

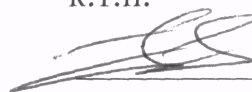
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники
Кафедра электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

к.т.н.



Н. Н. Беспалов

«19» 06 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**Разработка программируемого источника тока для испытания силовых
полупроводниковых приборов**

Автор бакалаврской работы АВЛ 19.06.2019 А. В. Алямкин

Обозначение бакалаврской работы БР – 02069964 – 11.03.04 – 01 – 19

Направление подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Руководитель работы  19.06.2019 М. В. Ильин

Нормоконтролер  19.06.2019 А. А. Шестёркина

Саранск

2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА»
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И СВЕТОТЕХНИКИ
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОНИКИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой,

к.т.н., доцент



Н. Н. Беспалов

« 12 » 11 2019 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Студент Алямкин Александр Владимирович

1 Тема: Разработка программируемого источника тока для испытания силовых полупроводниковых приборов.

Утверждена приказом по МордГУ №9507-с от 12.11.2018

2 Срок представления работы к защите: __ июня 2019 г.

3 Исходные данные для выпускной квалификационной работы.

3.1 Разработать программируемый источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов.

3.2 Источник тока должен осуществлять подачу на испытуемый полупроводниковый прибор в состоянии низкой проводимости последовательность импульсов тока со следующими параметрами:

- форма выходного тока – импульсная;
- амплитуда импульсов выходного тока до 400 А;

- период следования импульсов задаётся программным способом;
- форма импульсов задаётся массивом временных точек, формирование которого осуществляется на компьютере;
- управляющий массив временных точек должен храниться в памяти контроллера силового блока;
- передача массива данных из компьютера в контроллер силового блока должна осуществляться через Ethernet локальную сеть по протоколу TCP/IP;
- преобразование цифровых данных управляющего массива, предназначенного для управления источником тока, в аналоговый сигнал осуществить с помощью ЦАП;
- питание силового блока от промышленной сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

4 Содержание выпускной квалификационной работы.

Реферат

Введение

1 Обзор технических решений, применяемых в промышленных источниках тока.

1.1 Обзор схемотехнических решений источников тока.

1.2 Обзор схемотехнических решений преобразователей тока.

1.3 Генераторы мощных импульсов с применением ЦАП.

2 Разработка функциональной схемы аппаратной части источника тока.

2.1 Технические требования

2.2 Разработка алгоритма функционирования источника тока и функциональной схемы.

3 Разработка электрической принципиальной схемы источника тока.

3.1 Разработка электрической принципиальной схемы силовой части источника тока.

3.2 Расчёт трансформатора.

3.3 Расчёт компонентов источника тока.

3.4 Расчёт инвертирующего усилителя.

3.5 Расчёт мостового преобразователя.

3.6 Разработка электрической принципиальной схемы системы управления силовой части.

3.7 Расчёт выпрямителя.

3.8. Расчёт фильтра.

3.9 Разработка электрической принципиальной схемы внутреннего источника питания источника тока.

4 Разработка и исследование модели источника тока в программе моделирования Multisim.

4.1 Разработка модели силовой части источника тока.

4.2 Исследование модели источника тока.

5 Разработка программы управляющего контроллера.

5.1 Разработка алгоритма программного обеспечения контроллера.

5.2 Разработка кода блока обмена данными между контроллером и компьютером.

5.3 Разработка кода для управления цифро-аналоговым преобразователем.

6 Разработка программной части для компьютера.

6.1 Разработка кода для формирования таблицы данных, описывающей генерируемые импульсы.

6.2 Разработка кода обмена данными между компьютером и контроллером.

7 Разработка печатной платы системы управления силовой части источника тока.

Заключение.

Список использованных источников

Приложение 1

1 Алгоритм программы управляющего контроллера.

2 Алгоритм программы для компьютера.

Приложение 2 Перечень графического материала

1 Электрические принципиальные схемы.

2 Перечени элементов.

3 Чертежи печатных плат.

4 Сборочные чертежи.

5 Монтажная схема.

6 Перечень элементов монтажной схемы.

7 Чертёж корпуса устройства.

Руководитель работы




М. В. Ильин

Задание принял к исполнению

А. В. Алямкин

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит: 112 страниц, 52 рисунка, 7 использованных источников, 13 приложений.





ИСТОЧНИК ТОКА, ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ТРАНСФОРМАТОР, МУЛЬТИВИБРАТОР, ДРАЙВЕР МОСТА, ВЫПРЯМИТЕЛЬ СО СРЕДНЕЙ ТОЧКОЙ, ARDUINO UNO, LABVIEW.

Объектом разработки является программируемый источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов.

Цель бакалаврской работы: разработка источника тока для испытания силовых полупроводниковых приборов.

Методы разработки: теоретический расчет источника тока, разработка электрической принципиальной схемы в среде Splan, разводка печатной платы в программной среде Sprint Layout, написание программы в среде программирования LabView и Arduino IDE.

Полученные результаты: разработана принципиальная схема источника тока для испытания силовых полупроводниковых приборов, проведен теоретический расчет, произведена разводка печатной платы, написана программа для отправки массива временных точек с компьютера, написана программа для контроллера для приёма массива временных точек с последующей генерацией сигнала.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Алямкин А. В.		19.06.19	Разработка источника тока для тестирования силовых полупроводниковых приборов	Лист	Листов
Провер.		Ильин М. В.		19.06.19		6	112
Н. контр.		Шестёркина А. А.		19.06.19		МГУ им. Н. П. Огарева ИЭС ЭНЭ 411 гр.	
Утверд.		Беспалов Н. Н.		19.06.19			

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1. Обзор технических решений, применяемых в промышленных источниках тока	10
1.1. Обзор схемотехнических решений источников тока	10
1.2. Обзор схемотехнических решений преобразователей тока	14
1.3. Генераторы мощных импульсов с применением ЦАП.	15
2. Разработка функциональной схемы аппаратной части источника тока	18
2.1 Технические требования	18
2.2 Разработка алгоритма функционирования источника тока и функциональной схемы	19
3. Разработка электрической принципиальной схемы источника тока	23
3.1. Разработка электрической принципиальной схемы силовой части источника тока	23
3.2 Расчёт трансформатора	23
3.3 Расчёт компонентов источника тока	30
3.4 Расчёт инвертирующего усилителя	35
3.5 Расчёт мостового преобразователя	37
3.6 Разработка электрической принципиальной схемы системы управления силовой части	39
3.7 Расчёт выпрямителя	46
3.8. Расчёт фильтра	47
3.9 Разработка электрической принципиальной схемы внутреннего источника питания источника тока	48
4 Разработка и исследование модели источника тока в программе моделирования Multisim	53
4.1 Разработка модели силовой части источника тока	53
4.2 Исследование модели источника тока	54

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

5	Разработка программы управляющего контроллера	61
5.1	Разработка алгоритма программного обеспечения контроллера	61
5.2	Разработка кода блока обмена данными между контроллером и компьютером	62
5.3	Разработка кода для управления цифро-аналоговым преобразователем	63
6	Разработка программной части для компьютера	67
6.1	Разработка кода для формирования таблицы данных, описывающей генерируемые импульсы	67
6.2	Разработка кода обмена данными между компьютером и контроллером	81
7	Разработка печатной платы системы управления силовой части источника тока	87
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	89
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Алгоритм программы управляющего контроллера	90
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Алгоритм программы для компьютера	93
	ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Электрическая принципиальная схема источника тока	102
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Перечень элементов источника тока	103
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) Чертеж печатной платы источника тока	104
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е (обязательное) Сборочный чертеж источника тока	105
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) Электрическая принципиальная схема источника питания	107
	ПРИЛОЖЕНИЕ З (обязательное) Перечень элементов источника питания	107
	ПРИЛОЖЕНИЕ И (обязательное) Чертеж печатной платы источника питания	108
	ПРИЛОЖЕНИЕ К (обязательное) Сборочный чертеж источника питания	109
	ПРИЛОЖЕНИЕ Л (обязательное) Монтажная схема	110
	ПРИЛОЖЕНИЕ М (обязательное) Перечень элементов монтажной схемы	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ Н (обязательное) Чертеж корпуса устройства	112

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире в различных отраслях промышленности и в быту с каждым днём растёт потребление электрической энергии. Растут и требования к многочисленным показателям и нагрузочной способности устройств и их компонентов, отвечающих за всевозможные функции преобразования, выпрямления и переключения. С использованием тиристоров построены дешёвые, но надёжные малогабаритные управляемые вторичные источники электропитания, которые распространены в электроприводах, робототехнике, автоматике, системах управления и множестве других случаев, когда требуется настраиваемое постоянное или переменное напряжение неизменной или регулируемой частоты.

Эксплуатационная надёжность силовых полупроводниковых приборов (СПП), таких как силовые диоды и тиристоры, определяется их исходным качеством и режимами эксплуатации. Качество СПП определяется его характеристиками, но основные характеристики, описывающие СПП, имеют существенный разброс, связано это с несовершенством технологии производства. Для определения качества СПП необходим контроль их параметров. Отсутствие у производителей и потребителей СПП эффективных методик и высокопроизводительных технических средств определения величин параметров и характеристик СПП не позволяет определять эти величины для каждого конкретного прибора. Это вынуждает разработчиков для определения предельных режимов эксплуатации СПП ориентироваться на паспортные данные. При этом требуемую надёжность обеспечивают за счёт снижения величины предельных параметров режимов эксплуатации. Применение этих мер приводит к недоиспользованию СПП, а также увеличению массы и габаритов преобразователей и повышению стоимости преобразователей.

Решить эту проблему можно используя специализированное испытательное оборудование для измерения и контроля параметров СПП. Серийно такие устройства не выпускаются. В связи с этим решено разработать программируемый источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов. Форма импульсов, амплитуда и частота задаётся массивом временных точек, формирование которых осуществляется на компьютере. Максимальная амплитуда импульсов — 400 А.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

1 Обзор технических решений, применяемых в промышленных источниках тока

1.1 Обзор схемотехнических решений источников тока

Для проверки многих параметров СПП, таких как ток удержания или импульсное падение напряжения, через тестируемое устройство необходимо пропустить импульс тока, для создания которого требуется генератор тока (ГТ). Наиболее просто источники тока реализуются на полупроводниковых приборах.

Произведём анализ схемотехнических решений источников тока по схемам, рассмотренных в источнике [1].

Рассмотрим принципы построения таких устройств на основе биполярных транзисторов. Очевидно, что если биполярный транзистор работает в активном режиме при постоянном значении базового тока, то его выходной ток мало зависит от напряжения между выводами эмиттера и коллектора. Именно на этом принципе и строятся все транзисторные схемы источников тока.

В качестве простейшего источника тока хорошо работает обычный биполярный транзистор с резистором в эмиттерной цепи, схема такого источника показана на рисунке 1.1.

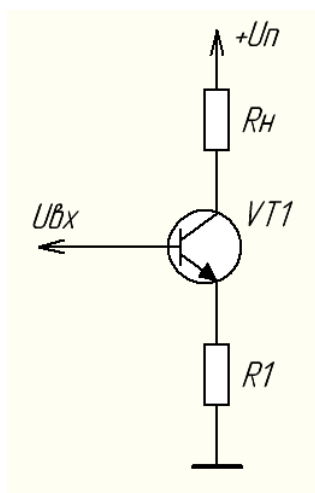


Рисунок 1.1 — Простейший источник тока на биполярном транзисторе

Сила тока протекающего через нагрузку R_n определяется выражением:

$$I_{RH} = \frac{U_{вх} - U_{бэ}}{R1} \quad (1.1)$$

где, I_{RH} - ток в нагрузке,

$U_{вх}$ - входное напряжение,

$U_{бэ}$ - падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT1,

R1 - сопротивление датчика тока.

Меняя величину $U_{вх}$ можно установить требуемый ток нагрузки. Обычно для задания входного напряжения с небольшой точностью используются источники опорного напряжения (ИОН). В этой схеме обратная связь по напряжению с выхода датчика тока R1 на вход регулирующего элемента VT1 в явном виде отсутствует. Вследствие этого сила тока в нагрузке зависит как от сопротивления нагрузки, так и от температуры и параметров транзистора.

Напряжение база – эмиттер $U_{бэ}$ и коэффициент усиления по току $h_{21э}$ зависят от температуры. В связи с этим при изменении температуры окружающей среды возникает дрейф выходного тока. Кроме того, температура перехода изменяется при изменении напряжения на нагрузке (в связи с изменением мощности, рассеиваемой транзистором) и приводит к тому, что источник работает не как идеальный.

Существует значительное количество усложненных схем источников тока, выполненных как на биполярных, так и на полевых транзисторах, позволяющих добиться значительного улучшения характеристик, то есть приближения их к характеристикам идеального источника тока. Однако, более существенное повышение стабильности источников тока становится возможным при применении операционных усилителей (ОУ).

На рисунке 1.2 изображена схема, которая является хорошим приближением к идеальному источнику тока, без сдвига напряжения $U_{бэ}$, характерного для транзисторного источника тока.

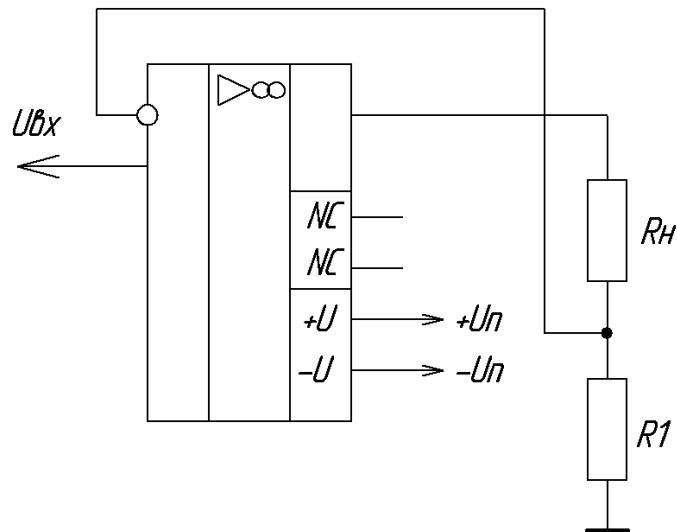


Рисунок 1.2 — Простейший источник тока на операционном усилителе

Благодаря отрицательной обратной связи на инвертирующем входе поддерживается напряжение $U_{вх}$, под действием которого через нагрузку протекает ток, который можно найти по формуле:

$$I_H = U_{вх} * R1 \quad (1.2)$$

Основной недостаток этой схемы состоит в том, что нагрузка является «плавающей» (она не заземлена). С помощью такого источника тока нельзя, например, получить пригодный к использованию пилообразный сигнал, напряжение которого отсчитывалось бы относительно потенциала земли.

С помощью операционного усилителя и подключенного к нему транзистора можно построить простой и надежный источник тока для заземленной нагрузки. Небольшое дополнение к схеме операционного усилителя позволяет использовать на управляющем входе напряжение, измеряемое относительно земли. Данная схема показана на рисунке 1.3.

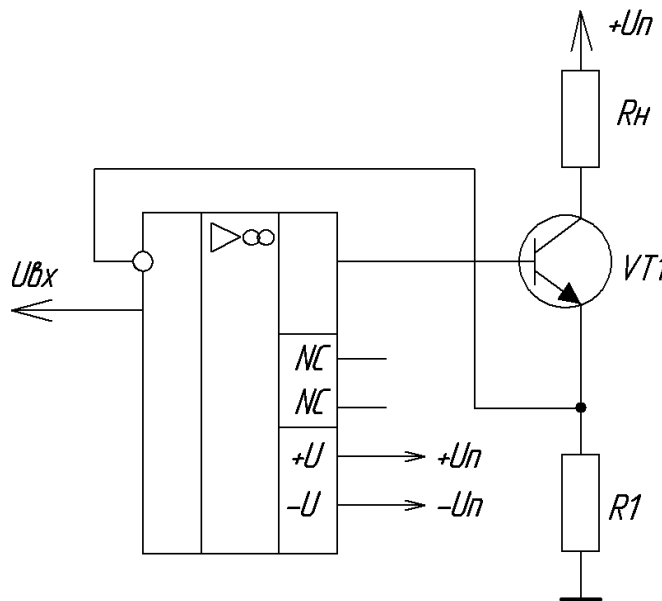


Рисунок 1.3 — Источник тока на ОУ с использованием транзистора

В этой схеме обратная связь создает на резисторе R1 падение напряжения, равное $U_n - U_{вх}$, которое в свою очередь порождает эмиттерный ток (а, следовательно, и выходной ток), равный:

$$I_3 = \frac{U_n - U_{вх}}{R1} \quad (1.3)$$

При работе с этой схемой не приходится беспокоиться о напряжении база – эмиттер $U_{БЭ}$ и его изменениях, связанных с изменениями температуры, тока коллектора I_K , напряжения коллектор – эмиттер $U_{КЭ}$ и т.п. Несовершенство этого источника тока, не принимая во внимание ошибки связанные с током смещения, проявляется лишь в том, что небольшой базовый ток может немного изменяться в зависимости от напряжения $U_{КЭ}$ (предполагая, что операционный усилитель не потребляет входной ток). Данный недостаток – небольшая плата за возможность использования заземленной нагрузки. Если в качестве транзистора использовать составной транзистор Дарлингтона или полевой транзистор, то погрешность будет существенно уменьшена. Погрешность возникает в связи с тем, что операционный усилитель стабилизирует эмиттерный ток, а в нагрузку поступает коллекторный ток.

1.2 Обзор схемотехнических решений преобразователей тока

Какими бы достоинствами и недостатками не обладали перечисленные выше схемы источников тока, все они не способны выдать ток величины порядка нескольких сотен или десятков сотен ампер. Решить эту проблему можно с использованием трансформатора.

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат с двумя (или больше) обмотками, предназначенный чаще всего для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Преобразование энергии в трансформаторе осуществляется переменным магнитным полем.

Трансформатор включается в цепь нагрузки как это показано на рисунке 1.4. Включение трансформатора показано на примере схемы источника тока на операционном усилителе и транзисторе.

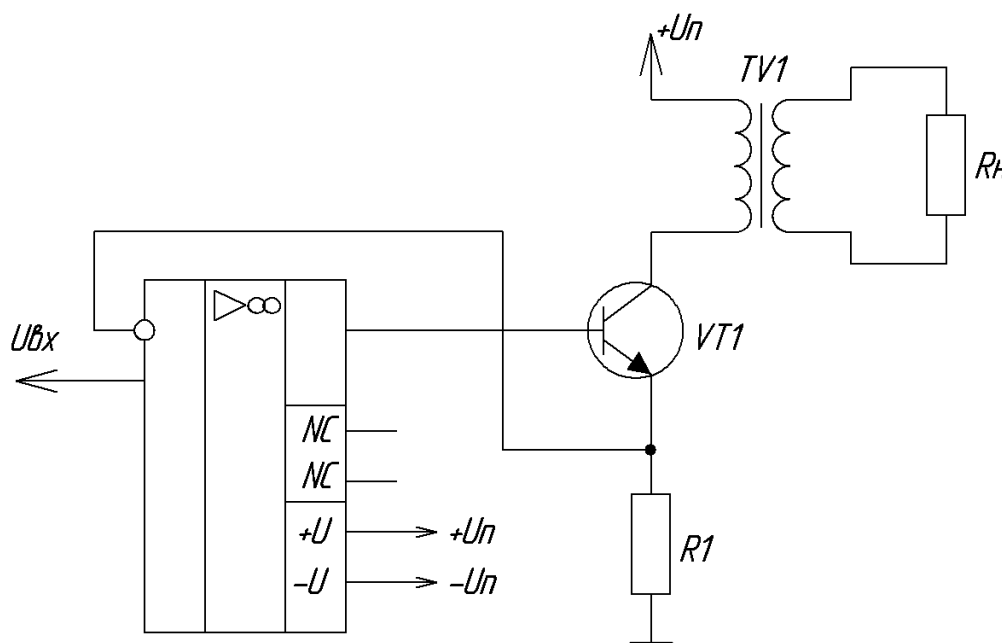


Рисунок 1.4 — Пример включения трансформатора

Трансформатор позволяет с сохранением мощности преобразовывать один уровень тока и напряжения в другой уровень тока и напряжения: повышается сила тока, но понижается напряжение. Преимуществом использования

трансформатора на частоте порядка 50 Гц является простота конструкции трансформатора и отсутствие специальных решений, необходимых для работы трансформатора. Недостатками являются большие габариты сердечника трансформатора, значительная масса, низкий КПД в сравнении с импульсным трансформатором, порядка 70 – 80% против 90 – 97%.

1.3 Генераторы мощных импульсов тока с применением ЦАП

Для генерации мощных импульсов можно использовать готовые схемотехнические решения. Примером такого устройства может служить модуль комплекса ЗАО «Протон-Электротекс» [2].

Метод цифрового синтеза используется в измерительном модуле комплекса, изготовленного ЗАО «Протон-Электротекс». В разработанном оборудовании для формирования токового импульса с изменяемой формой применяется топология параллельного buck-преобразователя, работающего в качестве источника тока. Форма импульса тока определяется совокупностью кодовых комбинаций, хранящихся в ПЗУ и поступающих с определенной скоростью на адресные входы ЦАП. Источником энергии для импульса является набор конденсаторных батарей, коммутируемых высокоскоростными IGBT-модулями с целью формирования токового импульса заданной формы и амплитуды после сглаживания на фильтре. Модульная конструкция с параллельным соединением ячеек позволяет масштабировать мощность установки в широких пределах 1–9 кА и осуществлять независимую автоматическую диагностику состояния каждой батареи. Используя адаптивную схему, показанную на рисунке 1.6, оцифровки сигнала и цифровое управление силовыми ключами, возможно получить практически любую форму токового импульса, включая трапецеидальную, полусинусоидальную, ступенчатую трапецеидальную и S-образную.

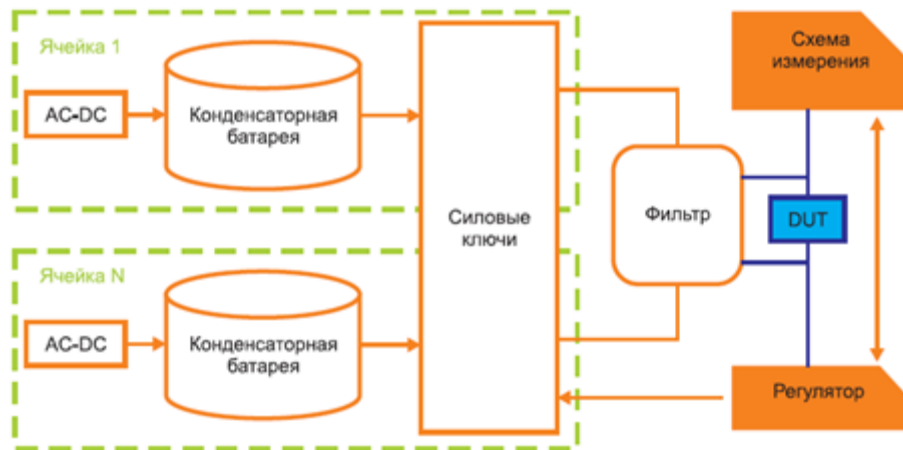


Рисунок 1.6 — Функциональная схема измерительного модуля

Упрощенная схема регулятора изображена на рисунке 1.7.

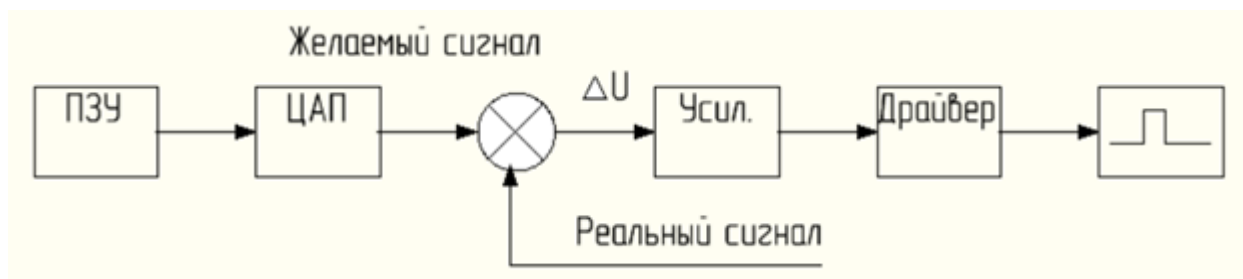


Рисунок 1.7 — Схема регулятора

Код, хранящийся в ПЗУ, поступает в ЦАП, который формирует необходимый сигнал. Далее этот сигнал сравнивается с реальным сигналом, который формирует модуль. Их разница поступает на усилитель, а после на драйвер, который с помощью мощных ключей формирует импульс тока заданной формы.

Значение U_{TM} может варьироваться в зависимости от формы токового импульса вследствие различного прогрева полупроводниковой структуры и динамических процессов в приборе. Основной задачей является обеспечение равномерного полного открытия СПП для протекающего тока с минимизацией при этом изменения его характеристик вследствие нагрева протекающим током. Поэтому для различных приборов может оказаться целесообразным применение различных форм тестовых импульсов. На рисунке 1.8 приведены графики форм токовых импульсов.

