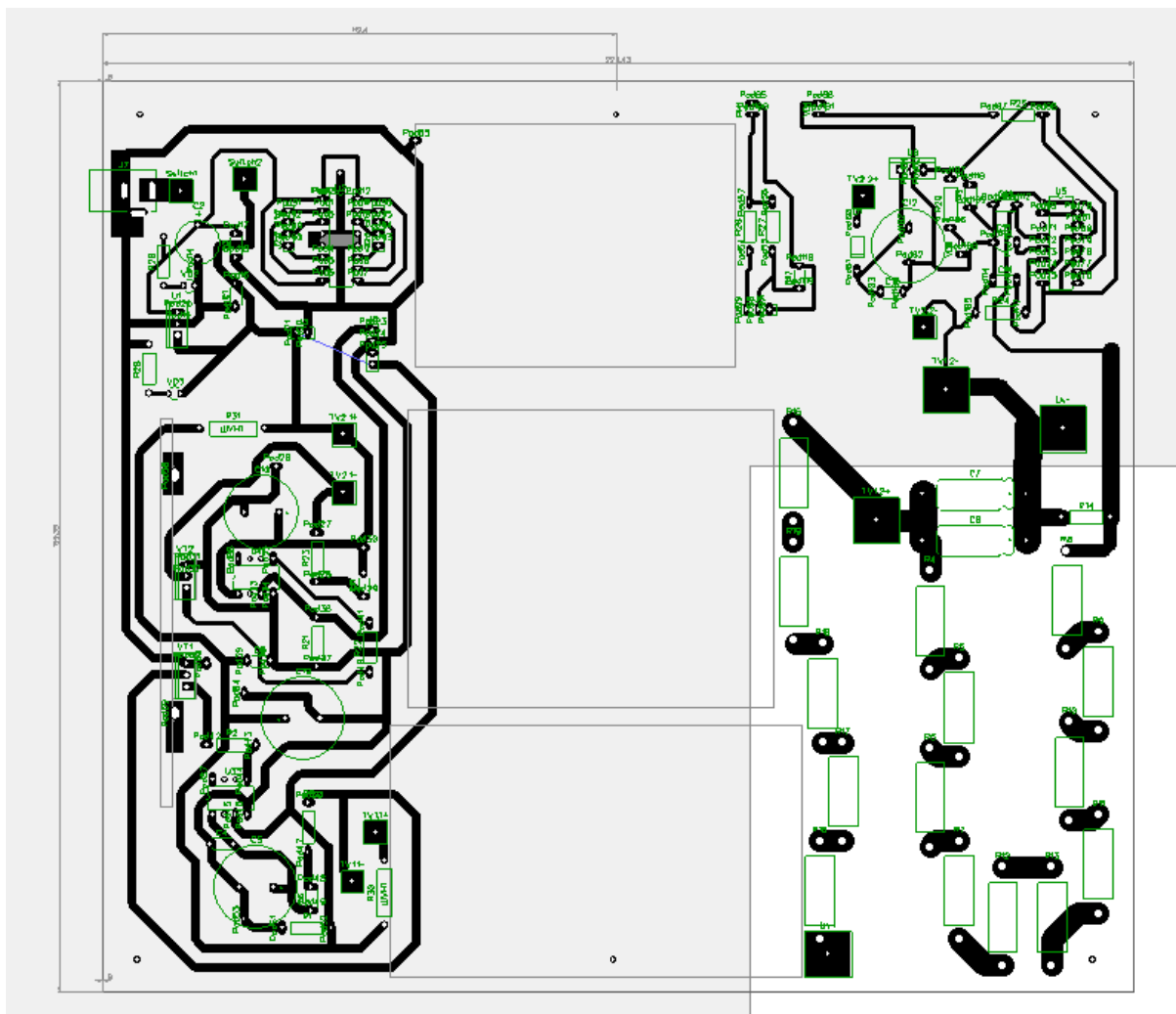


Рисунок 61 – Разводка печатной платы в программной среде DipTrase

4.2 Травление печатной платы и пайка элементов

При самостоятельном изготовлении печатной платы наиболее распространены два метода: с использованием пленочного фоторезиста и методом лазерно-утюжного травления (ЛУТ) [28-31].