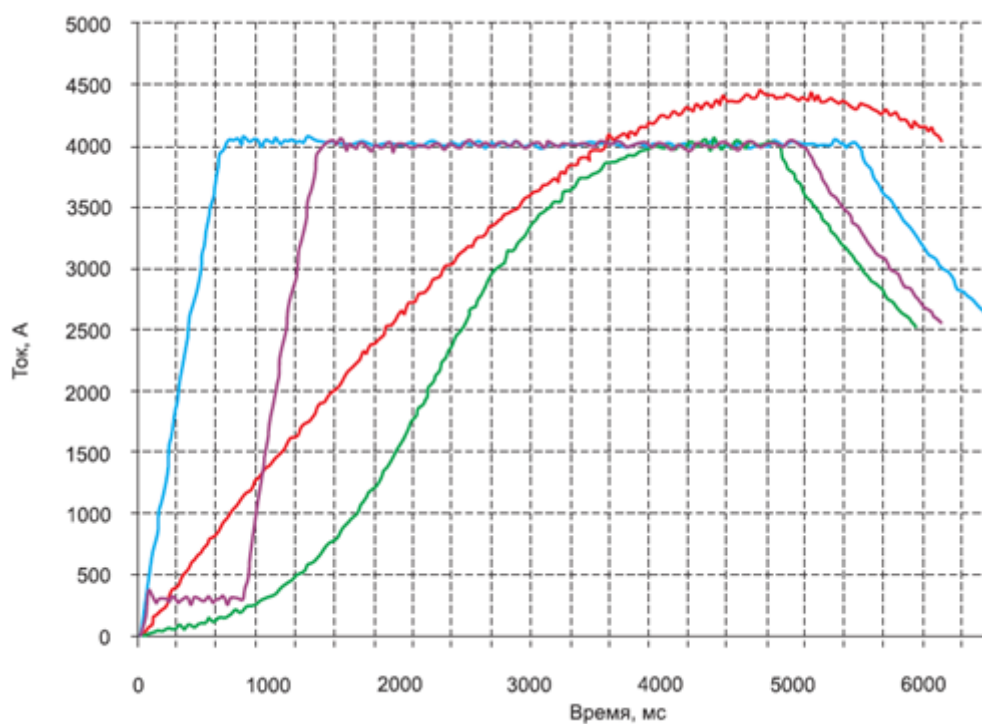


Рисунок 1.8 — Различные формы импульсов для измерения

Как видно из рисунка, форма импульсов может быть различной: от синусоидальной до прямоугольной.

2 Разработка функциональной схемы аппаратной части источника тока

2.1 Технические требования

Источник тока должен осуществлять подачу на испытуемый полупроводниковый прибор последовательность импульсов тока заданной формы.

1. Питание устройства осуществляется промышленной сетью 220 В 50 Гц. Осуществить гальваническую развязку устройства от сети переменного тока с помощью трансформатора.

2. Форма выходного тока — импульсная. Амплитуда импульсов тока до 400 А.

3. В виду того, что импульс является однополярным, необходимо разработать схему для перемангничивания сердечника, для исключения нежелательного влияния на форму измерительного импульса.

4. Форма импульсов задаётся массивом временных точек, формирование которого осуществляется на компьютере.

5. Управляющий массив временных точек должен храниться в памяти контроллера силового блока.

6. Преобразование цифровых данных управляющего массива, предназначенного для управления источником тока, в аналоговый сигнал осуществить с помощью ЦАП.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

2.2 Разработка алгоритма функционирования источника тока и функциональной схемы

Для реализации вышеописанных технических требований была разработана функциональная схема, которая представлена на рисунке 2.1.

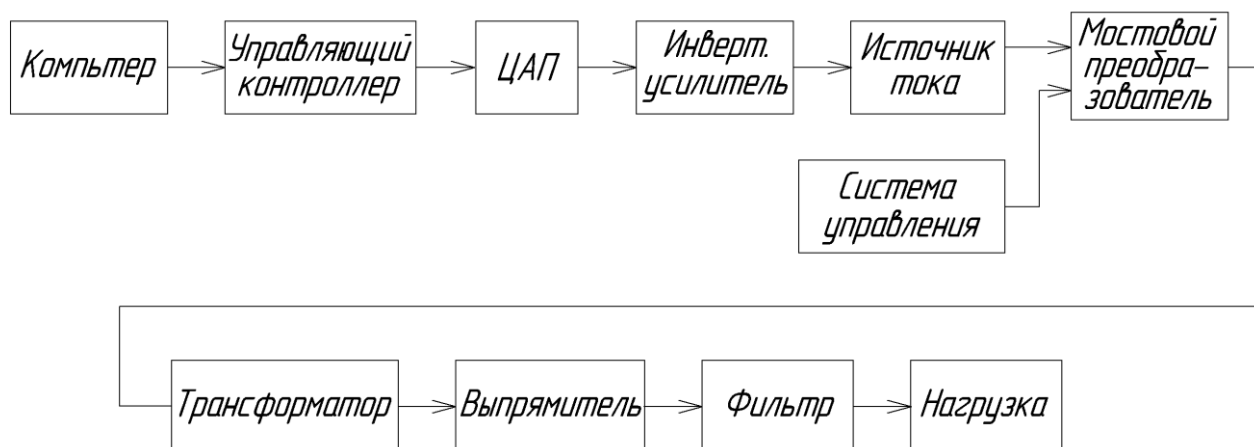


Рисунок 2.1 — Функциональная схема разрабатываемого устройства

Алгоритм работы схемы показан на рисунке 2.2.

Началом работы схемы является её начальная инициализация. К начальной инициализации можно отнести запуск микропроцессорной платы, начальная инициализация программы, подключение платы к сети Internet. Так же происходит начальная инициализация системы управления силовой части схемы: после подачи питания на мультивибратор, на его выходе формируется начальное значение управляющего сигнала с последующим открытием ключей верхнего уровня и закрытием ключей нижнего уровня.

Затем, если подана команда на формирование нового массива временных точек начинается генерация этого массива. Массив точек описывает форму выходного сигнала, его частоту и амплитуду. Массив с числовыми значениями переводится в текстовую строку, закодированную в ASCII код. После формирования массива происходит его передача по сети Internet на управляющий контроллер.

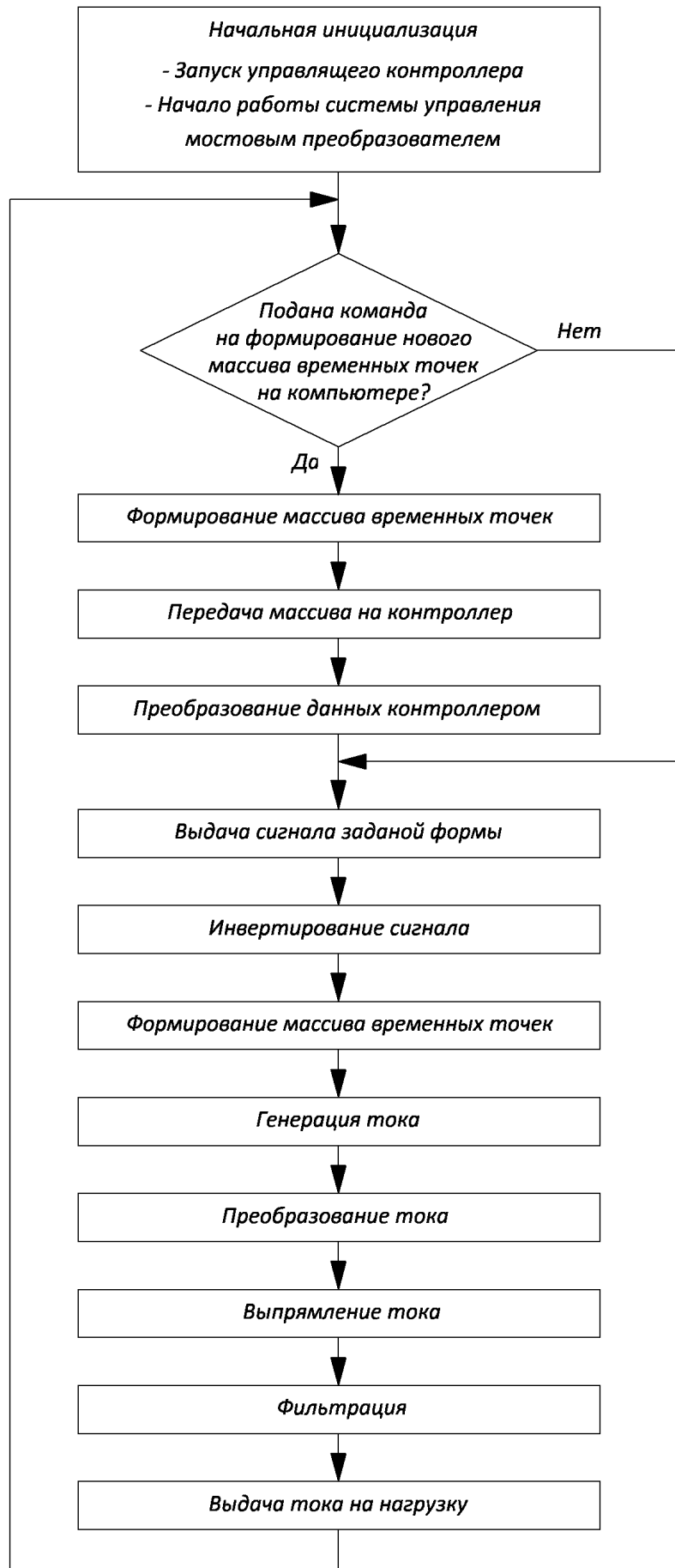


Рисунок 2.2 — Алгоритм работы источника тока

После приёма массива, контроллер производит декодирование текстовой строки в массив с числовыми значениями. После этого осуществляется формирование сигнала, заданной числовым массивом формы, с помощью модуля ЦАП.

Затем этот сигнал инвертируется с помощью инвертирующего усилителя. Инвертирующий усилитель нужен из-за того, что источник тока построен на основе инвертирующего включения операционного усилителя.

После этого напряжение преобразуется в ток с помощью источника тока. Затем происходит преобразование тока с помощью мостового транзисторного преобразователя. Преобразование тока нужно для того, чтобы ток протекал через первичную обмотку трансформатора в обе стороны и не происходило насыщения сердечника. Затем происходит преобразование тока трансформатором. После чего ток выпрямляется с помощью выпрямителя и проходит через фильтр. После чего поступает на нагрузку. Затем выполнение алгоритма начинается сначала.

3 Разработка электрической принципиальной схемы источника тока

3.1 Разработка электрической принципиальной схемы силовой части источника тока

По разработанной функциональной схеме выберем элементы принципиальной схемы. В качестве источника тока будет использован источник тока на операционном усилителе и полевом транзисторе, в виду отсутствия у него температурного дрейфа как у источника тока на биполярном транзисторе и более точного регулирования тока нагрузки в сравнении и источником тока на операционном усилителе с незаземлённой нагрузкой. В виду того, что схема источника тока является инвертирующей, для устранения инверсии выходного тока относительно управляющего напряжения используется инвертирующий усилитель на операционном усилителе. В виду того, что источник тока не сможет выдать ток достаточно большой величины, для увеличения амплитуды тока будет использоваться трансформатор. В связи с тем, что источник тока генерирует ток только положительного значения, сердечник трансформатора не будет перемагничиваться, для устранения этой проблемы используется мостовой транзисторный преобразователь. Частоту преобразования выберем равной 20 кГц. После протекания тока через трансформатор, ток нужно выпрямить. Выпрямлять ток будет двухполупериодный выпрямитель со средней точкой. В данной разрабатываемой схеме не используется полный мостовой выпрямитель потому, что на таком типе выпрямителя падает вдвое больше напряжения в сравнении с выпрямителем со средней точкой. Для устранения пульсаций после выпрямителя будет использоваться фильтр. В качестве фильтра будет использован однозвенный С-фильтр.

Получившаяся схема показана на рисунке 3.1.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

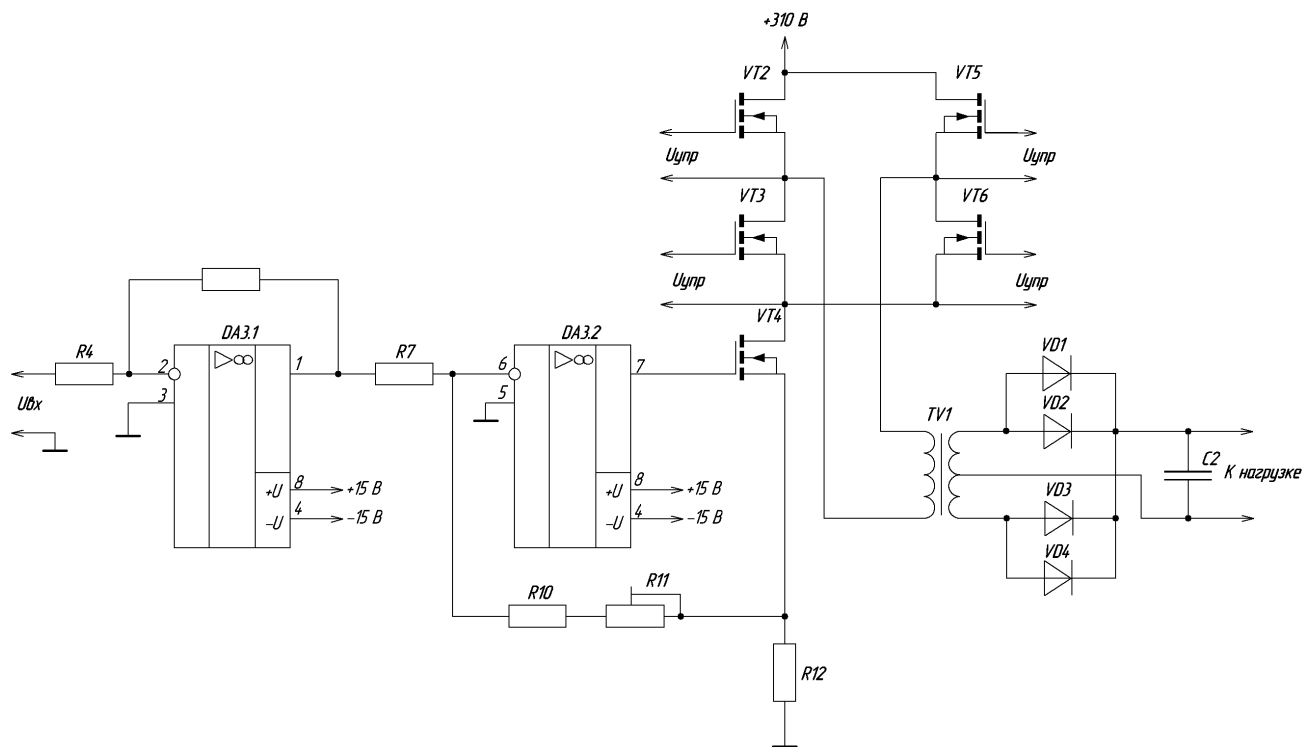


Рисунок 3.1 — Принципиальная схема источника тока

Расчёт элементов разработанной принципиальной схемы представлен ниже.

3.2 Расчёт трансформатора

Начнём расчёт схемы с расчёта трансформатора.

Для начала расчёта трансформатора найдём напряжение, снимаемое со вторичной обмотки. Прежде всего, найдём потери на проводниках и соединениях. Соединять проводник и компоненты схемы будем с помощью болтового соединения. В виду того, что у диода, который будем использовать для выпрямления тока, диаметр выводного отверстия равен 4,3 мм, будем использовать болт диаметром 3 мм. Согласно ГОСТ 21242-75 сопротивление такого контакта равно 80 мкОм. Для соединения других элементов будем использовать болт диаметром 8 мм. Таких соединений будет восемь. Сопротивление такого соединения равно 16 мкОм. Таких соединений будет пять.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Найдем действующее значение тока I_2 на нагрузке:

$$I_{2RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_H} I_H^2} = I_H \sqrt{\frac{t_{\text{облх}}}{T}} = 400 \cdot \sqrt{0,5} = 282,843 \text{ А.} \quad (3.1)$$

Найдём сечение и диаметр проводника, который может быть использован в цепи нагрузки:

$$S_2 = \frac{I_{2RMS}}{j} = \frac{282,843}{3} = 94,28 \text{ мм}^2. \quad (3.2)$$

Полученным значениям сечений соответствуют следующие диаметры проводов:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 94,28 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 1,096 \cdot 10^{-2} \text{ м.} \quad (3.3)$$

Будем использовать пять проводов марки ПЭТВ-2 $d_2 = 2,24 \text{ мм}$ (диаметр по изоляции $d_{2из} = 2,316 \text{ мм}$ соответственно).

Соединять элементы схемы будем проводами длиной 10 см. Сопротивление такого проводника будет равно:

$$R_2 = \rho \frac{l_2}{S_2} = 1,75 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{0,1}{2,24 \cdot 10^{-6}} = 7,813 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.4)$$

где, $\rho = 1,75 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди.

За полупериод ток протечёт по четырём таким проводникам. Тогда суммарное сопротивление всех проводников и болтовых соединений будет равно 536,5 мкОм. Тогда падение напряжения $U_{ПАР}$ на этих элементах будет равно:

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

$$U_{\text{ПАР}} = I_2 \cdot R_{\text{ПАР}} = 400 \cdot 536,5 \cdot 10^{-6} = 0,2146B \quad (3.5)$$

Тогда напряжение на вторичной полуобмотке будет равно

$$U_{21} = U_H + U_{\text{ПАР}} + U_D = 1,4 + 0,2146 + 0,73 = 2,345B \quad (3.6)$$

где, U_D — прямое падение напряжения на диоде.

Произведём расчёт импульсного трансформатора [3]

Тогда, мощность вторичной полуобмотки составит:

$$P_H = I_{2RMS} U_H = 282,843 \cdot 2,345 = 663,267Bm. \quad (3.7)$$

Коэффициент трансформации будет равен:

$$n = \frac{U_{\text{П}}}{U_2} = \frac{290}{2,345} = 123,667 \quad (3.8)$$

Найдём амплитуду тока первичной обмотки:

$$I_1 = \frac{I_H}{n} = \frac{400}{123,667} = 3,234A \quad (3.9)$$

Действующее значение тока в первичной обмотке будет равно:

$$I_{1RMS} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = \frac{3,234}{\sqrt{2}} = 2,287A \quad (3.10)$$

Расчётная мощность первичной обмотки составит:

$$P_1 = U_{\text{П}} \cdot I_{1RMS} = 290 \cdot 2,287 = 663,23Bm \quad (3.11)$$

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Габаритная мощность будет равна:

$$P_2 = 0,5 \cdot (P_1 + 2P_2) = 0,5 \cdot (663,23 + 2 \cdot 663,267) = 994,88 \text{ Вт.} \quad (3.12)$$

Коэффициент заполнения q будет равен:

$$q = \frac{t_u}{T} = 0,5. \quad (3.13)$$

В качестве материала сердечника будем использовать феррит марки 1000НН, у которого $B_{\max} = 0,32$ Тл. Для любого феррита $k_c = 1$. Примем $k_o = 0,3$, $j = 3$ А/мм². Найдем $S_c S_o$:

$$S_c S_o = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 994,88}{20000 \cdot 0,3 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 0,32} = 8,636 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4. \quad (3.14)$$

Полученному значению $S_c S_o$ удовлетворяет сердечник К100х60х15, у которого $S_c S_o = 8,478 \cdot 10^{-7}$.

Выбрав сердечник, можем определить число витков первичной обмотки:

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot q}{f S_c k_c 2 B_{\max}} = \frac{290 \cdot 0,5}{20000 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,32} = 38 \text{ вит.} \quad (3.15)$$

где U_1 – падение напряжения на первичной обмотке.

Найдем число витков вторичной полуобмотки:

$$w_{21} = w_1 \frac{U_2}{U_1} = 38 \cdot \frac{2,345}{290} = 1 \text{ вит.} \quad (3.16)$$

Таким образом вторичная обмотка должна содержать 2 витка с отводом от средней точки.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Найдем сечение и диаметры проводов первичной и вторичной обмоток:

$$S_1 = \frac{I_{1RMS}}{j} = \frac{2,287}{3} = 0,762 \text{ мм}^2; \quad (3.17)$$

$$S_2 = \frac{I_{2RMS}}{j} = \frac{282,843}{3} = 94,28 \text{ мм}^2. \quad (3.18)$$

Полученным значениям сечений соответствуют следующие диаметры проводов:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,762 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,985 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad (3.19)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,428 \cdot 10^{-5}}{\pi}} = 1,096 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \quad (3.20)$$

Будем использовать провод марки ПЭТВ-2 с диаметрами по меди $d_1 = 1 \text{ мм}$ и пять проводов $d_2 = 2,24 \text{ мм}$ (диаметры по изоляции $d_{1из} = 1,062 \text{ мм}$ и $d_{2из} = 2,316 \text{ мм}$ соответственно).

Проверим размещаемость обмоток в окне сердечника.

В качестве изоляции сердечника будем использовать стеклолакоткань марки ЛСЭ-105/130 толщиной $\Delta_{из} = 0,1 \text{ мм}$.

Первой будем мотать первичную обмотку. Найдем диаметр первого слоя:

$$d_{сл1} = d - 4\Delta_{из} - d_{1из} = 0,06 - 4 \cdot 10^{-4} - 1,062 \cdot 10^{-3} = 0,058838 \text{ м}, \quad (3.21)$$

где, d – внутренний диаметр кольцевого сердечника.

Длина первого слоя:

$$l_{cл1} = \pi d_{cл1} = \pi \cdot 0,058838 = 0,18485 \text{ м.} \quad (3.22)$$

Найдем максимальное число витков в первом слое без учета неплотности намотки:

$$w_{cл1, макс} = \frac{l_{cл1}}{d_{1уз}} = \frac{0,18485}{1,316 \cdot 10^{-3}} = 140 \text{ вит.} \quad (3.23)$$

Таким образом, первичная обмотка уложится в один слой. В первом слое можно разместить 38 витков.

Теперь рассчитаем индуктивности первичной и вторичной обмоток, а также индуктивность рассеяния полученного трансформатора

$$L_1 = \frac{\mu\mu_0 S_c}{l_{cp}} w_1^2 = \frac{4800 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{0,1664} \cdot 38^2 = 0,0157 \text{ Гн;} \quad (3.24)$$

$$L_2 = \frac{\mu\mu_0 S_c}{l_{cp}} w_2^2 = \frac{4800 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{0,1664} \cdot 2^2 = 4,349 \cdot 10^{-5} \text{ Гн;} \quad (3.25)$$

$$L_{S1} = \mu_0 \frac{l_{cp}^H}{h_n} w_1 \cdot \Delta = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0,1664}{14,581 \cdot 10^{-3}} \cdot 38 \cdot 0,581 \cdot 10^{-3} = 3,17 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \quad (3.26)$$

где, $\Delta = \frac{d - d_{cл1}}{2} = \frac{0,06 - 0,058838}{2} = 0,581 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – толщина намотки,

$h_n = \Delta + h = 0,581 \cdot 10^{-3} + 14 \cdot 10^{-3} = 14,581 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – высота намотки,

$l_{cp}^H = 2 \cdot \left(2\Delta + h + \frac{D - d}{2} \right) = 2 \cdot \left(2 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3} + 0,0015 + \frac{0,1 - 0,06}{2} \right) = 0,1664 \text{ м}$ –

длина намотки, D, h – внешний диаметр и высота кольцевого сердечника.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Рассчитаем сопротивление первичной и вторичной обмотки. Для этого необходимо знать длину проводника первичной и вторичной обмоток. Поскольку длины проводника для каждого слоя меняются, то рассчитаем их используя формулы:

$$l_1 = w_{cl1} \cdot (8\Delta_{из} + 2h + (D - d)) = 38 \cdot (8 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 0,015 + (0,1 - 0,06)) = 3,451 м; \quad (3.27)$$

$$l_2 = w_{cl2} \cdot (16\Delta_{из} + 8d_{из2} + 2h + (D - d)) = 2 \cdot (16 \cdot 10^{-4} + 8 \cdot 5 \cdot 0,002316 + 2 \cdot 0,015 + (0,1 - 0,06)) = 0,3286 м. \quad (3.28)$$

где, w_{cl1} , w_{cl2} – количество витков в первом и втором слоях соответственно,

$\Delta_{из}$ – толщина межслоевой изоляции,

$d_{из1}$, $d_{из2}$ – диаметр проводников с изоляцией первичной и вторичной обмоток.

Тогда, сопротивления первичной и вторичной обмоток составят:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S_1} = 1,75 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{3,451}{1,227 \cdot 10^{-6}} = 0,0049 Ом; \quad (3.29)$$

$$R_2 = \rho \frac{l_2}{S_2} = 1,75 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{0,3286}{3,941 \cdot 10^{-6}} = 0,146 \cdot 10^{-3} Ом. \quad (3.30)$$

где, $\rho = 1,75 \cdot 10^{-9} Ом \cdot м$ – удельное сопротивление меди,

S_1 , S_2 – площади сечения проводников первичной и вторичной обмоток.

Коэффициент трансформации, получившегося трансформатора, составит:

$$n = \frac{w_1}{w_{21}} = \frac{38}{1} = 38. \quad (3.31)$$

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

Для того, чтобы на выходе разрабатываемой схемы протекал ток величиной 400 А на первичной обмотке трансформатора нужно задать ток, величиной, рассчитанной выше. К тому же, величина этого тока должна изменяться пропорционально величине управляющего напряжения. Для этого будет использована схема источника тока на операционном усилителе и транзисторе.

3.3 Расчёт компонентов источника тока

Рассчитаем источник тока [4], схема которого изображена на рисунке 3.2.

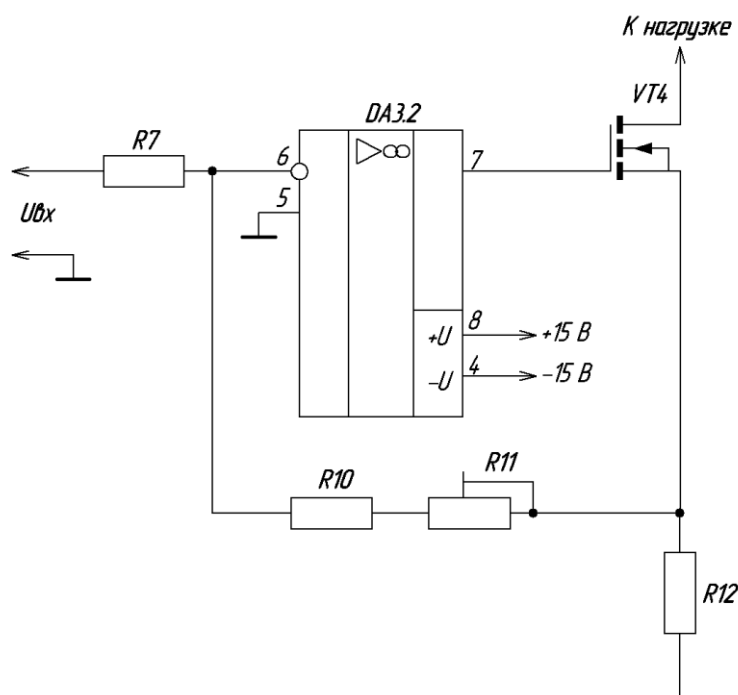


Рисунок 3.2 — Схема источника тока

Ток стока I_C будет равен току первичной обмотки $I_I=3,234$ А.

По току стока подберем управляющий транзистор [5].

Транзистор мы возьмем IRFP460 с параметрами:

$$I_{CI\max} = 20\text{A};$$

$$U_{CI\max} = 500\text{В}.$$

Операционный усилитель возьмем AD8066:

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

$$U_{n.max} = \pm 15 \text{ В};$$

$$I_{out max} = 35 \text{ мА};$$

$$dU/dt = 180 \text{ В/мкс.}$$

Питание операционного усилителя возьмем равным:

$$U = \pm 15 \text{ В.}$$

Ток, проходящий через R12 составит:

$$I_{R12} = I_C - I_{OC}. \quad (3.32)$$

Для начала найдем ток через ветвь обратной связи I_{OC} операционного усилителя. Поскольку, ток, входящий в ОУ очень мал, а неинвертирующий вход заземлен, то:

$$I_{OC} = I_{R7} = \frac{U_{ex}}{R5} = \frac{5}{1000} = 0,005 \text{ А.} \quad (3.33)$$

где $U_{ex} = U_{входн} = 5 \text{ В}$ – входное напряжение, а сопротивление R7 мы приняли равным 1 кОм.

Тогда, ток I_{R12} через R12 будет равен:

$$I_{R12} = 3,237 - 0,005 = 3,232 \text{ А.} \quad (3.34)$$

Так как падение напряжения на R12 мы приняли равным 1В, то сопротивление R12 будет:

$$R12 = \frac{U_{R12}}{I_{R12}} = \frac{1}{3,232} = 0,309 \text{ Ом.} \quad (3.35)$$

Номинальное сопротивление из стандартного ряда выберем $R12 = 0,27 \text{ Ом}$.

Мощность, которая будет выделяться на шунте R12 составит:

$$P_{R12} = I^2 R12 = 3,232^2 \cdot 0,27 = 2,82 \text{ Вт}. \quad (3.36)$$

Возьмём резистор SQP 5 Вт, 0,27 Ом, 5%.

Так как нам известны I_{R12} , U_{BX} , R12, R7, то мы можем рассчитать суммарный номинал резисторов R10 и R11 — Rсум:

$$U_{R10} = I_{R12} \frac{R12 \cdot R_{\text{сум}}}{R12 + R_{\text{сум}}}; \quad (3.37)$$

ПОСКОЛЬКУ:

$$\frac{U_{R12}}{R_{\text{сум}}} = \frac{U_{BX}}{R7}; \quad (3.38)$$

ТО:

$$I_C = -U_{BX} \frac{R12 + R_{\text{сум}}}{R7 \cdot R12}; \quad (3.39)$$

$$R_{\text{сум}} = \frac{I_C \cdot R7 \cdot R12}{U_{BX}} - R12 = \frac{3,234 \cdot 1000 \cdot 0,27}{5} - 0,27 = 174,37 \text{ Ом}. \quad (3.40)$$

Подстроечный резистор в цепи обратной связи нужен для точной настройки тока первичной обмотки трансформатора и, как следствие, тока нагрузки. Необходимость этой настройки возникает из-за несовершенства используемой компонентной базы. Подстроечный резистор R11 возьмём равным трети от суммарного сопротивления Rсум, расположенного в ветви обратной связи. При этом это будет только половина от номинала подстроечного

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

резистора R11. Это нужно для того, чтобы иметь возможность регулировать сопротивление в ветви обратной связи операционного усилителя в обе стороны: как больше $R_{сум}$, так и меньше $R_{сум}$. Возьмём $R_{11}=150$ Ом, а $R_{10}=150$ Ом.

Мощность, которая будет выделяться на резисторе R11 составит:

$$P_{R11} = I_{OC}^2 R_{11} = 0,005^2 \cdot 150 = 0,00375 \text{ Вт}. \quad (3.41)$$

Возьмём резистор СПЗ-19б, 0,5 Вт, 150 Ом.

Мощность, которая будет выделяться на резисторе R10 составит:

$$P_{R10} = I_{OC}^2 R_{10} = 0,005^2 \cdot 150 = 0,00375 \text{ Вт}. \quad (3.42)$$

Возьмём резистор CF-25 (С1-4), 0,25 Вт, 150 Ом, 5% [6].

Произведем тепловой расчет для данного транзистора для определения необходимости установки радиатора. Для выбранного транзистора IRFP460 мы имеем максимальную рассеиваемую мощность $P_D=250$ Вт.

В виду того, что источник тока управляется контроллером, форма тока может быть произвольной. Рассчитаем мощность P_{AV} , выделяемую на транзисторе при наихудшем случае, когда скважность импульсов равна 1:

$$P_{AV} = I_C^2 \cdot R_{DS(ON)} \cdot q = 3,234^2 \cdot 0,27 \cdot 1 = 2,824 \text{ Вт} \quad (3.43)$$

где, I_C — средний ток, протекающий через транзистор,

$R_{DS(ON)}$ — сопротивление канала транзистора,

q — длительность импульса.

Таким образом данный транзистор отлично подходит для этой схемы.

Рассчитаем тепловое сопротивление требуемого охладителя, для температуры окружающей среды $T_a = 40$ °С и допустимой температуры нагрева кристалла транзистора $T_j = 80$ °С. Найдем тепловое сопротивление кристалл–атмосфера:

					<i>БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						33
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$R_{THJA} = \frac{T_j - T_a}{P_{AV}} = \frac{80 - 40}{2,824} = 14,16(^\circ\text{C} / \text{Вт}) \quad (3.44)$$

Отсюда вычислим тепловое сопротивление радиатор–атмосфера:

$$R_{THCA} = R_{THJA} - R_{THJC} - R_{THCS} - R_{ГПР} = 14,16 - 0,45 - 0,24 - 1 = 12,47(^\circ\text{C} / \text{Вт}), \quad (3.45)$$

где, $R_{THJC} = 0,45$ ($^\circ\text{C}/\text{Вт}$) — тепловое сопротивление кристалл — корпус,

$R_{THCS} = 0,24$ ($^\circ\text{C}/\text{Вт}$) — тепловое сопротивление корпус — радиатор,

$R_{ГПР} = 1$, сопротивление изолирующей прокладки КПТД 2/1-0.20.

Значения, взятые из паспорта транзистора IRFP460. Изолирующая прокладка взята из-за того, что на рассчитываемый радиатор помимо транзистора источника тока будут прикреплены транзисторы преобразовательного моста.

С помощью зависимости, изображённой на рисунке 3.3, найдём периметр сечения радиатора.

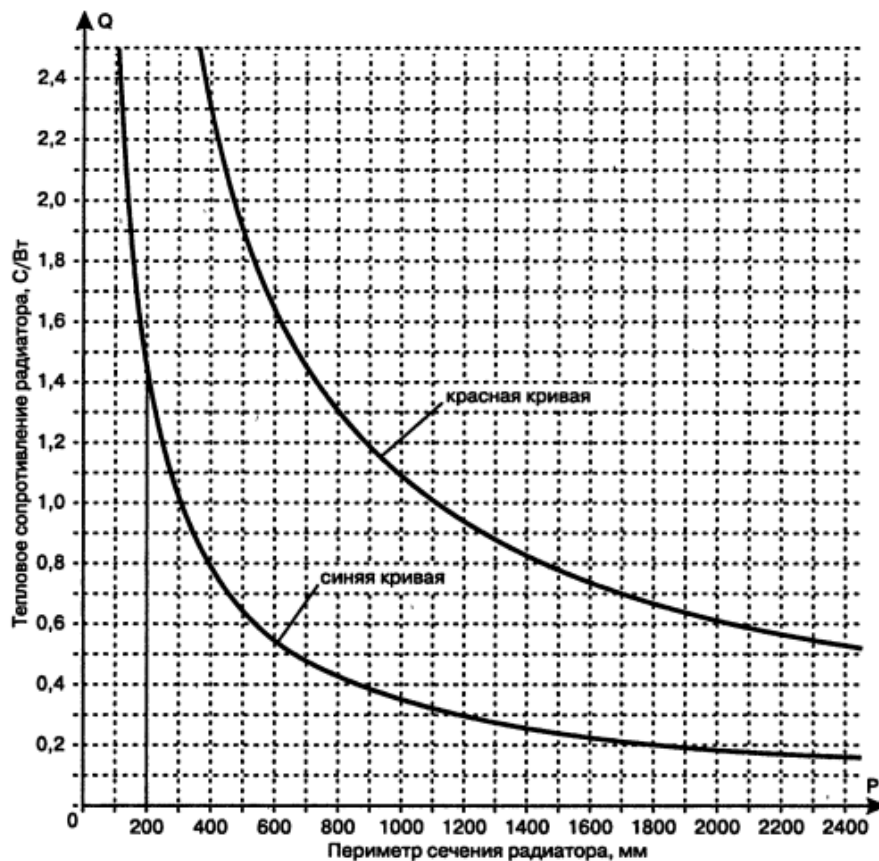


Рисунок 3.3 — Зависимость теплового сопротивления радиатора от периметра сечения радиатора

Определение периметра сечения радиатора естественного охлаждения производится по красной линии. Периметр сечения радиатора возьмём для теплового сопротивления радиатора равного 2,5 °С/Вт. Тогда периметр сечения радиатора будет равным 350 мм. Примем длину радиатора равной 100 мм, тогда требуемая площадь сечения радиатора S_p будет равна:

$$S_p = 0,1 \cdot 0,35 = 0,035 \text{ м}^2 \quad (3.46)$$

Возьмём радиатор HS 117-100, 100x43x20. Данный радиатор ребристого типа и имеет восемь рёбер. Найдём площадь радиатора учитывая площадь всех рёбер с обеих сторон, а так же площадь основания с обеих сторон:

$$S_{HS117-100} = 8 \cdot 0,2 \cdot 10 \cdot 2 + 10 \cdot 4,3 \cdot 2 = 0,0406 \text{ м}^2 \quad (3.47)$$

Таким образом данный радиатор подходит для охлаждения транзистора. Так как тепловое сопротивление данного радиатора меньше 2,4 °С/Вт, а для транзистора источника тока требовался радиатор с тепловым сопротивлением 12,47 °С/Вт, то получилось со значительным запасом.

3.4 Расчёт инвертирующего усилителя

Так как схема источника тока на основе инвертирующего включения ОУ, то нам нужен инвертирующий усилитель с $K_U = -1$. Схема Инвертирующего усилителя изображена на рисунке 3.4.

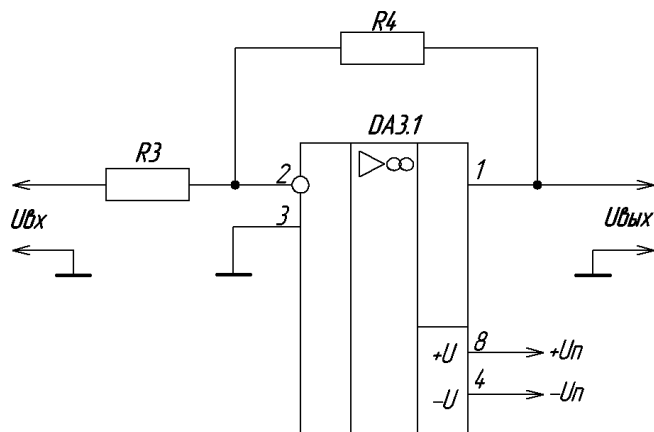


Рисунок 3.4 — Схема инвертирующего усилителя

Для нашей схемы возьмем быстродействующий операционный усилитель AD8066 со следующими параметрами:

$$U_{n.max} = \pm 15 \text{ В};$$

$$I_{out max} = 35 \text{ мА};$$

$$dU/dt = 180 \text{ В/мкс.}$$

Питание для операционного усилителя возьмем равным:

$$U = \pm 15 \text{ В.}$$

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя вычисляется по формуле:

$$K_y = -\frac{R6}{R4} \quad (3.48)$$

Так как коэффициент усиления данного инвертирующего усилителя мы взяли равным единице, то и резисторы можно взять любого номинала из стандартного ряда и буду равны $R4=R6=10 \text{ кОм}$. Возьмём резисторы CF-100 (С1-4), 1 Вт, 10 кОм, 5%.

3.5 Расчёт мостового преобразователя

Усовершенствовать конструкцию трансформатора можно используя мостовой преобразователь можно усовершенствовать конструкцию трансформатора.

Схема мостового преобразователя показана на рисунке 3.5.

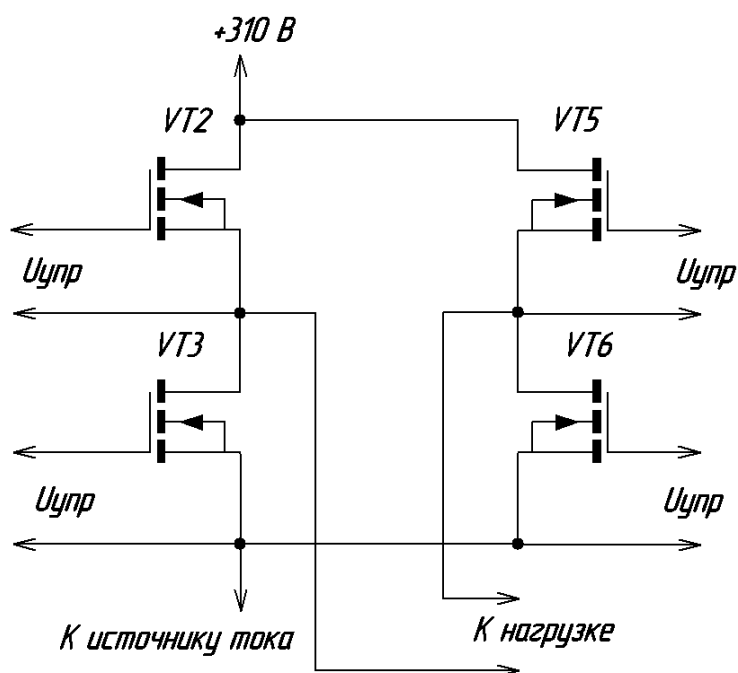


Рисунок 3.5 — Схема мостового преобразователя

Для эффективной работы трансформатора переключение транзисторов будет осуществляться с частотой 20 кГц. Переключение транзисторов данного преобразователя осуществляется по диагонали. В первый момент времени закрыты транзисторы VT2 и VT6, открыты – VT3 и VT5. Ток течёт: Источник питания $U_{п}$, транзистор VT3, первичная обмотка трансформатора, транзистор VT5, источник тока. Затем происходит переключение транзисторов: VT2 и VT6 открываются, а VT3 и VT5 закрываются. Ток течёт: Источник питания $U_{п}$, транзистор VT2, первичная обмотка трансформатора, транзистор VT6, источник тока. Происходит «нарезание» исходной формы тока на импульсы. За счёт протекания тока через первичную обмотку трансформатора в обоих

направлениях не происходит насыщения сердечника трансформатора. За счёт большой частоты переключений уменьшаются габариты трансформатора.

Транзисторы будут использоваться IRFP460 у которого максимальный ток сток-исток равен $I_{CI_{max}} = 20\text{A}$ и максимальное напряжение сток-исток равно $U_{CI_{max}} = 500\text{В}$. Рассчитаем выделяемую на этом транзисторе мощность. Статическую мощность P_{AV} можно найти по формуле:

$$P_{AV} = I_C^2 \cdot R_{DS(ON)} \cdot q = 3,234^2 \cdot 0,27 \cdot 0,5 = 1,412\text{Вт} \quad (3.49)$$

где, I_C — средний ток, протекающий через транзистор,

$R_{DS(ON)}$ — сопротивление канала транзистора,

q — длительность импульса.

Мощность коммутационных потерь $P_{КОМ}$ можно найти по формуле:

$$P_{КОМ} = 2U_{П} I_C q \cdot \frac{t_1 + t_2}{T} \quad (3.50)$$

$$P_{КОМ} = 2 \cdot 310 \cdot 3,234 \cdot 0,5 \cdot \frac{25 \cdot 10^{-9} + 20 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-5}} = 0,9023\text{Вт} \quad (3.51)$$

где, T — период управляющего сигнала,

$t_1 = 25 \cdot 10^{-9}$ с — время нарастания управляющего импульса IR2110,

$t_2 = 20 \cdot 10^{-9}$ с — время спада управляющего импульса IR2110.

Суммарная мощность $P_{СУМ}$, выделяемая транзистором будет равна:

$$P_{СУМ} = P_{КОМ} + P_{AV} = 0,9023 + 1,412 = 2,314\text{Вт} \quad (3.52)$$

Рассчитаем тепловое сопротивление требуемого охладителя, для температуры окружающей среды $T_a = 40\text{ }^\circ\text{C}$ и допустимой температуры нагрева кристалла транзистора $T_j = 80\text{ }^\circ\text{C}$. Найдем тепловое сопротивление кристалл–атмосфера:

$$R_{ТНJA} = \frac{T_j - T_a}{P_{СУМ}} = \frac{80 - 40}{2,314} = 17,28\text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (3.53)$$

Отсюда вычислим тепловое сопротивление радиатор–атмосфера:

$$R_{ТНСА} = R_{ТНJA} - R_{ТНJC} - R_{ТНCS} - R_{IP} = 17,28 - 0,45 - 0,24 - 1 = 15,59\text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (3.54)$$

где, $R_{ТНJC} = 0,45\text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ — тепловое сопротивление кристалл — корпус,

$R_{ТНCS} = 0,24\text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ — тепловое сопротивление корпус — радиатор,

$R_{IP} = 1$, сопротивление изолирующей прокладки КИТД 2/1-0.20.

Значения, взятые из паспорта транзистора IRFP460. Изолирующая прокладка взята из-за того, что на рассчитываемом радиаторе будет размещено пять транзисторов. В виду того, что радиатор, взятый для охлаждения транзистора источника тока, рассчитан со значительным запасом, его теплового сопротивления будет достаточно для размещения на нём также и четырёх транзисторов преобразовательного моста.

3.6 Разработка электрической принципиальной схемы системы управления силовой частью.

Управление мостовым преобразователем осуществляется двумя драйверами полумоста IR2110, который на выходе формирует переменное напряжение необходимой величины. Схема включения показана на рисунке 3.6.

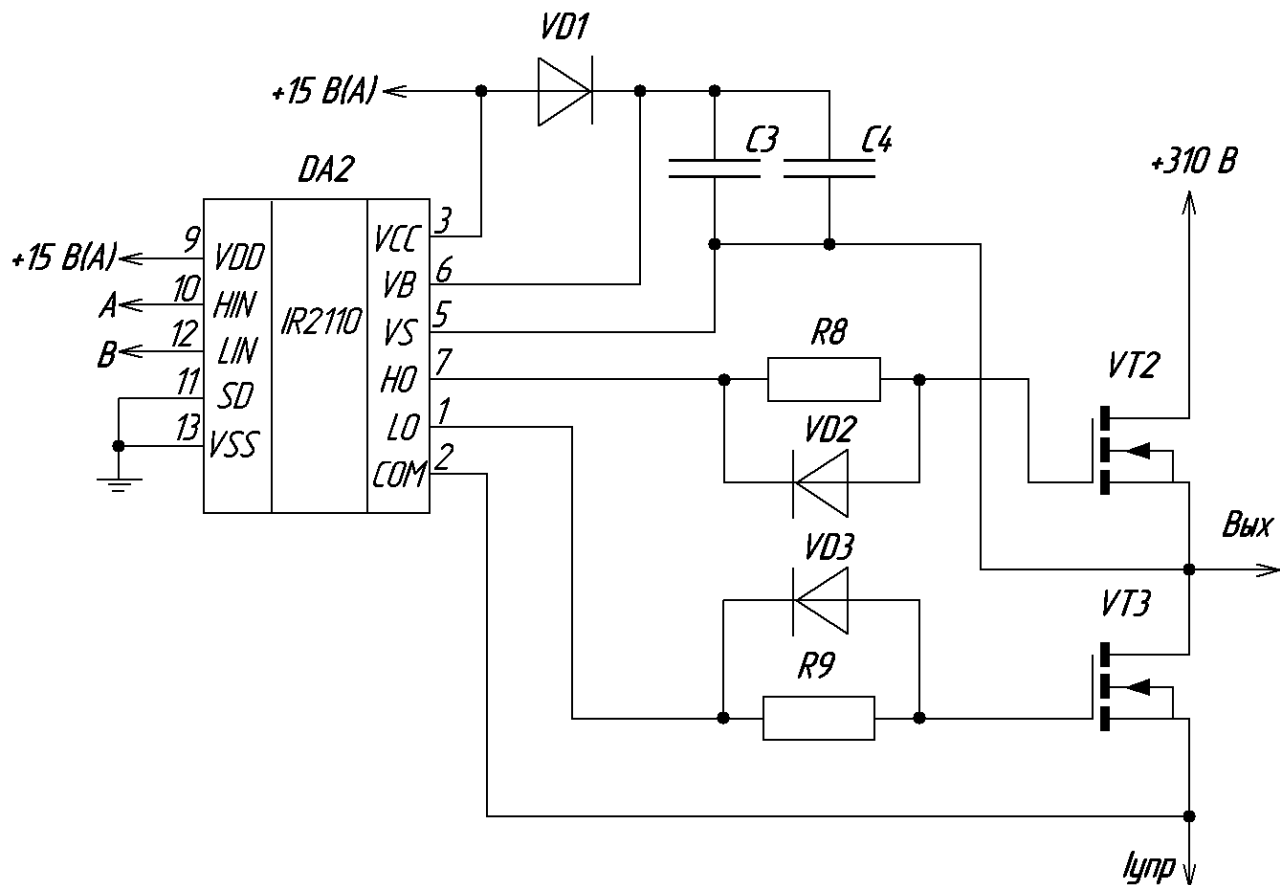


Рисунок 3.6 — Схема включения драйвера полумоста

На вход VCC подаётся напряжение питания схемы, по документации IR2110 это напряжение должно быть в пределах от 10 В до 20 В. Уровень напряжения, поданный на вход VB, определяет то напряжение, которым будет открываться MOSFET транзистор. Вход VDD — это логическое питание, оно должно быть в пределах между 3 В и 20 В. От величины напряжения, поданного на вход VDD зависит уровень логической единицы входных сигналов. Эта зависимость показана на рисунке 3.7.

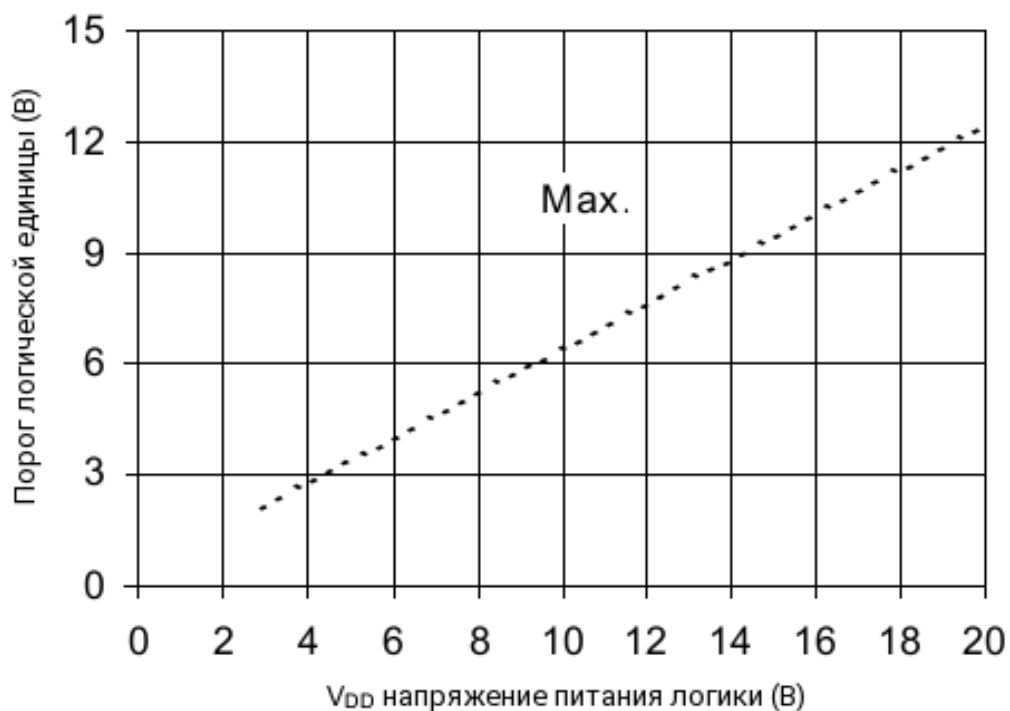


Рисунок 3.7 — Зависимость уровня логической единицы от напряжения питания

Для питания логики будем использовать напряжение равное +15 В, тогда входной порог логической единицы будет около девяти вольт. Возможность изменять логический уровень позволяет использовать драйвер полумоста IR2110 без преобразователей уровней для любого вида логики.