4.2.1 Технология изготовления печатной платы с использованием плёночного фоторезиста.

Обработка поверхности абразивом (губка с грубой стороной и средство для мытья посуды, например, пемолукс). Обработку производить пока поверхность не начнёт блестеть.

После обработки абразивом поверхность обезжиривается спиртом, для лучшего прилегания фоторезиста к поверхности платы.

Дальше наносится фоторезист. Перед нанесением нужно удалить защитную плёнку, имеющую матовый оттенок. Удаление плёнки происходит при помощи скотча, который приклеивается на уголок фоторезиста с обеих сторон. Дальше скотч постепенно снимается вместе с плёнкой. Отогнув немного защитную плёнку, фоторезист прикладывается к краю платы и разглаживается сухой тряпочкой, выдавливая воздух к краям. После, защитная плёнка потихоньку снимается дальше, при этом фоторезист нужно продолжать разглаживать, чтобы на поверхности не образовывались пузыри. Если после нанесения фоторезиста на плату образовались пузыри, то их можно убрать проколов иголкой и разгладив тряпочкой. Фоторезист выступающий за края платы обрезается лезвием. (На фоторезисте не должны оставаться отпечатки пальцев).

Когда фоторезист нанесён на поверхность платы, его необходимо закрепить при помощи термообработки. Для этого нужно через чистую бумагу прогладить её утюгом (около 30-40 секунд).

Изготовить фотошаблон, печать нужно проводить на специальной пленке для лазерных принтеров. Нужно распечатать два шаблона. Шаблон должен быть инвертированный, т.е. дорожки светлые, а вытравливаемые места темными, при печати сделать большую контрастность печати.

При печати сначала прогнать 2 листа бумаги, чтобы произошел нагрев ролика в лазерном принтере, далее не давая остывать шаблон для печатной платы. Наложить шаблоны и склеить их по бокам скотчем или суперклеем. **ОБЯЗАТЕЛЬНО ОПРЕДЕЛИТЬ КАКОЙ СТОРОНОЙ КЛАСТЬ ШАБЛОН НА**

СТЕКЛО УФ ЗАСВЕТКИ, и написать на свободной поверхности шаблона ВЕРХ например. Иначе может получиться зеркальная печатная плата негодная для пайки.

Дальше происходит засветка через шаблон в ультрафиолете (около 20 минут). После засветки обязательно повторяется термообработка утюгом (20-30 сек). Если про неё забыть все дорожки ОТЛЕТЯТ ПРИ ПРОЯВКЕ!!!.

Проявка происходит в растворе 4% кальцинированной соды. Перед помещением в раствор необходимо при помощи скотча ОТДЕЛИТЬ ВТОРУЮ защитную плёнку. Выдержка в растворе длится около 5 минут. После, плата промывается под струёй воды. Если лишний фоторезист отошёл не весь, плата опять помещается в раствор и выдерживается 1-2 минуты и дальше снова происходит промывка платы. Процесс продолжать пока не смывается весь лишний фоторезист. (Тереть поверхность нельзя, только в крайнем случае, если остатки фоторезиста остались между дорожками, можно его удалить, еле касаясь, мягкой губкой).

Травление платы происходит в 30% растворе хлорного железа (при комнатной, при нагреве травление не делали, надо проверить стойкость дорожек)

Удаление фоторезиста можно производить при помощи 5-20% водном растворе гидроксида, гидроксида натрия (можно воспользоваться средством для прочистки труб «Крот» - просто налить на поверхность и выждать минут 5-10 далее дорожки сами слезут, и промыть их водой).

4.2.2 Метод лазерно-утюжного травления (ЛУТ)

Важным этапом работы стало нанесение рисунка на стеклотекстолитовую плату и травление дорожек. В данной работе был использован метод лазерно-утюжного травления (ЛУТ). Методика данного способа травления состоит из нескольких этапов:

- Распечатка рисунка на глянцевой бумаге;
- Подготовка платы - очистка от грязи (порошок) и жира (ацетон);
- Фиксирование рисунка на плате;
- Прогрев рисунка с платой утюгом на максимальной мощности 20 минут;
- Удаление бумаги с поверхности платы (можно вымочить в воде) не повредив приварившиеся дорожки;

- Развести травильный раствор – хлорное железо в воде в отношении 1:3 (на 1 литр воды 300 грамм железа);
- Положить плату в раствор и помешивая проследить, когда медь удалится с платы
- Промыть плату проточной водой и удалить рисунок с дорожек ацетоном

В результате выполнения данных этапов была получена печатная плата установки (рисунок 62)

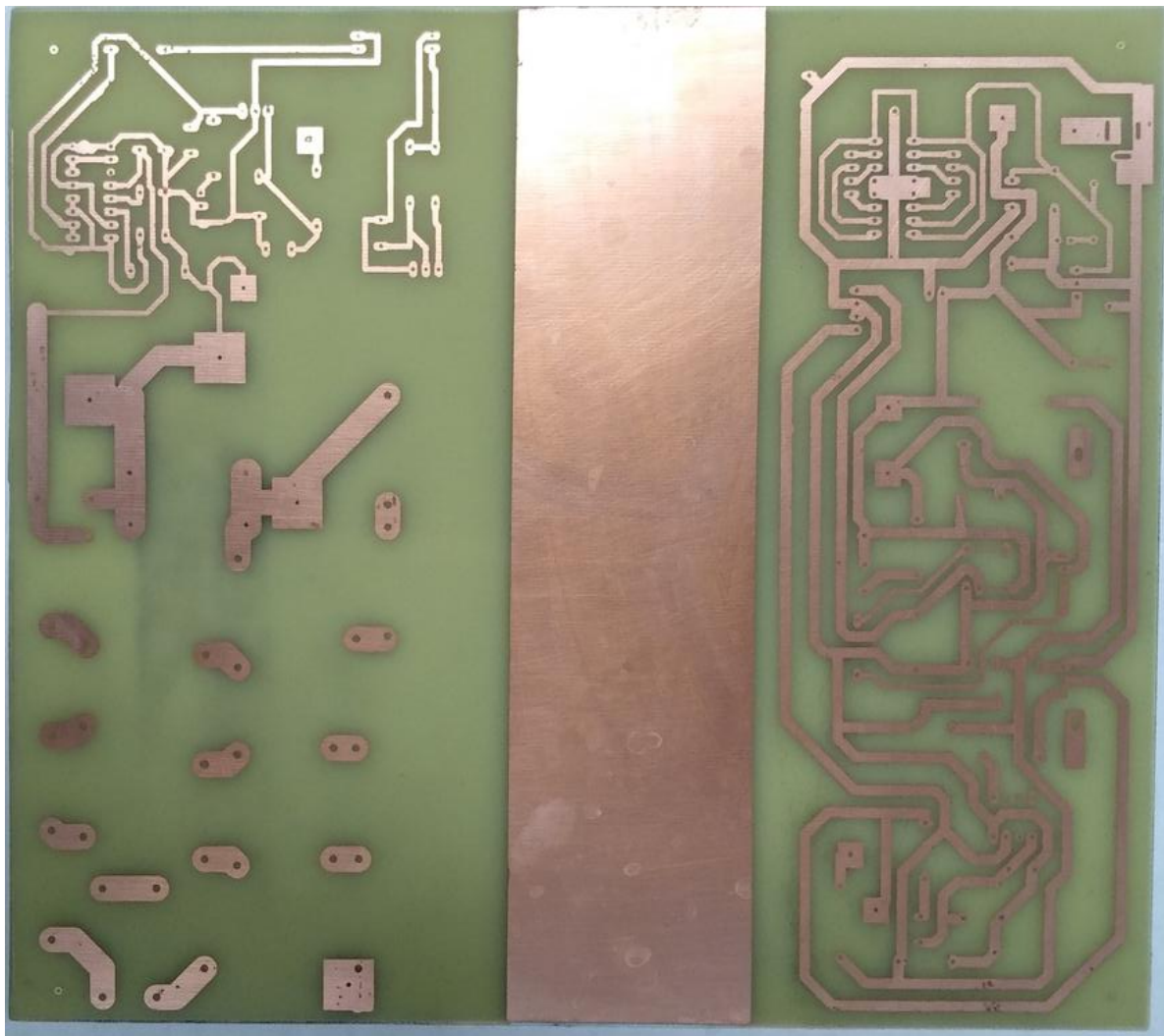


Рисунок 62 – Печатная плата установки

Затем для защиты дорожек от окисления они были покрыты оловом. После чего последовала пайка элементов на плату (рисунок 63)