Выход VSS является землёй логики. Выходы VS и COM являются выходами возврата питания верхнего и нижнего уровней соответственно. Относительно этих выводов и задаётся управляющее напряжение, подаваемое на затворы транзисторов.

HIN и LIN это логические входы управления напряжением затвор-исток транзисторов. Высокий уровень сигнала на HIN означает, что производится управление верхним ключом, на вывод НО относительно вывода VS выводится управляющее напряжение высокого уровня. Низкий сигнал на HIN означает, что мы хотим отключить MOSFET верхнего уровня, то есть на НО осуществляется вывод низкого уровня. Высокий сигнал LIN означает, что мы хотим управлять нижним ключом, то есть на LO осуществляется вывод высокого уровня. Низкий сигнал LIN означает, что мы хотим отключить MOSFET нижнего уровня, то есть

на LO осуществляется вывод низкого уровня. Выход в LO считается относительно выхода COM.

SD является логическим входом останова. Когда уровень низкий, IR2110 включен — функция останова отключена. Когда этот вывод подан высокий уровень, отключается управление ключами.

Для удержания VT2 в открытом состоянии напряжение на его затворе должно быть больше, чем на истоке. Именно с этой целью используется конденсатор вольтодобавки C3 и это позволяет удерживать VT1 в открытом состоянии, поскольку запасенная в нем энергия в этот момент времени является питающим напряжением для верхнего плеча оконечного каскада микросхемы. Диод VD1 в этот момент времени не позволяет разрядиться C3 на шину питания самой микросхемы. Диод VD1 — «быстродействующий», с малым временем восстановления (не больше 100нс), например — UF4007.

Резисторы R8 и R9 это токоограничивающие затворные резисторы. VD2 и VD3 нужны для быстрой разрядки затворов транзисторов, чтобы миновать затворные резисторы и уменьшить время разрядки.

Как только управляющий импульс на выводе HIN заканчивается транзистор VT2 закрывается и открывается VT3, который снова подзаряжает конденсатор C3.

Для открытия и удержания транзистора в открытом состоянии достаточно использование электролитического конденсатора с номиналом 22 мкФ. Возьмём конденсатор ЕСАР, (К50-35 мини), 22 мкФ, 50 В. Для шунтирования электролитического конденсатора используется керамический конденсатор С4 номиналом 100 нФ. Возьмём конденсатор К10-17Б имп., 0,1 мкФ, х7R, 10%, 0805.

Для подачи управляющих импульсов на входы HIN и LIN используется мультивибратор, который построен на основе таймера LM555. Схема мультивибратора показана на рисунке 3.8.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

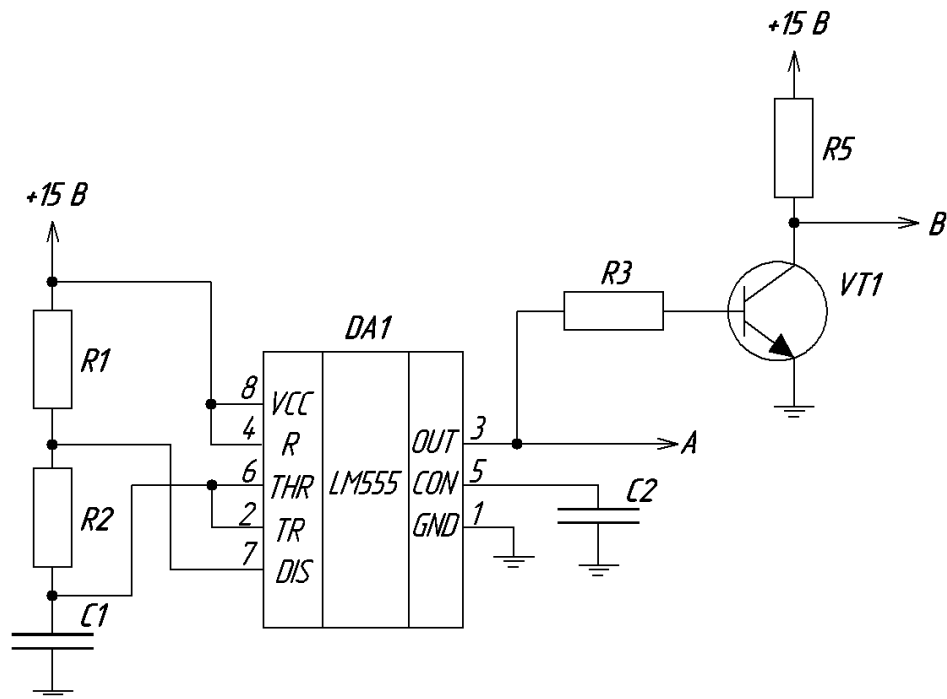


Рисунок 3.8 — Схема мультивибратора

При подаче питающего напряжения эта схема начинает выдавать на выходе OUT последовательность импульсов, длительность импульса $t_{И}$ и паузы $t_{П}$ может регулироваться с помощью резисторов R1, R2 и конденсатора C1.

$$t_{И} = 0,693 \cdot (R1 + R2) \cdot C1 \quad (3.55)$$

$$t_{П} = 0,693 \cdot R2 \cdot C1 \quad (3.56)$$

В виду того, что частоту преобразования мы приняли равной 20 кГц и равенства времени открытого состояния транзисторов верхнего и нижнего уровней $t_{И} = t_{П} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ с. Тогда можно приравнять формулы 58 и 59. Получим, что $R1 = R2$. Примем $R1 = R2 = 1000$ Ом. Тогда можно найти номинал конденсатора C1:

$$C1 = \frac{t_{П}}{0,693 \cdot R2} = \frac{2,5 \cdot 10^{-5}}{0,693 \cdot 1000} = 3,6 \cdot 10^{-8} \Phi \quad (3.57)$$

Номинальную ёмкость из стандартного ряда возьмём $C1=0,033$ мкФ. Тогда пересчитав, получим $R1=R2=1093$ Ом. Из стандартного ряда возьмём $R1=R2=1100$ Ом. Возьмём резисторы CF-25 (С1-4) 1 Вт, 1,1 кОм, $\pm 5\%$.

На выходе мультивибратора получаются импульсы для управления ключом верхнего уровня. Для того чтобы получить импульсы, которые можно использовать для управления ключом нижнего уровня используется схема с общим эмиттером

Вычислим минимальный коэффициент усиления транзистора по току исходя из значения входного тока логического входа микросхемы IR2110:

$$h_{21Э} = \frac{I_{BXIR2110}}{I_{ВЫХ \max LM555}} = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-3}} \geq 2 \cdot 10^{-4} \quad (3.58)$$

По данным параметрам подходит транзистор BC547:

$$h_{21} = 450;$$

$$U_{КЭ} = 45 \text{ В};$$

$$I_K = 100 \text{ мА};$$

Рассчитаем токоограничивающий базовый резистор $R3$ исходя из величины управляющего напряжения и максимального выходного тока LM555:

$$R3 = \frac{U_y}{I_{ВЫХ \max LM555}} = \frac{11}{200 \cdot 10^{-3}} = 55 \text{ Ом} \quad (3.59)$$

где, U_y — уровень напряжения управления микросхемы LM555 при питающем напряжении равном 15 В.

Выберем сопротивление $R1$ из стандартного ряда номинала 56 Ом.

Рассчитаем мощность, выделяемую на этом резисторе:

$$P_{R3} = I_{R3}^2 \cdot R3 = 0,2^2 \cdot 56 = 2,24 \text{ Вт}. \quad (3.60)$$

Выберем резистор SQP, 5 Вт, 56 Ом, 5%.

Так как входной ток драйвера полумоста IR2110 при низком уровне сигнала должен быть менее 1 мкА, рассчитаем значение резистора R5 для ограничения тока:

$$R5 = \frac{U_{II}}{I_{BXR2110BY}} = \frac{15}{40 \cdot 10^{-6}} = 375 \text{ кОм} \quad (3.61)$$

Выберем сопротивление R5 из стандартного ряда номинала 390 кОм.

Рассчитаем мощность, выделяемую на этом резисторе:

$$P_{R5} = I_{R5}^2 \cdot R5 = (40 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 390 \cdot 10^3 = 6,24 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}. \quad (3.62)$$

Выберем резистор CF-25, (C1-4), 0,25 Вт, 390 кОм, 5%.

Таким образом выход программируемого таймера DA1 OUT подключается к входу HIN драйвера полумоста DA2, а ко входу LIN подключается выход схемы с общим эмиттером.

Схема мультивибратора и схема управления полумостом будут питаться отдельным источником питания и эти схемы будут подключены к отдельной земляной шине.

Точно так же, как показано на рисунке 3.3, подключается второй драйвер полумоста для управления транзисторами VD5 и VD6. Отличие в подключении лишь в том, что вход HIN драйвера полумоста DA4 будет подключен к выходу схемы с общим эмиттером, а вывод LIN будет подключен к выходу программируемого таймера DA1 OUT.

Таким образом, в первый момент времени, когда мультивибратор выдаст импульс высокого уровня, будут открыты транзисторы VT2 и VT6, а транзисторы VT3 и VT5 будут закрыты. Во второй период времени, когда мультивибратор выдаст импульс низкого уровня, откроются транзисторы VT3 и VT5, а транзисторы VT2 и VT6 закроются.

3.7 Расчёт выпрямителя.

Схема выпрямителя показана на рисунке 3.9.

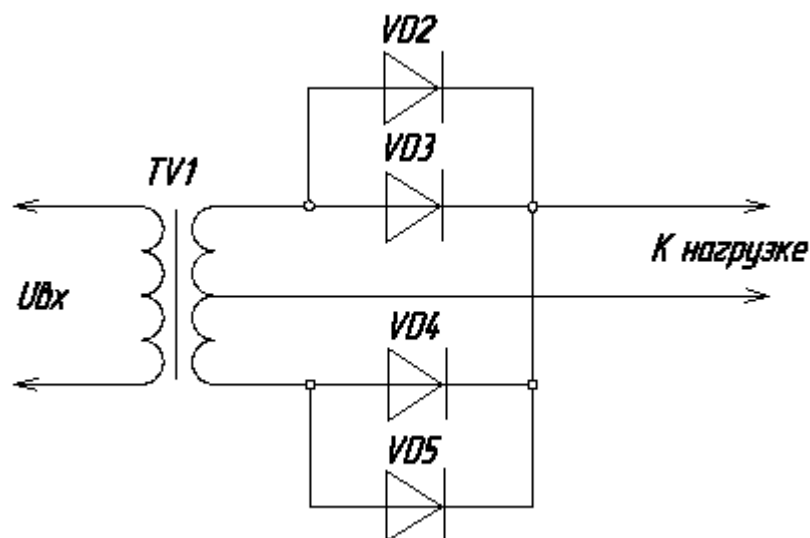


Рисунок 3.9 — схема выпрямителя

Для выпрямления в цепи вторичной обмотки трансформатора используется двухполупериодный выпрямитель со средней точкой. В данной разрабатываемой схеме не используется полный мостовой выпрямитель потому, что на таком типе выпрямителя падает вдвое больше напряжения в сравнении с выпрямителем со средней точкой. Связано это с тем, что в мостовом выпрямителе ток за полупериод протекает через два диода, вместо одного диода как в выпрямителе со средней точкой. В качестве выпрямительного диода можно использовать диод Шоттки 242NQ030PbF с максимально допустимым средним выпрямленным током 240 А. Для того, чтобы иметь возможность использовать данный диод в цепи с током 400 А, можно использовать два диода соединённых параллельно.

3.8 Расчёт фильтра.

Схема фильтра показана на рисунке 3.10.

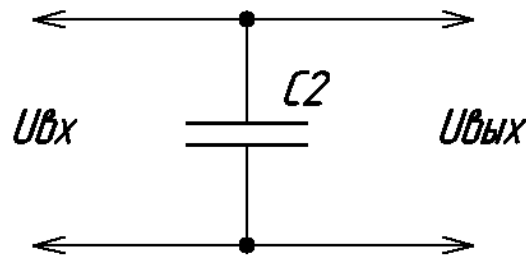


Рисунок 3.10 — Схема фильтра

В качестве фильтра будет использоваться однозвенный С-фильтр. Найдём коэффициент пульсаций q_1 на выходе выпрямителя [7]:

$$q_1 = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = 0,67 \quad (3.63)$$

где, $m=2$ — фазность выпрямителя.

Требуемый коэффициент сглаживания фильтра S_{CF} можно найти:

$$S_{CF} = \frac{q_1}{q_2} = \frac{0,67}{0,3} = 2,23 \quad (3.64)$$

где, $q_2=0,3$ — коэффициент пульсаций на выходе фильтра

Тогда номинал конденсатора C_2 можно найти по формуле:

$$C_2 = \frac{I_2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot S_{CF} \cdot U_H} = \frac{400}{2 \cdot \pi \cdot 20000 \cdot 2 \cdot 2,23 \cdot 1,4} = 5,097 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}, \quad (3.65)$$

Возьмём номинал конденсатора $C_2=6800\text{мкФ}$. Возьмём конденсатор ЕСАР (К50-35), 6800 мкФ, 16 В.

3.9 Разработка электрической принципиальной схемы внутреннего источника питания источника тока.

Для питания схемы необходимо получить +310 В выпрямленного напряжения. Для получения +310 В выпрямленного напряжения можно использовать схему, показанную на рисунке 3.11.

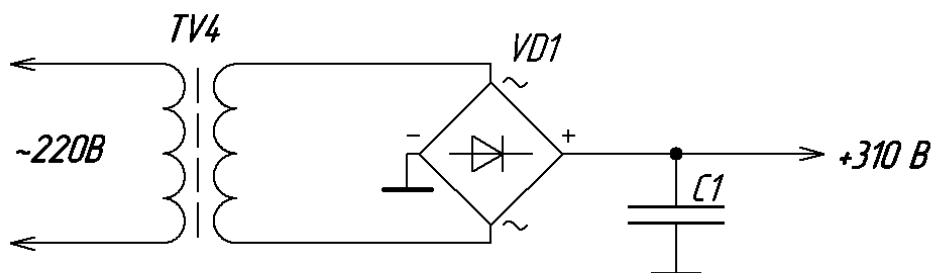


Рисунок 3.11 — Схема источника питания на +310 В

Схема будет состоять из трансформатора с коэффициентом трансформации равным единице. Этот трансформатор необходим для осуществления гальванической развязки. Затем полученное напряжение будет выпрямляться с помощью диодного моста. Конденсатор С1 необходим для сглаживания пульсаций.

Для начала найдём мощность, которую необходимо снимать с данного источника питания:

$$P_{ист1} = U_1 \cdot I_1 = 310 \cdot 3,234 = 1002,5 \text{ Вт} \quad (3.66)$$

где, U_1 — напряжение в цепи первичной обмотки трансформатора,

I_1 — ток в цепи первичной обмотки трансформатора.

По полученному значению подберём трансформатор. Возьмём трансформатор ОСЗР-2,0-220/220 у которого номинальная мощность равна 2 кВт.

Так как на выходе источника питания нужно получить напряжение 310 В, диодный мост должен быть рассчитан на обратное напряжение не ниже 310 В. Возьмём диодный мост GBJ2510-F с максимальным обратным напряжением равным 1000 В, максимальным выпрямленным за полупериод током равным 25 А. Получилось с запасом.

Конденсатор С1 рассчитывается из условия не менее 1 мкФ на 1 Вт выходной мощности, поэтому выбираем конденсатор на 2200 мкФ. Возьмём конденсатор ЕСАР (К50-35), 2200 мкФ, 400 В.

Так же для разрабатываемой схемы нужен источник питания на + 15 В и - 15 В. Схема данного источника питания показана на рисунке 3.12.

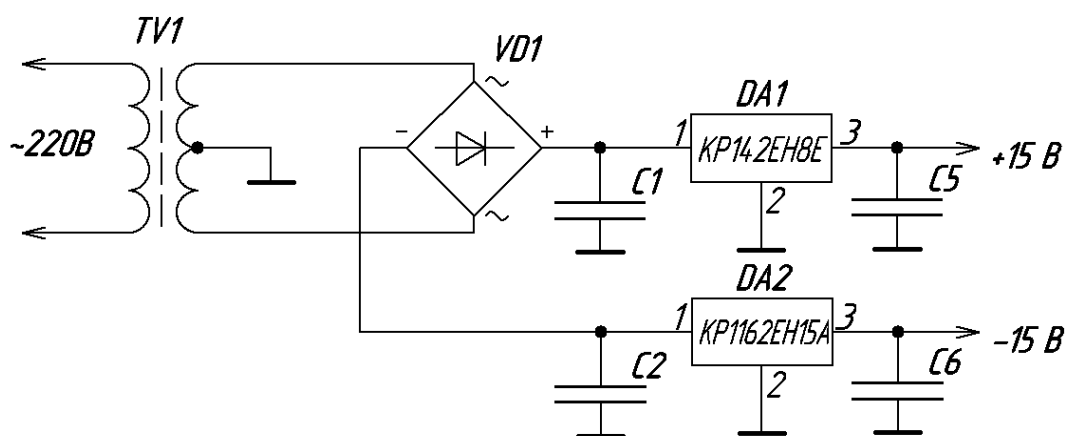


Рисунок 3.12 — Схема источника питания на +15 В и -15 В

Схема будет состоять из трансформатора с выводом средней точки. Этот трансформатор необходим для преобразования сетевого напряжения и осуществления гальванической развязки. Затем полученное напряжение будет выпрямляться с помощью диодного моста. Затем полученное напряжение будет стабилизироваться с помощью двух ИМС стабилизаторов.

Данным источником питания будет питаться операционный усилитель AD8066. По документации ток питания операционного усилителя AD8066 не превышает 6,4 мА. Относительно этой величины с запасом будем выбирать компоненты.

Возьмём трансформатор ТП115-К12 (2x18 В, 0,5 А). Данный трансформатор имеет 18 В на двух вторичных обмотках и способен выдавать ток до 0,5 А на каждой обмотке.

В виду того, что нужно выпрямить напряжение величиной 18 В, диодный мост должен быть рассчитан на обратное напряжение не ниже 18 В. Возьмём диодный мост GBU801 с максимальным обратным напряжением 100 В и выходным током 8 А. Получилось с запасом.

Для стабилизации напряжения +15 В будем использовать стабилизатор КР142ЕН8Е. Эта ИМС стабилизирует напряжение +15 В, способна питать током до 1 А и имеет максимальное входное напряжение +30 В. Производитель рекомендует на вход схемы устанавливать керамический конденсатор номинальной ёмкостью не менее 2,2 мкФ, а на выход — не менее 0,1 мкФ. Возьмём $C1=2,2$ мкФ и $C5=0,1$ мкФ. Возьмём конденсаторы ЕСАР (К50-35 мини), 22 мкФ, 50 В и К10-17Б имп., 0,1 мкФ x7R, 10%, 0805.

Для стабилизации напряжения -15 В будем использовать ИМС стабилизатора напряжения КР1162ЕН15А. Эта ИМС стабилизирует напряжение -15В, способна питать током до 1,5 А и имеет максимальное входное напряжение питания до 40 В. Производитель рекомендует на вход схемы устанавливать керамический конденсатор номинальной ёмкостью не менее 2,2 мкФ, а на выход — не менее 0,1 мкФ. Возьмём $C2=2,2$ мкФ и $C6=0,1$ мкФ. Возьмём конденсаторы ЕСАР (К50-35 мини), 22 мкФ, 50 В и К10-17Б имп., 0,1 мкФ x7R, 10%, 0805.

Так же для разрабатываемого устройства необходимо напряжение питания +9 В. Схема данного источника питания показана на рисунке 3.13.

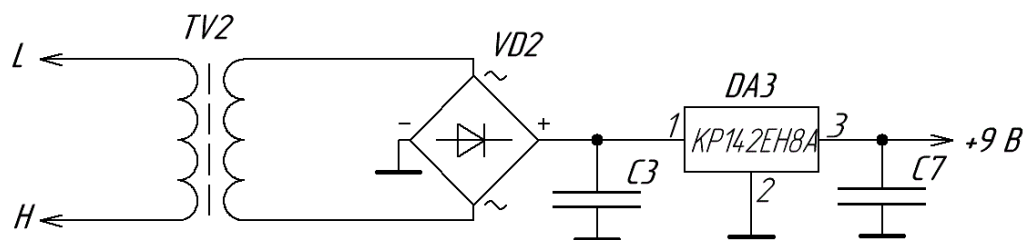


Рисунок 3.13 — Схема источника питания +9 В

Схема будет состоять из трансформатора. Этот трансформатор необходим для преобразования сетевого напряжения и осуществления гальванической развязки. Затем полученное напряжение будет выпрямляться с помощью диодного моста. Затем полученное напряжение будет стабилизироваться с помощью ИМС стабилизатора.

Производитель рекомендует питать микропроцессорную плату Arduino напряжением от +7 В до +12 В. Будем питать напряжением +9 В. Микропроцессорная плата Arduino Uno потребляет не более 80 мА. Относительно этой величины с запасом будем выбирать компоненты.

Возьмём трансформатор ТТП-15 (10В, 1.5А). У данного трансформатора напряжение на вторичной обмотке равно 10 В. Данный трансформатор способен выдавать ток до 1,5 А.

В виду того, что нужно выпрямить напряжение величиной 10 В, диодный мост должен быть рассчитан на обратное напряжение не ниже 10 В. Возьмём диодный мост GBU801 с максимальным обратным напряжением 100 В и выходным током 8 А. Получилось с запасом.

Для стабилизации напряжения +9 В будем использовать стабилизатор КР142ЕН8А. Эта ИМС стабилизирует напряжение +9 В, способна питать током до 1,5 А и имеет максимальное входное напряжение питания до 35 В.. Производитель рекомендует на вход схемы устанавливать керамический конденсатор номинальной ёмкостью не менее 2,2 мкФ, а на выход — не менее 0,1 мкФ. Возьмём $C3=2,2$ мкФ и $C7=0,1$ мкФ. Возьмём конденсаторы ЕСАР (К50-35 мини), 22 мкФ, 50 В и К10-17Б имп., 0,1 мкФ х7R, 10%, 0805.

Для разрабатываемого устройства необходимо напряжение питания +15 В. Схема данного источника питания показана на рисунке 3.14.

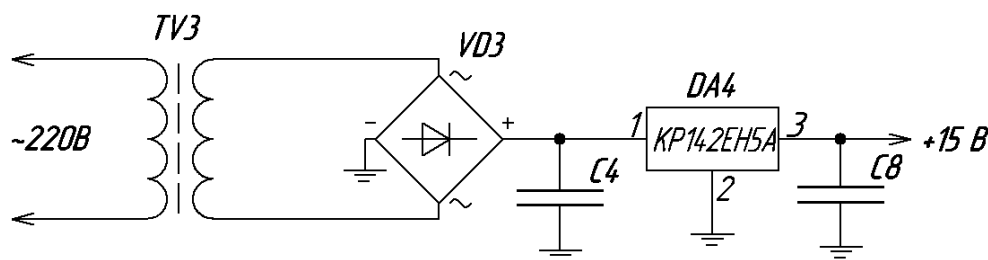


Рисунок 3.14 — Схема источника питания +15 В

Схема будет состоять из трансформатора. Этот трансформатор необходим для преобразования сетевого напряжения и осуществления гальванической развязки. Затем полученное напряжение будет выпрямляться с помощью диодного моста. Далее полученное напряжение будет стабилизироваться с помощью ИМС стабилизатора.

Напряжением +15 В питаются два драйвера полумоста и мультивибратор.

Возьмём трансформатор ТТП-40 (25 В, 1,5 А). У этого трансформатора напряжение на вторичной обмотке равно 25 В. Данный трансформатор способен выдавать ток до 1,5 А.

В виду того, что нужно выпрямить напряжение величиной 25 В, диодный мост должен быть рассчитан на обратное напряжение не ниже 25 В. Возьмём диодный мост GBU801 с максимальным обратным напряжением 100 В и выходным током 8 А. Получилось с запасом.

Для стабилизации напряжения +15 В будем использовать стабилизатор КР142ЕН8Е. Эта ИМС стабилизирует напряжение +15 В, способна питать током до 1 А и имеет максимальное входное напряжение +30 В. Производитель рекомендует на вход схемы устанавливать керамический конденсатор номинальной ёмкостью не менее 2,2 мкФ, а на выход — не менее 0,1 мкФ. Возьмём $C4=2,2$ мкФ и $C8=0,1$ мкФ. Возьмём конденсаторы ЕСАР (К50-35 мини), 22 мкФ, 50 В и К10-17Б имп., 0,1 мкФ х7R, 10%, 0805.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

4 Разработка и исследование модели источника тока в программе моделирования NI Multisim.

4.1 Разработка модели силовой части источника тока.

Проведём моделирование схемы источника тока в программе NI Multisim. Модель схемы источника тока показана на рисунке 4.1. Номиналы элементов схемы соответствуют расчётным.

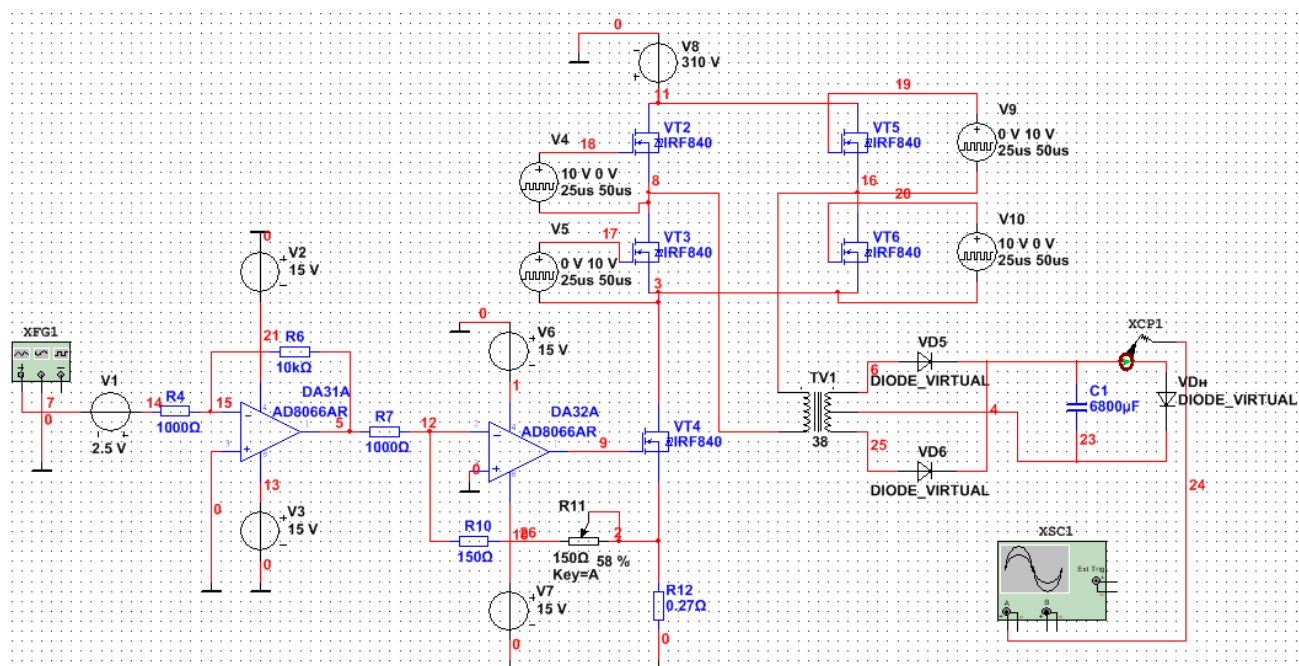


Рисунок 4.1 — Модель схемы источника тока в программе NI Multisim

В модели источника тока транзисторы моста и транзистор источника тока заменены на IRF840, в связи с тем, что в программе NI Multisim отсутствует модель MOSFET транзистора IRFP460. IRF840 был выбран в связи с тем, что он наиболее похож по своим параметрам на IRFP460: максимальное напряжение сток исток — 500 В, максимальный ток сток — исток — 8 А. Драйвер полумоста IR2110 заменён на два генератора импульсов из-за того, что в программе NI Multisim отсутствует модель драйвера полумоста. По этой же причине были заменены диоды выпрямителя со средней точкой на модель виртуального диода.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист

53

4.2 Исследование модели источника тока.

Произведём моделирование схемы и посмотрим формы сигналов при помощи осциллографа. Для измерения импульсов тока используем пробку тока с масштабом 1мВ/1 мА.

Результат измерения тока на выходе схемы при прямоугольном управляющем сигнале амплитудой 5 В представлен на рисунке 4.2.

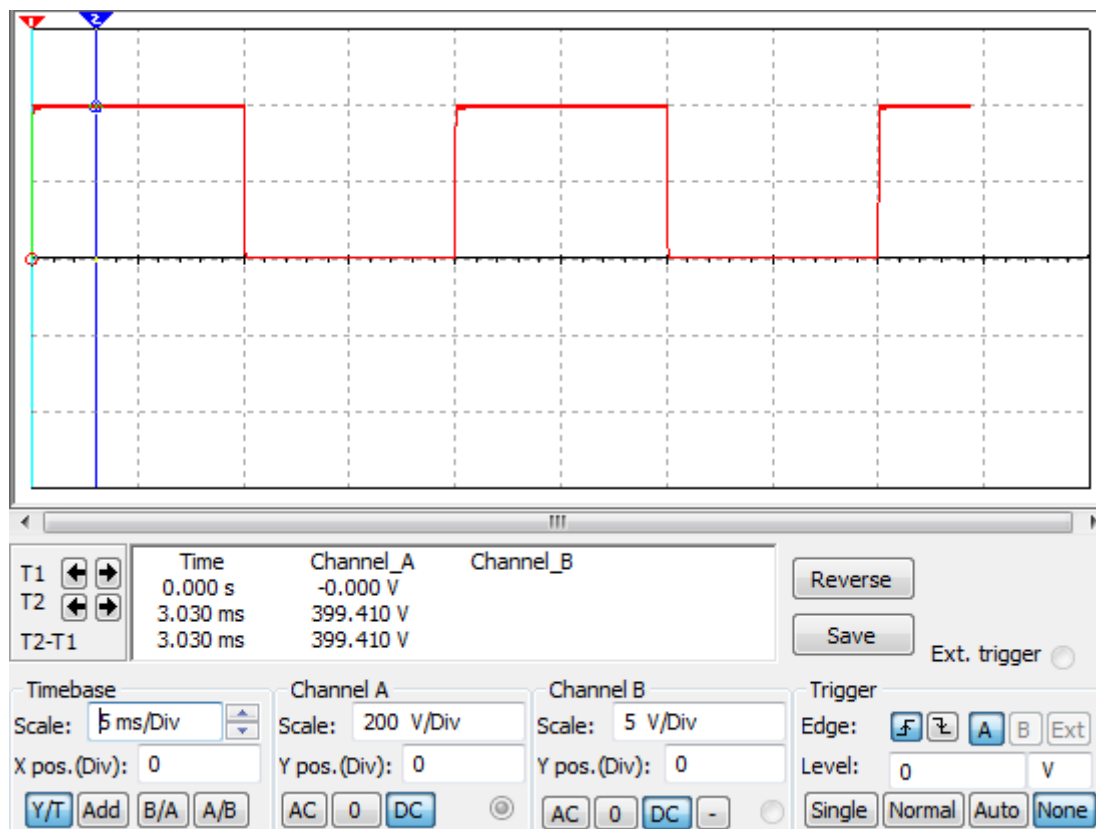


Рисунок 4.2 — Осциллограмма тока, протекающего через нагрузку

Как видно по полученной осциллограмме, амплитуда импульсов равна 399,4 А и близка к той, что задана техническим заданием — 400 А. Произведём анализ модели схемы, построим зависимость выходного тока от входного напряжения. Зададим амплитуду управляющего сигнала 1 В. Осциллограмма выходного тока при входном напряжении 1 В показана на рисунке 4.3.

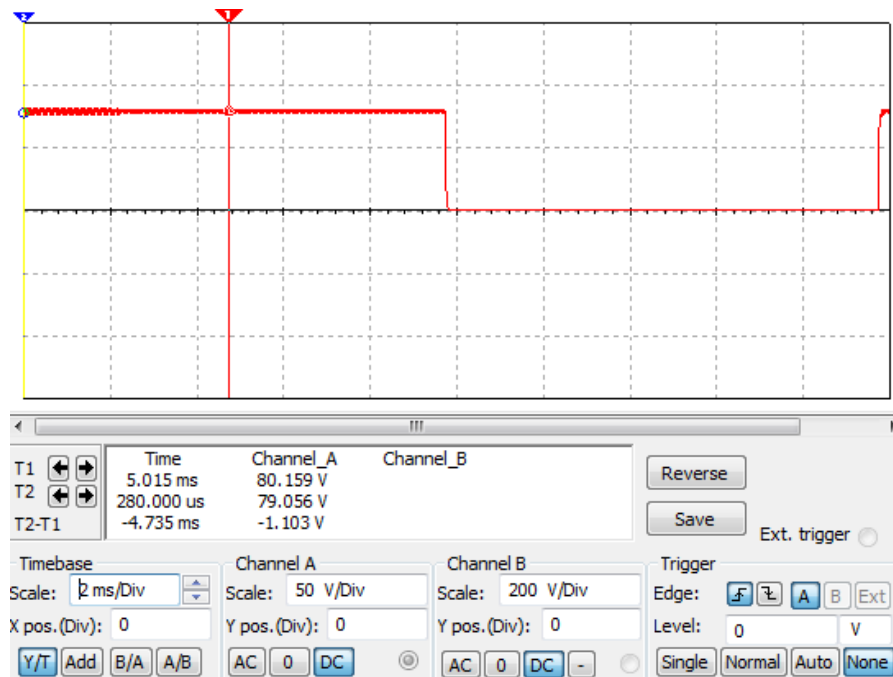


Рисунок 4.3 — Осциллограмма выходного тока, при входном напряжении 1 В

При входном напряжении 1 В, амплитуда выходного тока составляет 80,16 А.

Измерим выходное напряжение при амплитуде входного напряжения 2 В. Осциллограмма выходного тока при входном напряжении 2 В показана на рисунке 4.4.

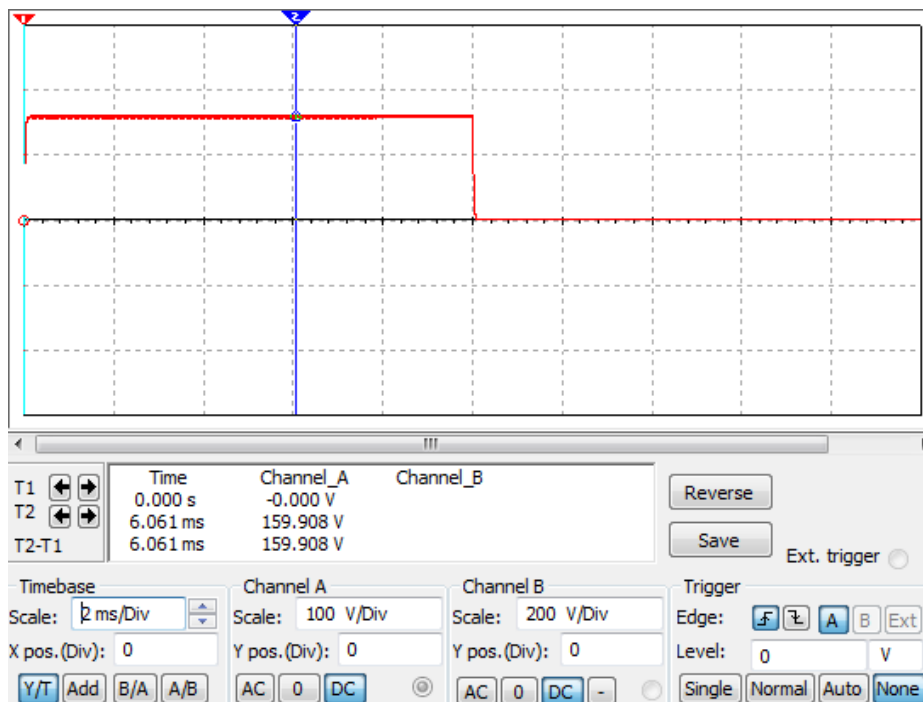


Рисунок 4.4 — Осциллограмма выходного тока, при входном напряжении 1 В

При входном напряжении 2 В, амплитуда выходного тока составляет 159,9 А.

Измерим выходное напряжение при амплитуде входного напряжения 3 В. Осциллограмма выходного тока при входном напряжении 3 В показана на рисунке 4.5.

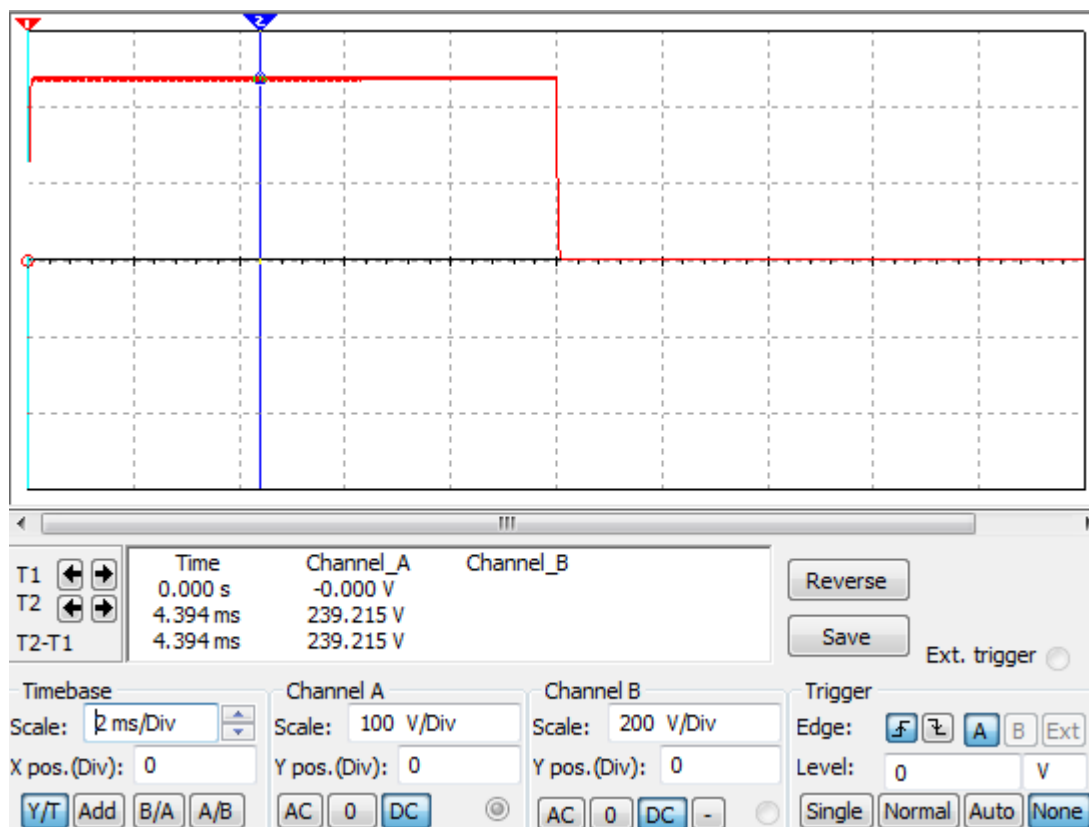


Рисунок 4.5 — Осциллограмма выходного тока, при входном напряжении 3 В

При входном напряжении 3 В, амплитуда выходного тока составляет 239,22 А.

Измерим выходное напряжение при амплитуде входного напряжения 4 В. Осциллограмма выходного тока при входном напряжении 4 В показана на рисунке 4.6.

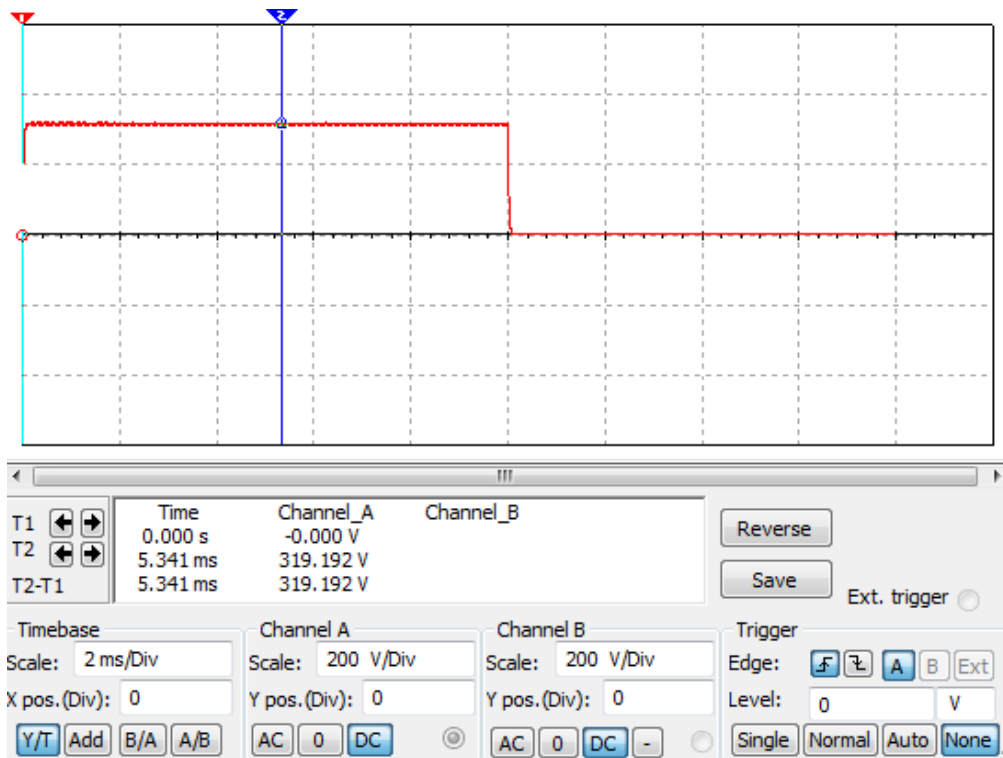


Рисунок 4.6 — Осциллограмма выходного тока, при входном напряжении 4 В

При входном напряжении 4 В, амплитуда выходного тока составляет 319,19 А.

По полученным данным построим график зависимости выходного тока от входного напряжения. Этот график показан на рисунке 4.7.

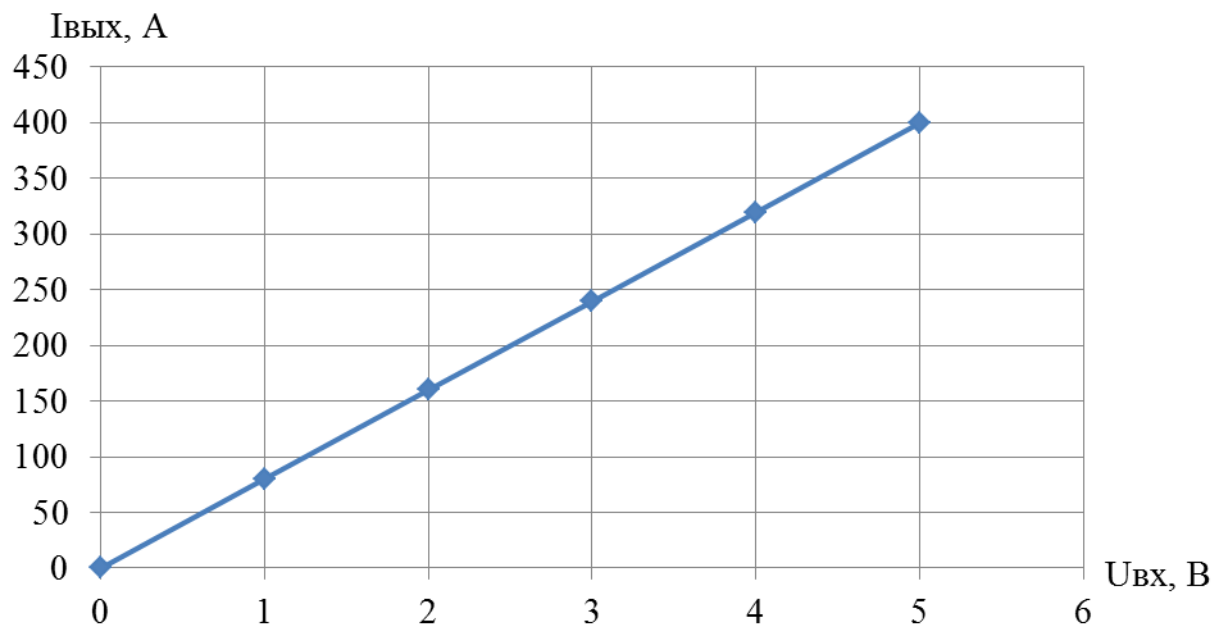


Рисунок 4.7 — График зависимости выходного тока от входного напряжения

Как видно из графика зависимость является линейной, значит схема работает правильно.

Подадим на вход схемы управляющий сигнал полусинусоидальной формы амплитудой 5 В. Осциллограмма выходного тока показана на рисунке 4.8.

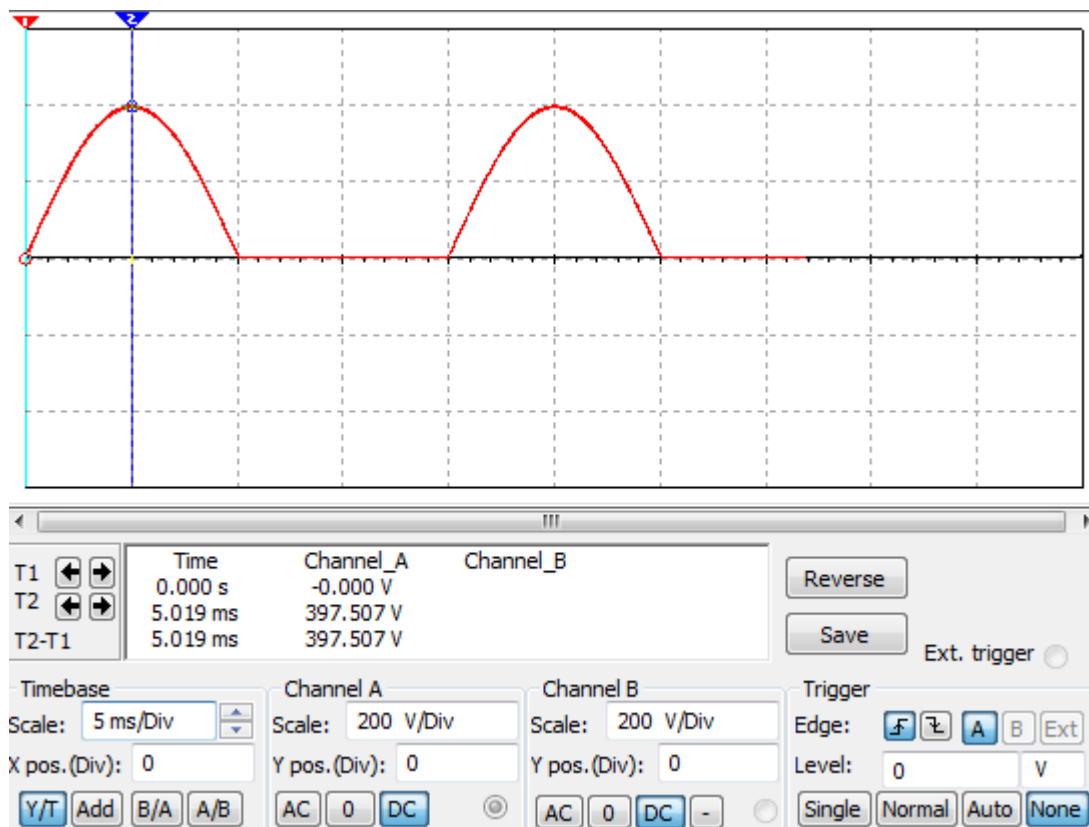


Рисунок 4.8 — Осциллограмма выходного тока, при входном напряжении полусинусоидальной формы

Судя по осциллограмме, схема источника тока способна работать с управляющим сигналом различной формы, не только с прямоугольными импульсами.

Как видно по осциллограмме выходного тока, показанного на рисунке 4.2, в выходном токе присутствуют пульсации. Определим амплитуду пульсаций для прямоугольного сигнала. Форма пульсаций для выходного тока амплитудой 400 А показана на рисунке 4.9.

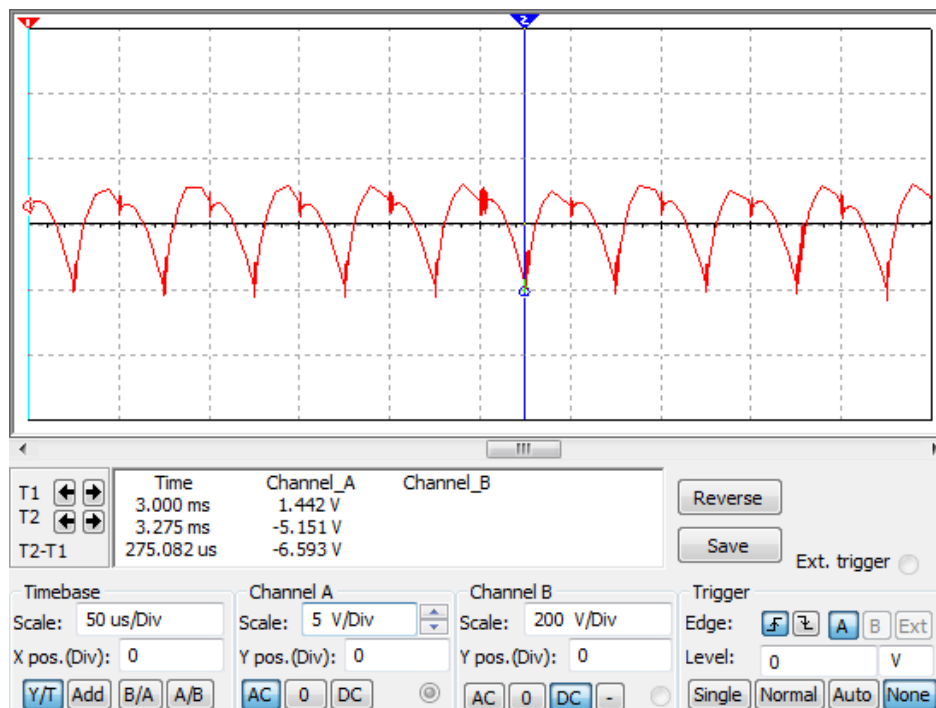


Рисунок 4.9 — Осциллограмма пульсаций выходного тока амплитудой 400 А

Как видно по осциллограмме амплитуда пульсаций равна 5,15 А, что составляет около одного процента от величины выходного тока разрабатываемой схемы.