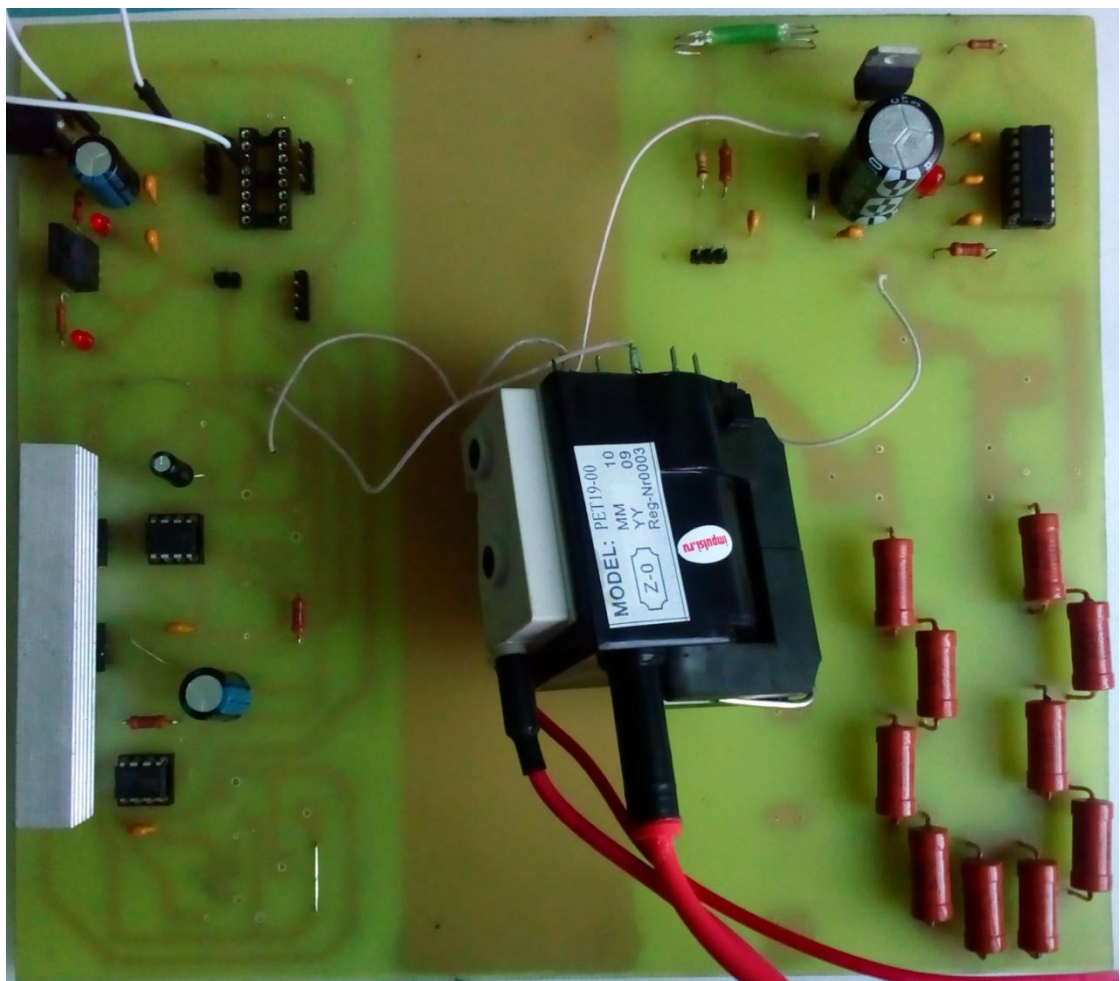


Рисунок 63 – Плата с припаянными элементами

Таким образом, был собран в одной плате как система управления, так и силовая часть установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации решалась задача создания системы для исследования пробойных свойств воздушной среды, что подразумевало под собой решение целого спектра задач. По мере выполнения работы были получены следующие результаты:

1. собрана и отлажена обратноходовая схема высоковольтного преобразователя позволяет получать на вторичной стороне напряжение порядка 10 кВ, что достаточно для пробития воздушного зазора размером 8 мм;

2. при помощи программной платформы Arduino написан код, позволяющий принимать входные данные с пульта, осуществлять управление силовой частью посредством задания ширины импульса, а также принимать выходные данные и отображать их на средствах вывода;

3. разработано схемотехническое решение механической части устройства, включающей в себя шаговый двигатель с системой слежения его положения;

4. разработана система измерения высоковольтного напряжения устройства посредством оптоканала, которая обладает собственным питанием, развязанным с силовой частью.

Перечисленные выше результаты позволили получить рабочую систему высоковольтной установки с регулируемыми дистанционно параметрами, малыми габаритами (печатная плата со всеми элементами и система пробоя занимают размеры 30x20x25 и весят 3 кг) и общей стоимостью элементной базы 15000 рублей.

Таким образом, в ходе работы была достигнута цель разработки нового схемного решения системы для исследования пробойных свойств воздушной среды, отличающееся от аналогов меньшими габаритами и себестоимостью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерительные приборы и испытательное оборудование для энергетики [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.electronpribor.ru/> – Заглавие с экрана.– (Дата обращения: 14.04.2019).
2. Электрический ток в газах. Типы самостоятельного разряда. Плазма. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eduspb.com/node/1771> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 29.04.2019).
3. Семенов, Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-3, 2001. – 327 с.
4. Силовая электроника: приборы, применение, управление : Справочное пособие : пер. с англ. / Б. Уильямс . – М. : Энергоатомиздат, 1993 . – 239 с.
5. Позднов, М.В. Основы преобразовательной техники: Методические указания по проведению курсового проектирования/ М.В.Позднов. – Тольятти: ТГУ, 2012. – 32 с.
6. Обратноходовый импульсный преобразователь напряжения, источник питания. Преимущества, недостатки, применение. Принцип работы. Примеры схем [Электронный ресурс]. – URL: <http://gyrator.ru/power-obratnohodovyi> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 24.05.2019).
7. Прямоходовый импульсный стабилизированный преобразователь напряжения, источник питания. Преимущества, недостатки. Принцип работы. Примеры схем. [Электронный ресурс]. – URL: <http://gyrator.ru/power-pryamohodovyi> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.05.2019).
8. Что такое Arduino. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amperka.ru/page/what-is-arduino> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.05.2019).
9. На что способен Raspberry Pi 3 [Электронный ресурс] – URL: <https://ichip.ru/na-chto-sposoben-raspberry-pi-3.html> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.05.2019).
10. J. T. Younker, T. Ribaric. Beyond open source software: solving common library problems using the open source hardware arduino platform. 2013. Available at: <https://journal.lib.uoguelph.ca/index.php/perj/article/view/2497/2872#.Wu3u6tSFNdH> (accessed 6 May 2019)