Форма пульсаций для выходного тока амплитудой 80 А, когда на вход схемы подано управляющее напряжение амплитудой 1 В, показана на рисунке 4.10.

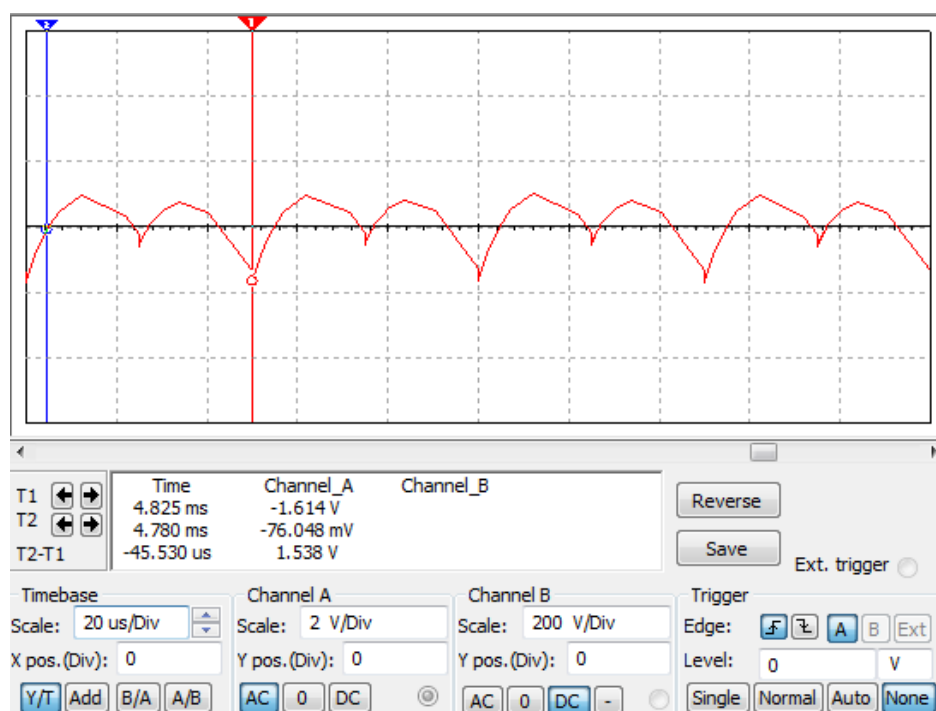


Рисунок 4.10 — Осциллограмма пульсаций выходного тока амплитудой 80 А

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Как видно по осциллограмме амплитуда пульсаций равна 1,614 А. Величина пульсаций для других значений выходного тока показана на графике зависимости амплитуды пульсаций $I_{\text{ПУЛЬС}}$ от амплитуды выходного тока $I_{\text{ВЫХ}}$. Этот график показан на рисунке 4.11.

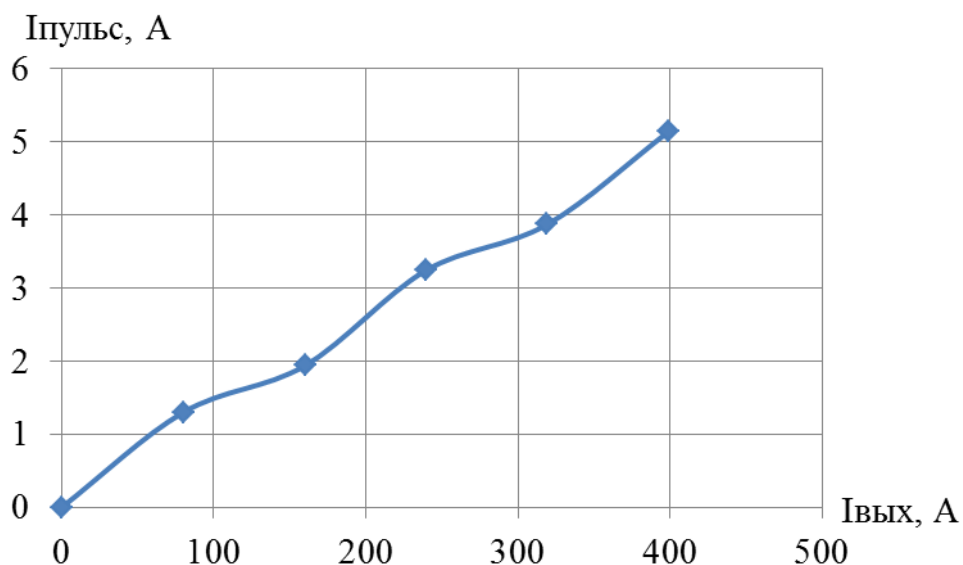


Рисунок 4.11 — График зависимости амплитуды пульсаций от выходного тока

Как видно из графика, зависимость имеет почти линейный характер, значит относительная погрешность выходного тока не зависит от величины выходного тока.

5 Разработка программы управляющего контроллера.

5.1 Разработка алгоритма программного обеспечения контроллера.

Схема алгоритма программы управляющего контроллера показана на рисунке 5.1.

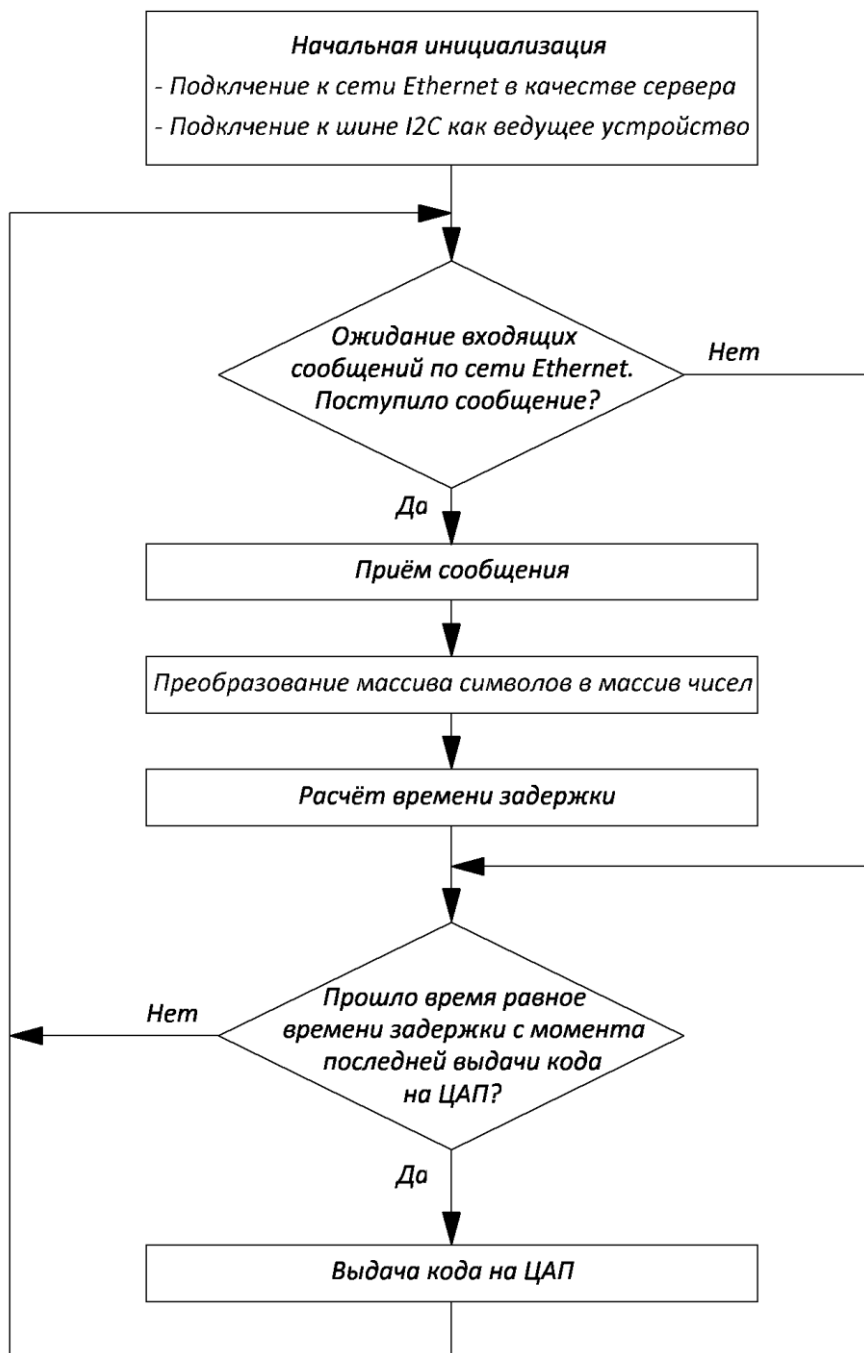


Рисунок 5.1 — Схема алгоритма управляющего контроллера

В первую очередь во время запуска программы необходимо произвести подключение контроллера к сети Ethernet. Контроллеру присваиваются MAC и IP адрес. Далее происходит подключение к шине I2C в качестве ведущего устройства.

После начальной инициализации контроллера происходит включение ожидания входящих сообщений по сети Ethernet. При поступлении нового сообщения происходит его приём. Данные по сети Ethernet будут передаваться в виде чисел, соответствующих кодам символов в таблице кодировки ASCII. Такое представление данных не подходит для передачи цифро-аналоговому преобразователю. Полученные по сети Ethernet данные необходимо преобразовать. После преобразования массива данных, происходит расчёт времени задержки. Время задержки является обратной величиной от произведения частоты и числа точек, выдаваемых за период. Величины частоты и числа точек так же принимаются с компьютера. Время задержки — это время между двумя последовательными выдачами кода на ЦАП. Если по сети Ethernet не поступает новое сообщение, то приём сообщения, преобразование массива данных и расчёт времени задержки пропускаются. Это нужно для того, чтобы вышеописанная часть алгоритма не выполнялась каждый цикл, а лишь только при поступлении нового массива данных.

Затем происходит проверка времени, прошедшего с последней выдачи кода на ЦАП. Если с последней выдачи кода на ЦАП прошло время равное или больше времени задержки, то происходит выдача кода на ЦАП.

На этом цикл контроллера заканчивается.

5.2 Разработка кода блока обмена данными между контроллером и компьютером.

Обмен данными между компьютером и контроллером будет осуществляться по сети Ethernet. Работа с сетью начинается с подключения библиотек SPI и Ethernet. Библиотека SPI даёт возможность работать с интерфейсом SPI, через который обмениваются данными плата Arduino и

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

Ethernet Shield. Библиотека Ethernet упрощает работу прикладного программиста с подключением к сети Ethernet по протоколу TCP/IP. Не нужно вручную описывать работу протокола: настройка соединения, приём и передача данных.

Код, отвечающий за подключение контроллера к сети Ethernet представлен ниже.

```
EthernetServer server(200);  
Ethernet.begin(mac, ip);  
server.begin().
```

Подключение к сети и присвоение MAC и IP адреса осуществляется командой Ethernet.begin. Команда EthernetServer server инициализирует контроллер в сети как сервер. Команда server.begin запускает ожидание входящих соединений.

О подключении нового клиента можно узнать с помощью команды client.connected. Команда client.available возвращает количество непрочитанных байт, с помощью этой команды можно узнать о поступлении нового сообщения с компьютера. При поступлении нового сообщения его чтение осуществляется командой client.read.

5.3 Разработка кода для управления цифро-аналоговым преобразователем.

Прежде чем передавать код цифро-аналоговому преобразователю его нужно получить, путём преобразования принятых по сети Ethernet символов в кодировке ASCII в массив с числами. Размер массива, содержащий данные, описывающие генерируемые импульсы, примем равным 401: 400 элементов массива под данные, описывающие генерируемые импульсы и два под частоту и число точек, выдаваемых за период. Такой размер массива выбран из-за ограничений оперативной памяти микроконтроллера. Код программы, отвечающий за преобразование, приведён ниже.

Затем начинается цикл чтения и преобразования данных. Для организации цикла, используется цикл со счётчиком for. Число итераций равно числу элементов массива, содержащего коды для ЦАП, помноженному на пять. Именно пятью символами, принимаемыми по сети Ethernet, вместе с разделительной запятой, описывается одна кодовая комбинация, состоящая из четырёх десятичных разрядов. В цикле, если принятый символ не равен запятой, происходит запись принятого символа в дополнительный массив midcode. В этом массиве собирается одна кодовая комбинация из последовательности чисел, соответствующих кодам символов в таблице кодировки ASCII. При этом, при занесении считанного с сети Ethernet символа в массив в ячейку n в ячейку n+1 записывается символ «<», который точно не может быть передан с компьютера. Сделано это для того, чтобы иметь возможность однозначно определить число знаков, занесённых в массив midcode. Если считывается символ «,» происходит преобразование набора символов, записанных в массив midcode, в число, при этом при преобразовании учитывается число элементов в массиве midcode, благодаря чему правильно выбираются веса разрядов.

Преобразование символа в кодировке ASCII в число осуществляется с помощью функции chartoint. Код программы этой функции приведён ниже.

```
int chartoint (int element) {  
    if (element == 48){  
        return 0;  
    } else if (element == 49){  
        return 1;  
    }else if (element == 50){  
        return 2;  
    }else if (element == 51){  
        return 3;  
    }else if (element == 52){  
        return 4;  
    }else if (element == 53){  
        return 5;  
    }else if (element == 54){  
        return 6;  
    }else if (element == 55){  
        return 7;  
    }else if (element == 56){  
        return 8;  
    }else if (element == 57){  
        return 9; } }
```

При вызове функции `chartoint` в качестве параметра нужно указать тот символ, который должен быть преобразован в число. Данная функция сравнивает заданный символ с таблицей кодировки ASCII и возвращает соответствующее этому символу число.

По завершению преобразования происходит расчёт времени задержки. В нулевой и первой ячейках массива `code` располагаются величины частоты и числа точек, которые должен выдавать ЦАП за период. Время задержки рассчитывается как обратная величина от произведения двух вышеназванных величин. При этом полученное время нужно умножить на 10^6 чтобы получить значение в микросекундах.

Код программы отвечающий за непосредственную выдачу массива точек на ЦАП приведён ниже.

```
if (( micros() – microstime ) >= delaytime){
    dac.setVoltage( code[a], false );
    microstime = micros();
    a++;
    if (a >= (numberofpoints+2)){
        a=2;
    } }
}
```

Выдача символа на ЦАП осуществляется при выполнении условия: с момента последней выдачи кода на ЦАП должно пройти время большее или равное времени задержки. Временная задержка в этом случае выполняется с помощью проверки условия, а не с помощью стандартной команды `delay` для того, чтобы не останавливать прослушивание Ethernet канала на время задержки. Обнуление счётчика номера ячейки в массиве происходит тогда, когда величина этого счётчика превышает величину числа принятых точек, которые описывают генерируемые импульсы.

6 Разработка программной части для компьютера.

6.1 Разработка кода для формирования таблицы данных, описывающей генерируемые импульсы.

Лицевая панель разрабатываемой программы показана на рисунке 6.1.

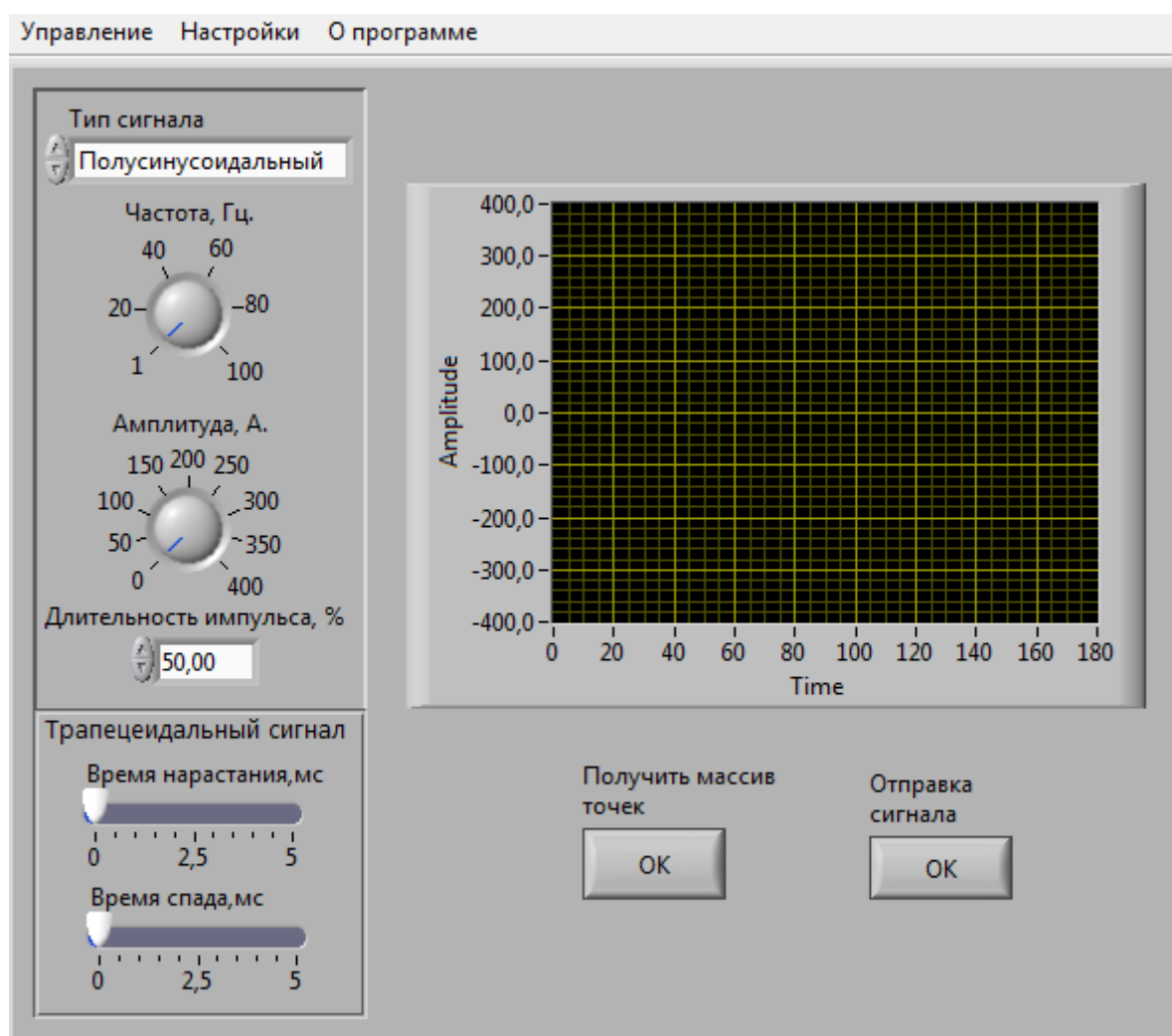


Рисунок 6.1 — Лицевая панель

На лицевой панели расположены элементы управления, с помощью которых можно задавать вид генерируемого сигнала, его частоту, амплитуду и длительность импульса. Для трапецеидального сигнала помимо регулирования частоты, амплитуды и длительности импульса, возможно регулировать время нарастания и время спада импульса. Генерация сигнала происходит по нажатию

кнопки «Получить массив точек», один период сгенерированного сигнала отображается на лицевой панели в функциональном блоке «XY Graph». После генерации сигнал отправляется на управляющий контроллер по нажатию кнопки «Отправка сигнала».

Работа приложения для компьютера, управляемого описанными выше элементами управления и формирующего таблицу данных, описывающих генерируемые импульсы, основана на событийно управляемом автомате. Работа же событийно управляемого автомата основана на Event Structure. Event Structure это конструкция, которая позволяет выполнять нужный код программы по совершению какого-либо события: нажатию кнопки, изменению значения переменной или закрытию окна приложения. Event Structure помещена в цикл While. Это сделано из-за того, что Event Structure исполняется только один раз, когда наступает событие, и если нужно повторить отслеживание событий, то необходимо повторить процедуру отслеживания события. Общий вид кода приложения показан на рисунке 6.2.

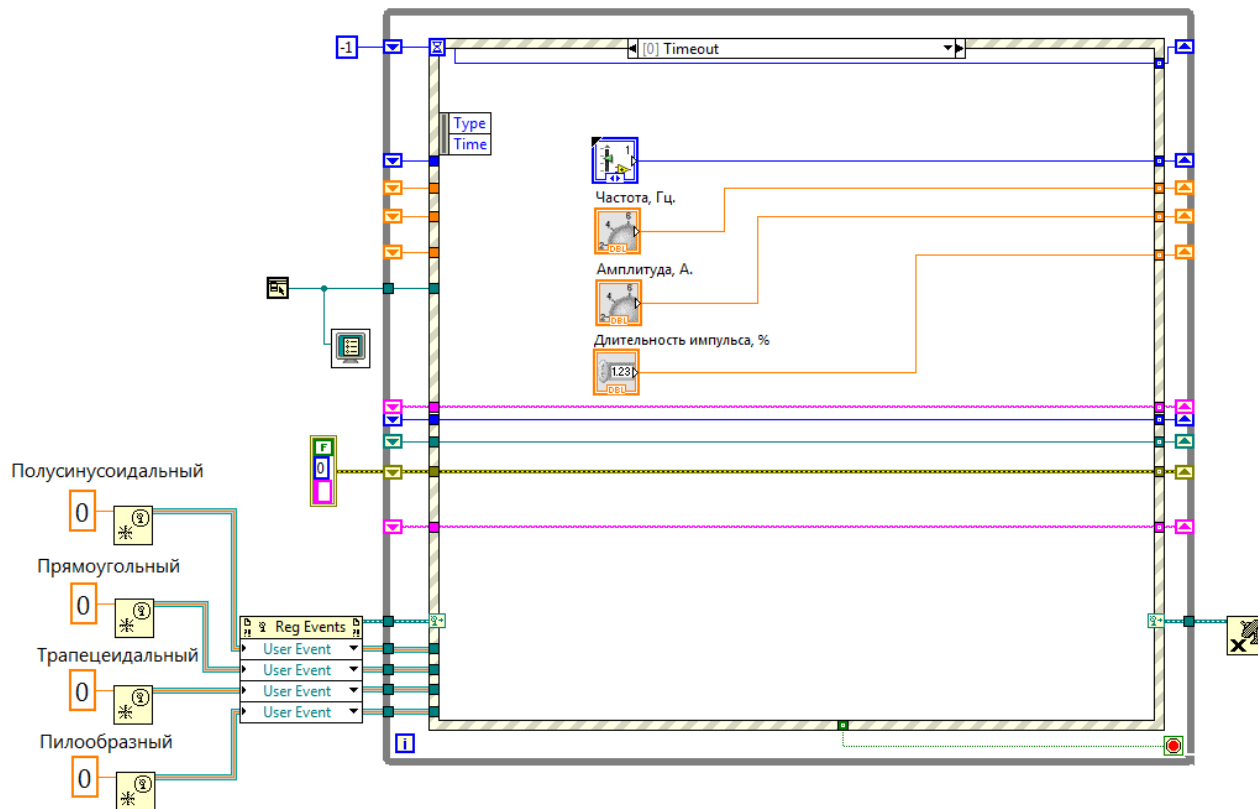


Рисунок 6.2 — Общий вид кода приложения

При запуске приложения в первую очередь происходит создание и регистрация пользовательских событий с помощью функциональных блоков Create User Event и Register for Events соответственно. Одновременно с этим происходит изменение основного меню со стандартного на пользовательское.

Работа приложения начнется, когда в разделе меню «Управление» будет выбран пункт «Старт». После начала работы приложения во вкладке Event Structure «Timeout» будет происходить считывание значений типа сигнала, частоты, амплитуды и длительности импульса и ожидание событий.

При нажатии на лицевой панели кнопки «Получить массив точек» приложение переходит к выполнению кода вкладки «Получить массив точек». Содержание этой вкладки показано на рисунке 6.3.