11. The documentation for the High and Low Driver IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF). Available at:

<http://www.infineon.com/dgdl/ir2101.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7a755166c>
(accessed 18 May 2019)

12. The documentation for the transistor, Power MOSFET IRFZ44/SiHFZ44 Available at: <http://www.vishay.com/docs/91291/91291.pdf> (accessed 14 April 2017)

13. Документация на строчный трансформатор РЕТ-22-02. [Электронный ресурс]. – URL: [http://micronika.ru/docs/transformer/pet-22-02\[1\].pdf](http://micronika.ru/docs/transformer/pet-22-02[1].pdf) – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.04.2019).

14. Принцип работы ИК пульта управления. [Электронный ресурс]. – Официальный сайт компании Элекс. URL: http://led-displays.ru/ir_remote_theory.html – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 25.04.2019).

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

16. Подключение дисплея LCD 1602 к Arduino по i2c/ИС [Электронный ресурс] – URL: <https://arduino-master.ru/datchiki-arduino/lcd-i2c-arduino-displey-ekran/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 22.05.2018).

17. Контроллер шагового двигателя [Электронный ресурс] // Официальный сайт KAZUS.RU. Режим доступа: <http://kazus.ru/shemes/showpage/0/843/1.html> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.06.2018).

18. 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. Available at: http://www.ermt.net/docs/papers/Volume_2/issue12_December2013/V2N12-123.pdf
(accessed 18 May 2019)

19. Controlling stepper/DC/Servo motors with Arduino/NI DAQ/PLC. Available at: <http://bioeng.nus.edu.sg/mm/wp-content/uploads/2012/07/MotorControl-1japwem.pdf>
(accessed 18 May 2019)

20. R.Harisudhan, M.Ganesh Kumar, A.Udhaya Prakash, P. Sathya. Stepper motor control using arduino atmega - 328 microcontroller. 2015. Available at: <http://www.ijssrd.com/articles/IJSSRDV2I12401.pdf> (accessed 5 May 2019)
21. 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. IJSSRD - International Journal for Scientific Research & Development, Vol. 4, Issue 02, 2016. Available at: <http://www.ijssrd.com/articles/IJSSRDV4I20008.pdf> (accessed 6 May 2019)
22. Pavel Zaskalicky. Dynamic Model of Reluctance Step Motor. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2005, 4(1):18-22. Available at: <https://doaj.org/article/9cce5c6021df4db4ad0a1a663be1752a> (accessed 18 May 2019)
23. 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/> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 9.03.2019).
24. The documentation for the TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf> (accessed 18 April 2017)
25. G. Recktenwald. Basic pulse width modulation. 2011. Available at: http://web.cecs.pdx.edu/~gerry/class/EAS199A/topics/pdf/PWM_output_Arduino.pdf (accessed 9 April 2017)
26. Travis Meade. Pulse width modulation using an Arduino. 2014. Available at: https://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/fall14/group07/PDFs/PWM_Application_Note.pdf (accessed 15 April 2017).
27. Урок 37. Широтно-импульсная модуляция в Ардуино [Электронный ресурс] // Официальный сайт MY PRACTIC. – URL: <http://mypractic.ru/urok-37-shirotno-impulsnaya-modulyaciya-v-arduino.html>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 24.02.2019).
28. Печатные платы – изготовление в домашних условиях своими руками [Электронный ресурс]. – URL: <http://ydoma.info/tehnologii-izgotovlenie-pechatnyh-plat.html> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 24.05.2017).
29. Ильин В.А. Технология изготовления печатных плат. / В.А. Ильин — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984.— 77 с.

30. С. Маркин. Как травить платы. // Химия и Жизнь. – 1990. – №7. – С. 76-77

31. Верховцев О.Г., Лютов К.П.. Практические советы мастеру-любителю: Электротехника. Электроника. Материалы и их обработка. Практическое руководство. Издание второе, переработанное и дополненное. / О.Г.Верховцев, К.П.Лютов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. — 200 с., ил.