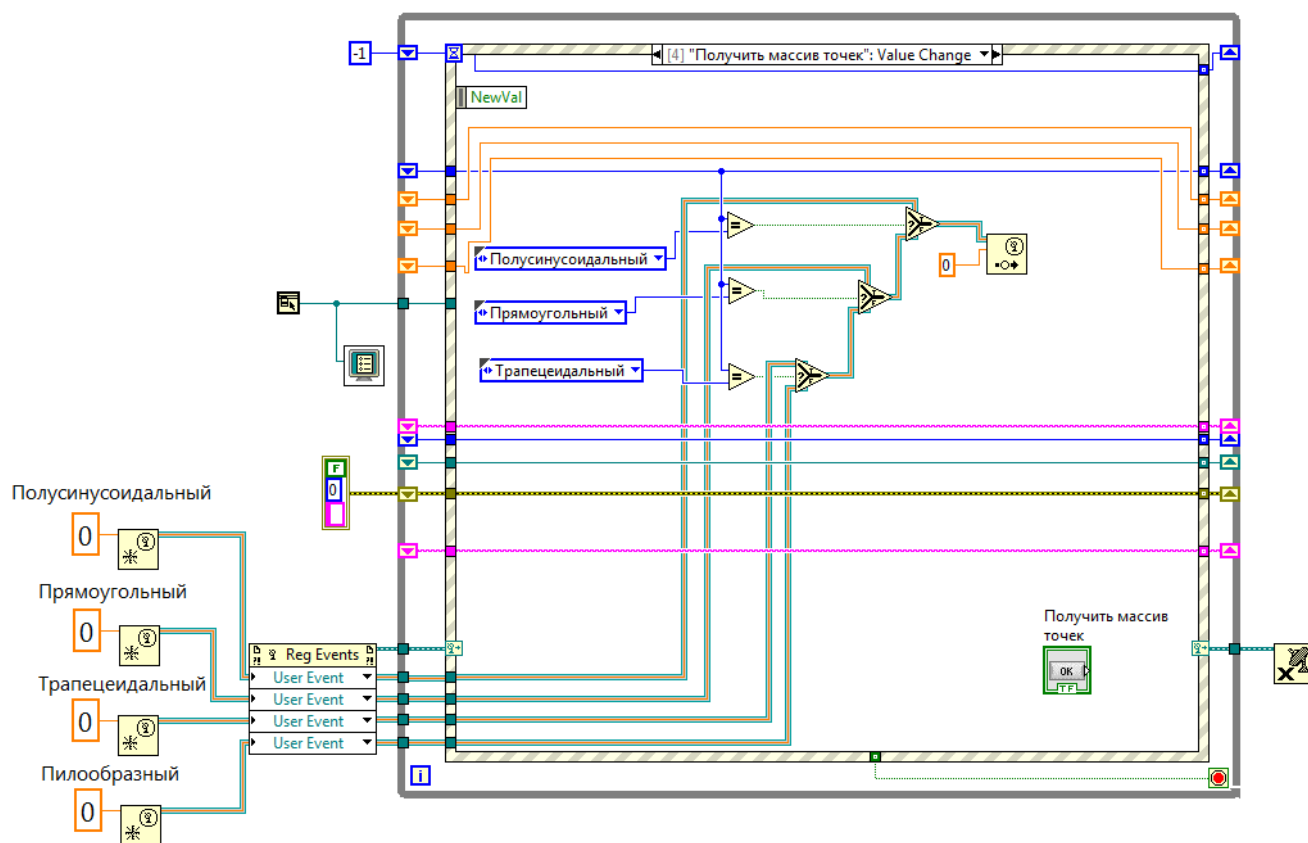


Рисунок 6.3 — Вкладка «Получить массив точек»

В этой вкладке происходит сравнение выбранного на лицевой панели типа сигнала с константами и генерация пользовательского события в соответствии с выполнившимся условием.

При выборе на лицевой панели прямоугольного типа сигнала и нажатии на кнопку «Получить массив точек» происходит генерация пользовательского события «Прямоугольный». Содержание вкладки Event Structure «Прямоугольный» показано на рисунке 6.4.

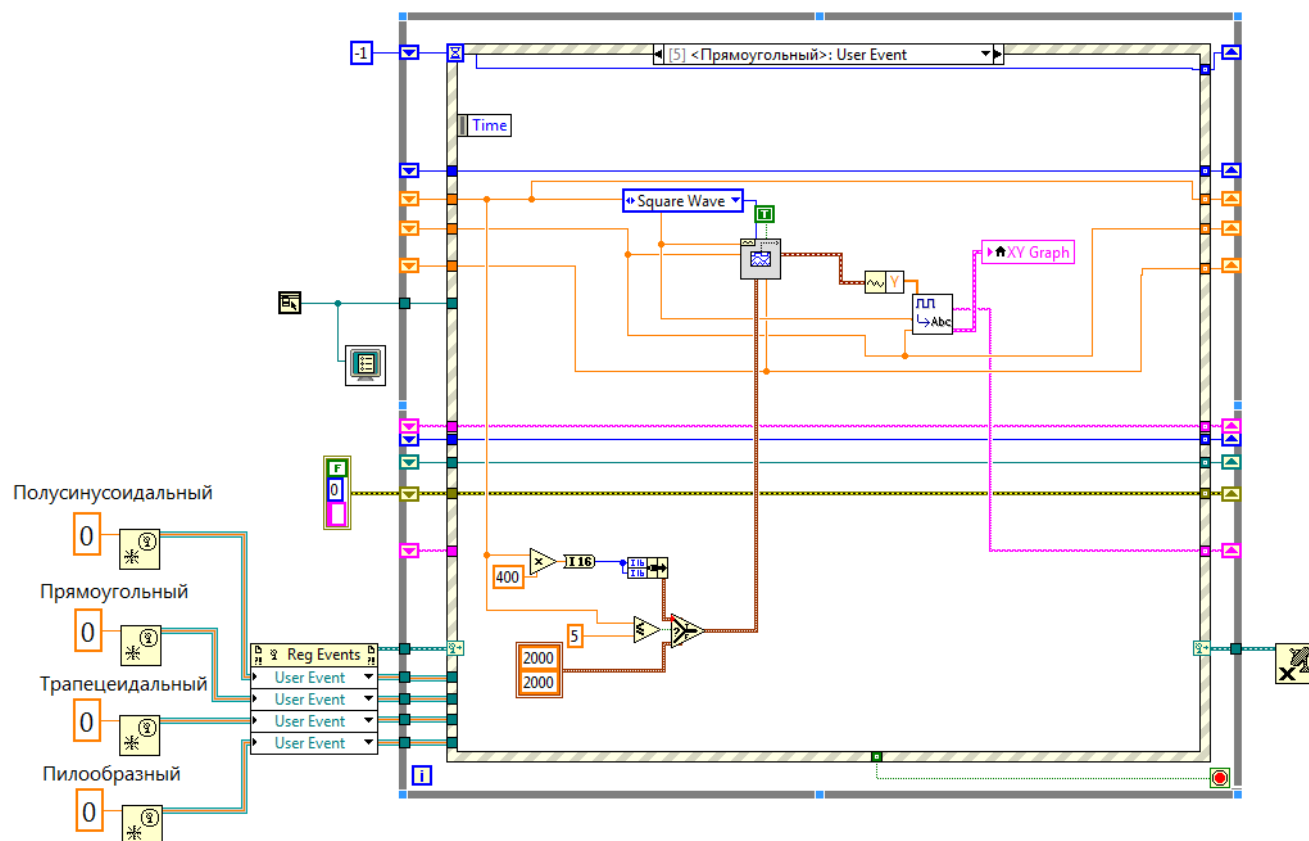


Рисунок 6.4 — Вкладка «Прямоугольный»

В этой вкладке происходит генерация прямоугольного сигнала с преобразованием кластера данных в текстовую строку. Генерация сигнала осуществляется с помощью функционального генератора. В качестве параметров, для генерации прямоугольного сигнала, необходимо указать частоту генерируемого сигнала, его амплитуду, тип сигнала, здесь константой указывается прямоугольный тип сигнала, коэффициент заполнения импульсов в процентах и число точек выдаваемых генератором в секунду. Также ко входу генератора «Reset signal» нужно подключить логическую константу «True» для того, чтобы не происходило сдвига сигнала по фазе. Число точек, выдаваемых в секунду, равно произведению частоты и числа точек, выдаваемых за период.

В виду того, что в программе управляющего контроллера размер массива, описывающего импульсы, был взят равным 400 элементов, число точек выдаваемых за период не должно превышать 400. Так же нужно учесть скорость работы шины I2C, по которой происходит обмен данными между микропроцессорной платой Arduino и модулем ЦАП. В стандарте, регламентирующем работу шины I2C, средняя скорость передачи указывается равной 100 кбит/с. При длине сообщения, передаваемом на ЦАП, равном трём байтам, максимально возможное число передаваемых на ЦАП кодовых комбинаций в секунду равно 4166. Возьмём вдвое меньшее число — 2000. Это нужно для того, чтобы гарантированно не возникало никаких проблем при обмене данными между управляющим контроллером и модулем ЦАП.

При максимальном числе выдаваемых в секунду точек, равном 2000, и ограничении размера массива, хранящего данные в памяти контроллера, равном 400, частота, при которой за период будет выдаваться 400 временных точек, равна 5 Гц. Именно с этим условием рассчитывается число выдаваемых в секунду точек, которое подаётся на вход «Sampling info» функционального генератора.

Функциональный генератор выдаёт сгенерированные данные в виде кластера. Для выделения из этого кластера массива временных точек используется функциональный блок «Get Waveform Components».

Для передачи по сети Ethernet массива временных точек, из сгенерированного функциональным генератором массива нужно выделить один период и преобразовать в текстовую строку. Всё это осуществляется с помощью подпрограммы «Square_to_string». Подпрограмма «Square_to_string» показана на рисунке 6.5.

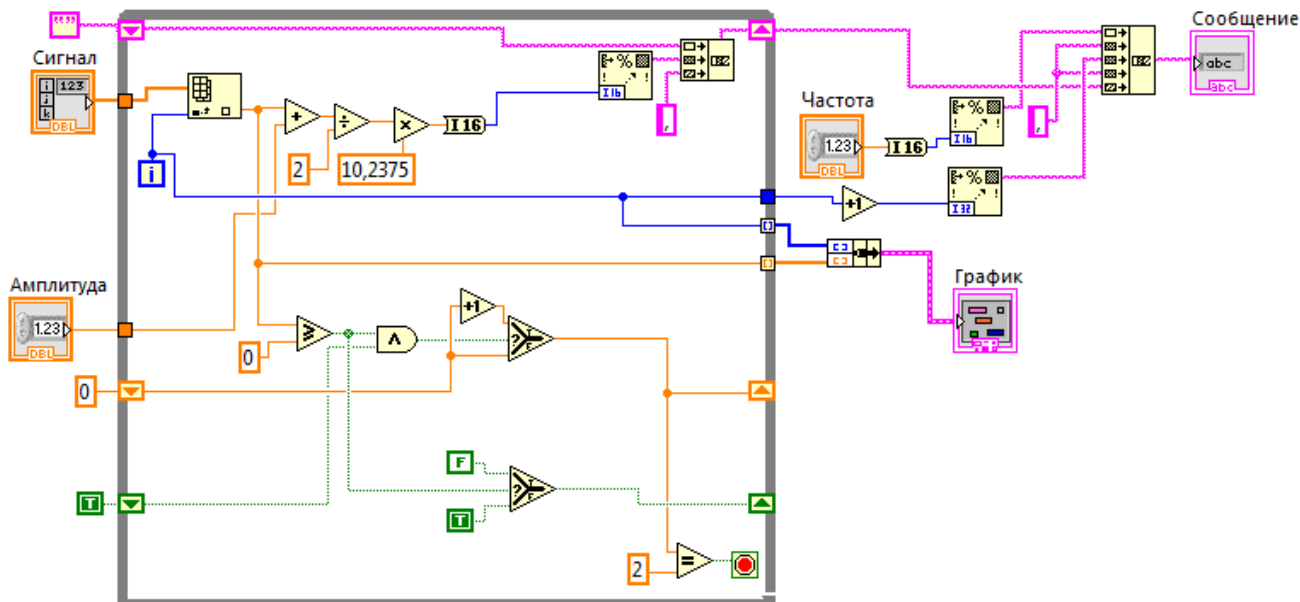


Рисунок 6.5 —Подпрограмма «Square_to_string»

Входными параметрами этой подпрограммы являются амплитуда и частота генерируемого сигнала и сам массив временных точек. В цикле происходит выборка элемента массива с помощью функции «Index Array». Номер считываемого с массива элемента определяется с помощью счётчика итераций. После получения числового значения происходит его масштабирование к разрядности ЦАП. Так как ЦАП является двенадцатиразрядным, максимальной кодовой комбинацией для него является число 4095. А в виду того, что максимальная амплитуда сигнала, который выдаёт функциональный генератор в данном приложении, равна 400 А. Разделив максимальную кодовую комбинацию на максимально возможную амплитуду сигнала, получим коэффициент, помножив на который число, считанное с массива временных точек, получим код, пригодный для выдачи на ЦАП. Этот коэффициент равен 10,2375. После этого полученное число округляется до целого путём конвертации из числового формата с плавающей запятой DBL в целочисленный формат I16. Затем с помощью функции «Format into String» происходит конвертация числа в текстовый формат String с последующим объединением полученной символьной строки со строкой, полученной в предыдущей итерации цикла.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Таким образом происходит преобразование элементов массива, содержащих первый период сгенерированного сигнала. Определение одного периода осуществляется следующим образом. Инкрементирование счётчика происходит тогда, когда значение, считываемое с массива временных точек, становится больше или равно нулю. При этом, следующее инкрементирование счётчика возможно только если значение, считываемое с массива временных точек, станет меньше нуля, то есть начнёт считываться отрицательный полупериод сигнала. Когда счётчик получит значение, равное двум, это будет означать, что считаны два полупериода сгенерированного сигнала, при этом остановится выборка значений из массива.

Накоплением массивов из номера итерации цикла и соответствующего ему числа, считанного с массива временных точек, и последующим объединением массивов с помощью функции «Bundle», образуется кластер, с помощью которого на лицевой панели функциональным блоком «XY Graph» строится график.

После окончания выборки элементов из массива временных точек, в начало результирующей текстовой строки добавляются частота и число преобразованных временных точек. Это нужно для правильного расчёта времени задержки управляющим контроллером.

После завершения выполнения подпрограммы происходит построение графика с помощью функционального блока «XY Graph» и передача в сдвиговый регистр текстовой строки, содержащей данные, описывающие генерируемые импульсы.

При выборе на лицевой панели пилообразного типа сигнала и нажатии на кнопку «Получить массив точек» происходит генерация пользовательского события «Пилообразный». Алгоритм пользовательского события «Пилообразный» отличается от алгоритма пользовательского события «Прямоугольный» только одним параметром, поступающим на функциональный генератор: на вход «signal type» подключена константа «Sawtooth Wave».

При выборе на лицевой панели полусинусоидального типа сигнала и нажатии на кнопку «Получить массив точек» происходит генерация

пользовательского события «Полусинусоидальный». Содержание вкладки Event Structure «Полусинусоидальный» показано на рисунке 6.6.

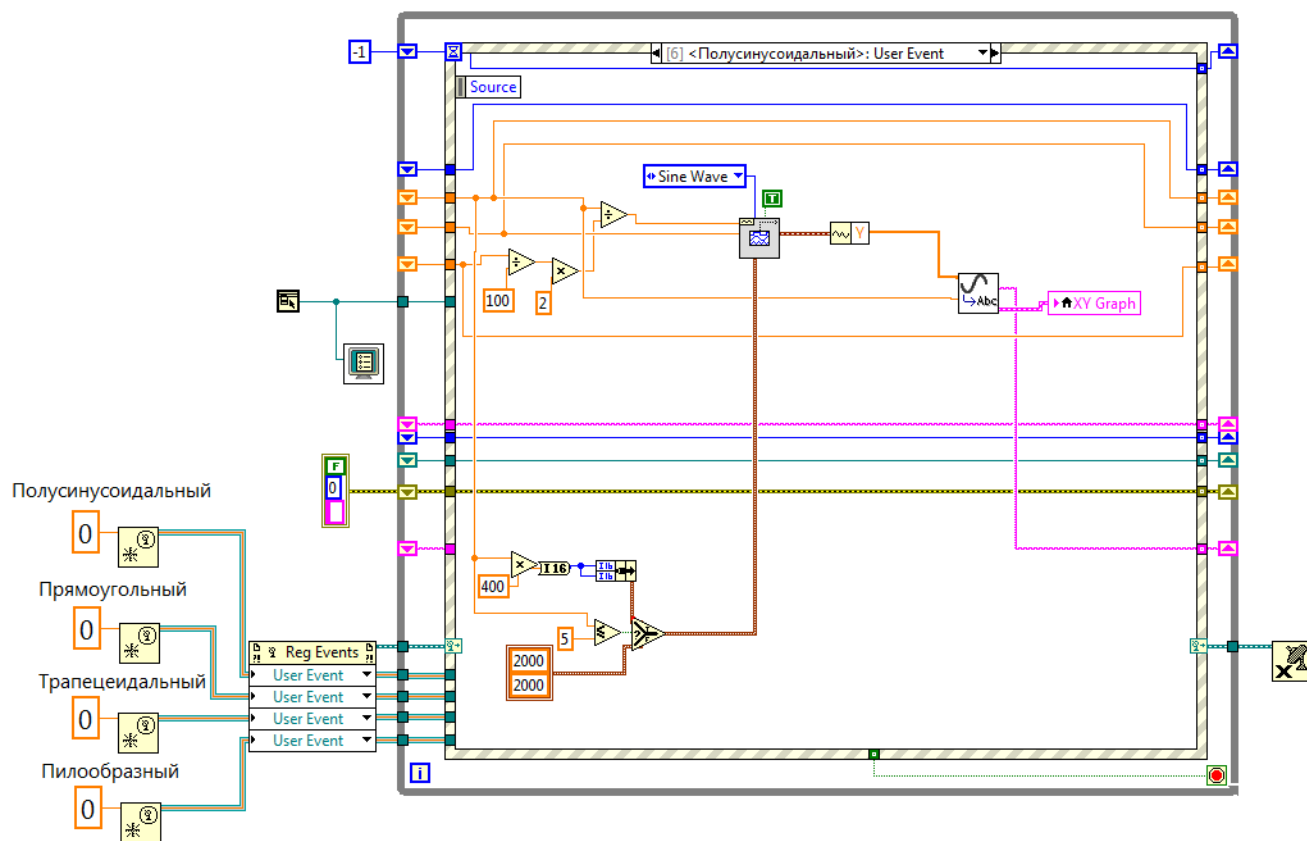


Рисунок 6.6 — Вкладка «Полусинусоидальный»

Так же как и при генерации прямоугольного и пилообразного сигналов, для генерации полусинусоиды используется функциональный генератор. Точно так же выбирается и число точек выдаваемых в секунду, обязательны ограничения в 2000 выдаваемых точек в секунду и 400 точек за период.

Регулирование длительности импульса осуществлено следующим образом. Для заданной частоты при заданном коэффициенте заполнения, частота, которая должна быть подана на функциональный генератор, равна заданной частоте поделённой на удвоенный коэффициент заполнения. То есть при увеличении или уменьшении коэффициента заполнения, число точек, выдаваемых за период не изменяется, но соответственно увеличивается или уменьшается число точек, описывающих положительный полупериод.

Функциональный генератор выдаёт сгенерированные данные в виде кластера. Для выделения из этого кластера массива временных точек используется функциональный блок «Get Waveform Components».

Для передачи по сети Ethernet массива временных точек, из сгенерированного функциональным генератором массива нужно выделить положительный полупериод и преобразовать в текстовую строку. Всё это осуществляется с помощью подпрограммы «Sin_to_string». Подпрограмма «Sin_to_string» показана на рисунке 6.7.

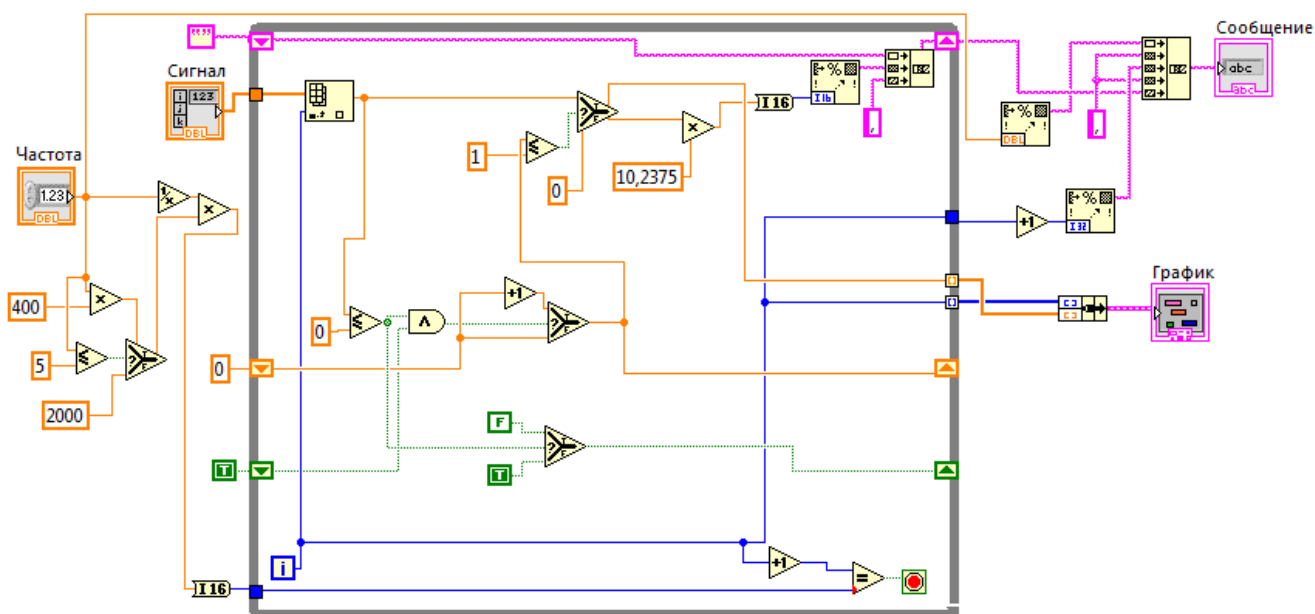


Рисунок 6.7 — Подпрограмма «Sin_to_string»

Входными параметрами этой подпрограммы являются частота генерируемого сигнала и сам массив временных точек. В начале работы подпрограммы «Sin_to_string» осуществляется расчёт числа точек, выдаваемых за секунду. Этот расчёт производится с тем условием, что за секунду должно выдаваться не больше 2000 временных точек, а за период должно выдаваться не более 400 точек. Затем производится вычисление числа временных точек, выдаваемых за период, путём перемножения периода на число точек, выдаваемых за секунду.

В цикле происходит выборка элемента массива с помощью функции «Index Array». Номер считываемого с массива элемента определяется с помощью

счётчика итераций. Если считанный элемент меньше или равен нулю, то это значит, что с массива временных точек начал считываться отрицательный полупериод, инкрементируется счётчик и в строку, предназначенную для последующей передачи по сети Ethernet, начинает записываться цифра «0». При выполнении вышеописанного условия используется счётчик для того, чтобы в результирующую строку записывался ноль постоянно, начиная с первого считывания отрицательного числа, а не происходило чередование записи то значения, считанного с массива временных точек, то нуля.

После считывания очередного числа с массива и проверки условия происходит масштабирование до величины максимальной кодовой комбинации ЦАП умножением на коэффициент 10,2375. После этого полученное число округляется до целого путём конвертации из числового формата с плавающей запятой DBL в целочисленный формат I16. Затем с помощью функции «Format into String» происходит конвертация числа в текстовый формат String с последующим объединением полученной символьной строки со строкой, полученной в предыдущей итерации цикла.

Далее по завершению цикла происходит добавление к результирующей текстовой строке частоты и числа преобразованных временных точек. Это нужно для правильного расчёта времени задержки управляющим контроллером.

После завершения выполнения подпрограммы происходит построение графика с помощью функционального блока «XY Graph» и передача в сдвиговый регистр текстовой строки, содержащей данные, описывающие генерируемые импульсы.

При выборе на лицевой панели трапецеидального типа сигнала и нажатии на кнопку «Получить массив точек» происходит генерация пользовательского события «Трапецеидальный». Генерация трапецеидального сигнала происходит путём расчёта кусочной функции. График этой функции показан на рисунке 6.8.

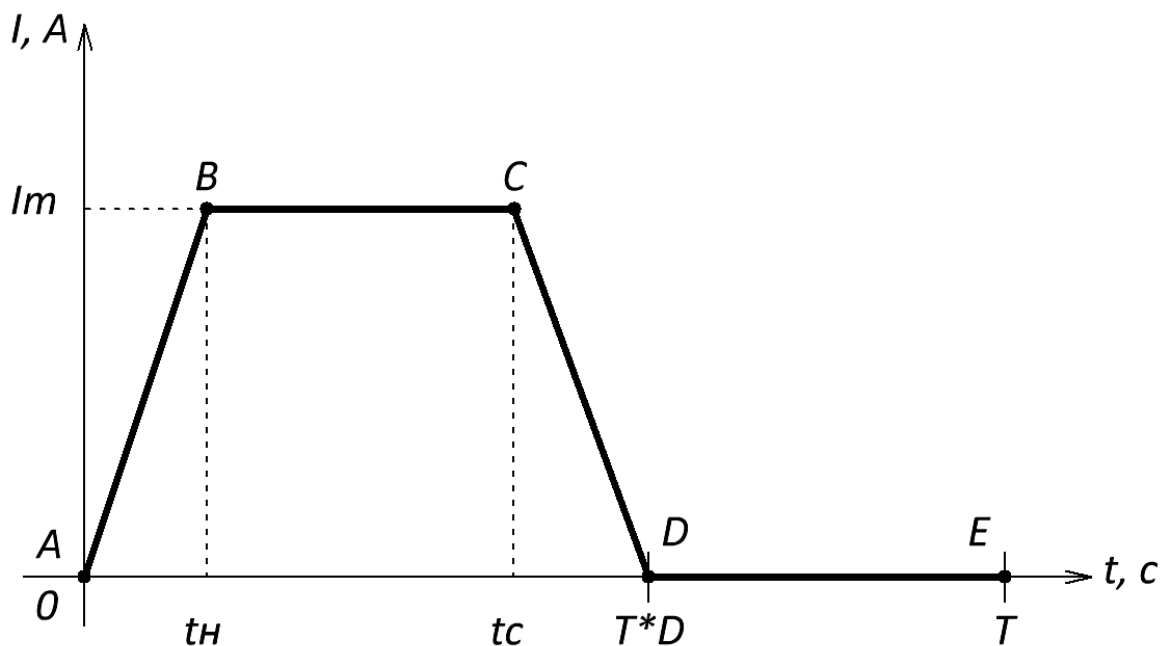


Рисунок 6.8 — График кусочной функции, где I_m — амплитуда генерируемого сигнала, t_H — время нарастания импульса, t_C — время спада импульса, T — период сигнала, D — коэффициент заполнения

Для описания функции на участке от 0 до t_H воспользуемся уравнением линейной функции:

$$y = k \cdot x + b \quad (6.1)$$

где, k — угловой коэффициент,

x — аргумент функции,

y — значение функции.

Угловой коэффициент k можно найти как тангенс угла BAD , тогда получим:

$$\operatorname{tg}BAD = \frac{I_m}{t_H} \quad (6.2)$$

Так как прямая AB проходит через начало координат, коэффициент b будет равен нулю. Тогда уравнение функции примет вид:

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
						77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$y = \frac{I_m}{t_c} \cdot x \quad (6.3)$$

На участке от t_c до $(T \cdot D - t_c)$ функция при любом аргументе будет равна амплитуде сигнала I_m .

Для описания функции на участке от $(T \cdot D - t_c)$ до $(T \cdot D)$ воспользуемся уравнением прямой по двум точкам:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (6.4)$$

где, x_1 и y_1 — координаты первой точки,

x_2 и y_2 — координаты второй точки.

Из рисунка 6.7 можно найти две точки, принадлежащие этому участку функции: $(T \cdot D; 0)$ и $(T \cdot D - t_c; I_m)$. Подставив две этих точки в уравнение прямой по двум точкам получим:

$$y = \frac{I_m \cdot (T \cdot D - x)}{t_c} \quad (6.5)$$

На участке от $(T \cdot D)$ до T при любом значении аргумента функция равна нулю.

Именно этой кусочной функцией и будет описываться генерация трапецеидального сигнала.

При вызове пользовательской функции «Трапецеидальный» происходит выполнение кода приложения, содержащегося во вкладке «Трапецеидальный», показанной на рисунке 6.9.

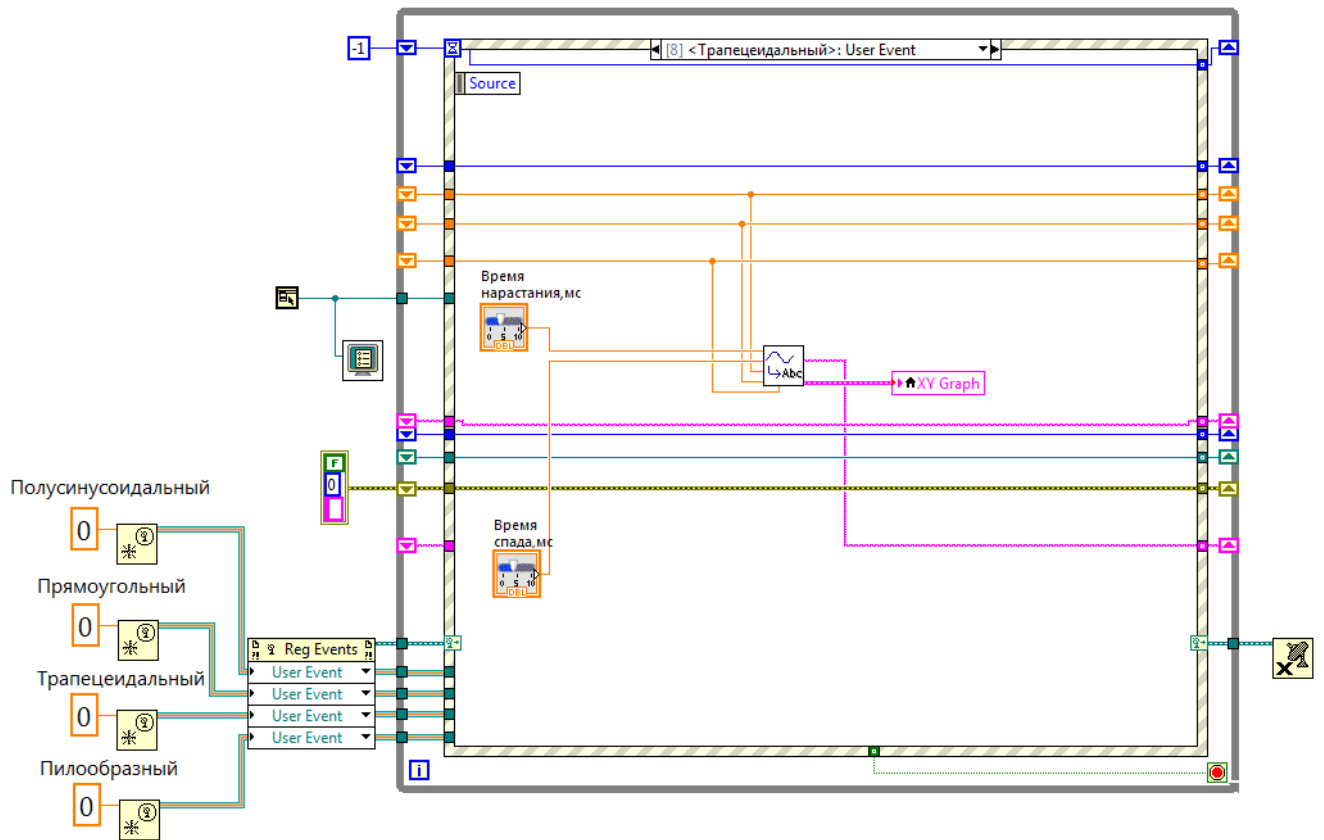


Рисунок 6.9 — Вкладка «Трапецеидальный»

При вызове этой функции сперва считывается значения времени спада и времени нарастания импульса. Затем происходит генерация сигнала с его последующим преобразованием в текстовую строку для передачи по сети Ethernet. Генерация трапецеидального сигнала и его преобразование в текстовую строку осуществляется подпрограммой «Trapezium_to_string». Подпрограмма «Trapezium_to_string» показана на рисунке 6.10.

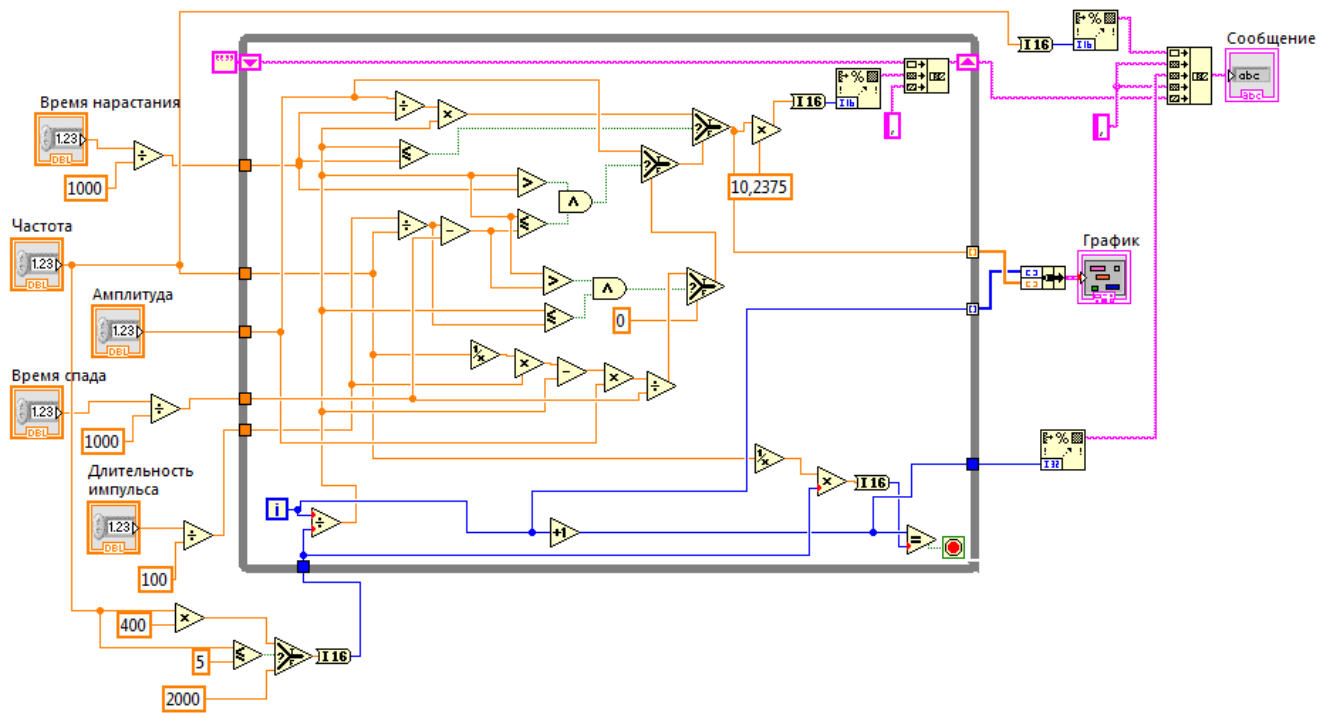


Рисунок 6.10 — Подпрограмма «Trapezium_to_string»

В начале работы этой подпрограммы происходит считывание переменных и расчёт числа точек, выдаваемых за секунду. Расчёт происходит с тем условием, чтобы число точек выдаваемых за секунду не превышало 2000 и число точек, выдаваемых за период, не превышало 400. Так же в начале работы этой подпрограммы происходит перевод времени спада и времени нарастания импульса из миллисекунд в секунды, делением этих величин на 1000.

Вычисления внутри цикла производятся в соответствии с кусочной функцией, полученной выше.

Также как и для прямоугольной, полусинусоидальной и пилообразной формы импульсов производится масштабирование до уровня максимальной кодовой комбинации. После этого полученное число округляется до целого путём конвертации из числового формата с плавающей запятой DBL в целочисленный формат I16. Затем с помощью функции «Format into String» происходит конвертация числа в текстовый формат String с последующим объединением полученной символьной строки со строкой, полученной в предыдущей итерации цикла.

Накоплением массивов из номера итерации цикла и соответствующего ему числа, считанного с массива временных точек, и последующим объединением массивов с помощью функции «Bundle», образуется кластер, с помощью которого на лицевой панели функциональным блоком «XY Graph» строится график.

Далее по завершению цикла происходит добавление к результирующей текстовой строке частоты и числа преобразованных временных точек. Это нужно для правильного расчёта времени задержки управляющим контроллером.

После завершения выполнения подпрограммы происходит построение графика с помощью функционального блока «XY Graph» и передача в сдвиговый регистр текстовой строки, содержащей данные, описывающие генерируемые импульсы.

6.2 Разработка кода обмена данными между компьютером и контроллером.

Для начала обмена данными прежде всего компьютеру необходимо подключиться по сети Ethernet в качестве клиента к контроллеру. Сделать это можно с помощью функционального блока «TCP Open Connection». Подключение происходит путём выбора пункта меню «Старт» из раздела меню «Управление». Обработка выбора пункта меню и запуск Ethernet соединения осуществляется во вкладке Event структуры «Menu Selection». Вкладка «Menu Selection» показана на рисунке 6.11.

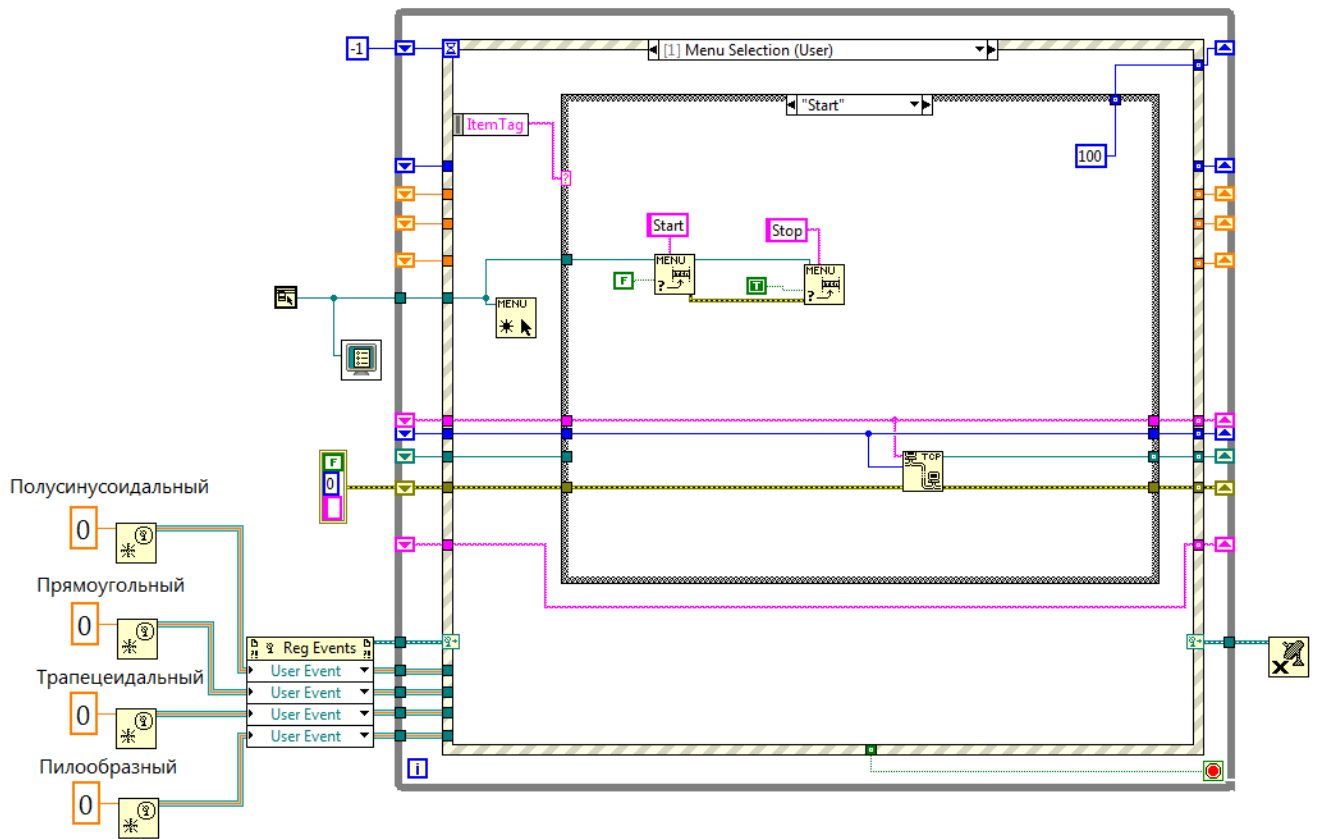


Рисунок 6.11 — Вкладка «Menu Selection»

После выбора пункта меню «Старт» с помощью функционального блока «Set Menu Item Info» эта кнопка в меню становится неактивной. Становится активной кнопка «Стоп». Подключение к удалённому серверу происходит с помощью функционального блока «TCP Open Connection». Входными параметрами этого функционального блока являются IP адрес сервера, к которому необходимо подключиться и номер порта.

Настройка IP адреса и номера порта осуществляется при выборе в разделе меню «Настройки» пунктов «IP» и «Port» соответственно. Код программы, отвечающий за задание IP адреса и номера порта представлен на рисунках 6.12 и 6.13 соответственно.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

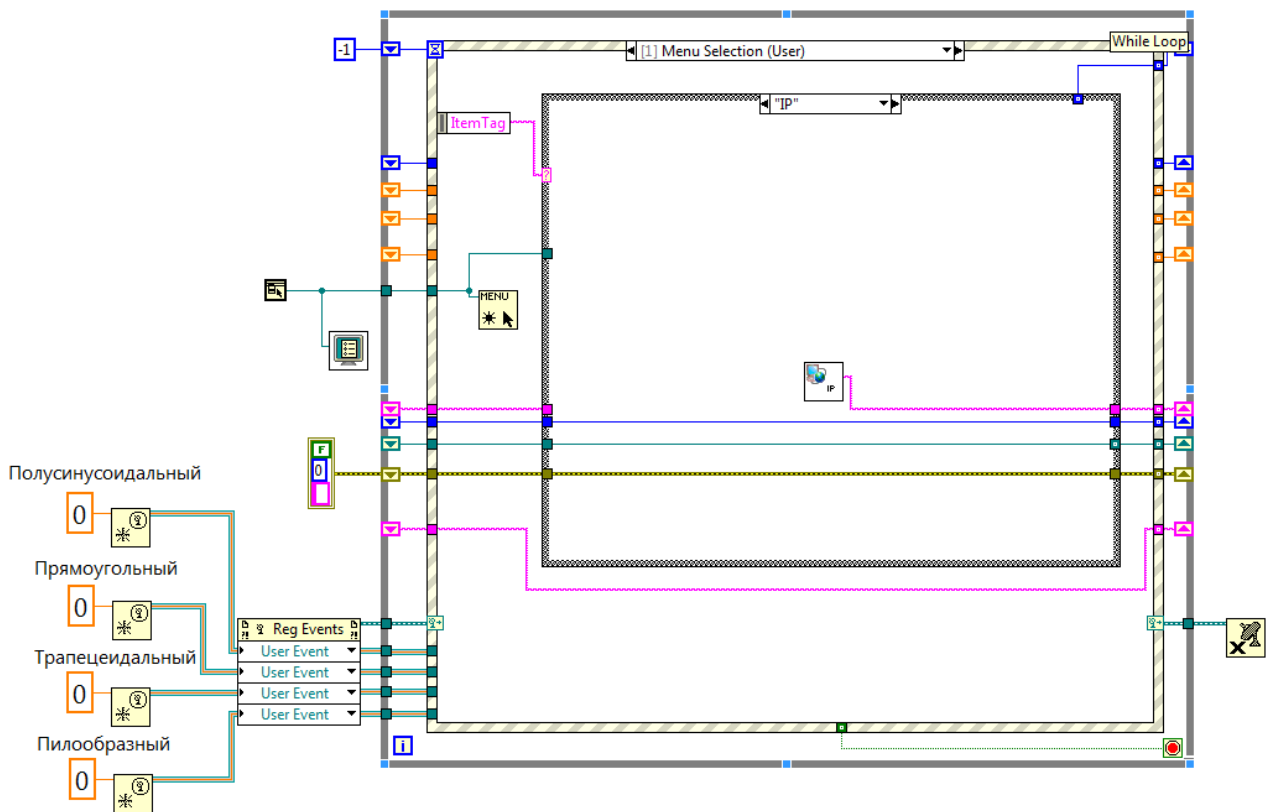


Рисунок 6.12 — Исполняемый код программы при нажатии «IP» в разделе меню «Настройки»

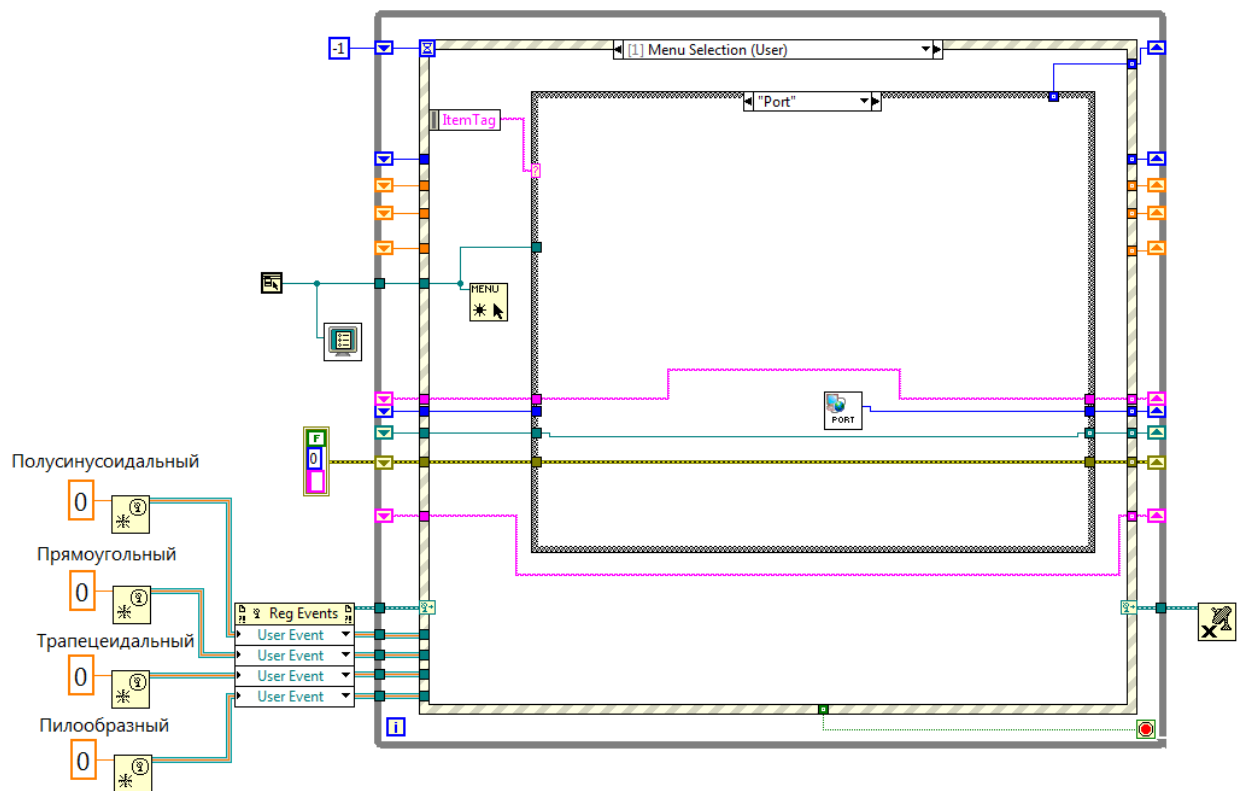


Рисунок 6.13 — Исполняемый код программы при нажатии «Port» в разделе меню «Настройки»

Задание IP адреса и номера порта происходит во всплывающих окнах, которые открываются при вызове подпрограмм «IP» и «Port» соответственно. Вид окон, через которые происходит настройка IP адреса и порта показаны на рисунках 6.14 и 6.15 соответственно.

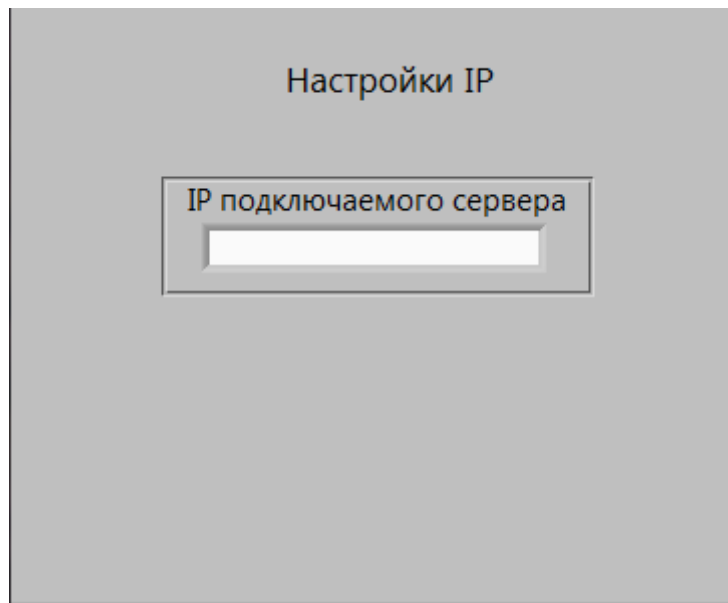


Рисунок 6.14 — Окно настройки IP адреса

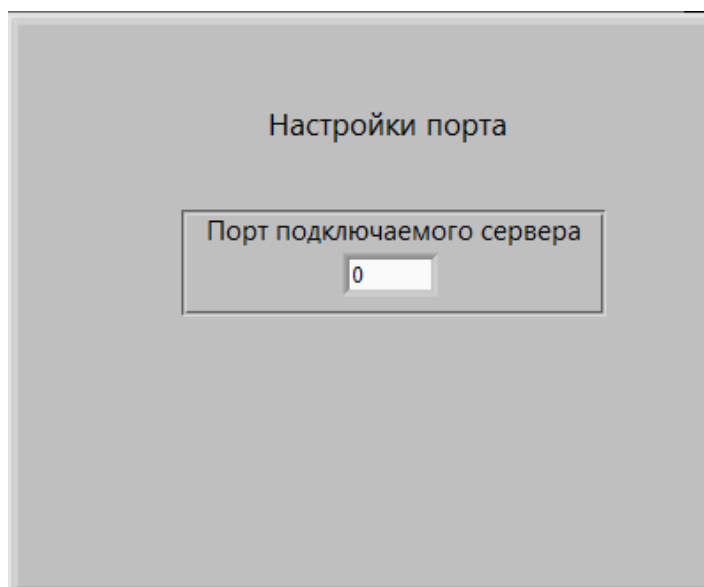


Рисунок 6.15 — Окно настройки порта

Отправка данных на управляющий контроллер осуществляется нажатием на лицевой панели кнопки «Отправка сигнала». При нажатии на кнопку «Отправка сигнала» приложение переходит к выполнению кода вкладки Event

структуры «Отправка сигнала». Содержание этой вкладки показано на рисунке 6.16.

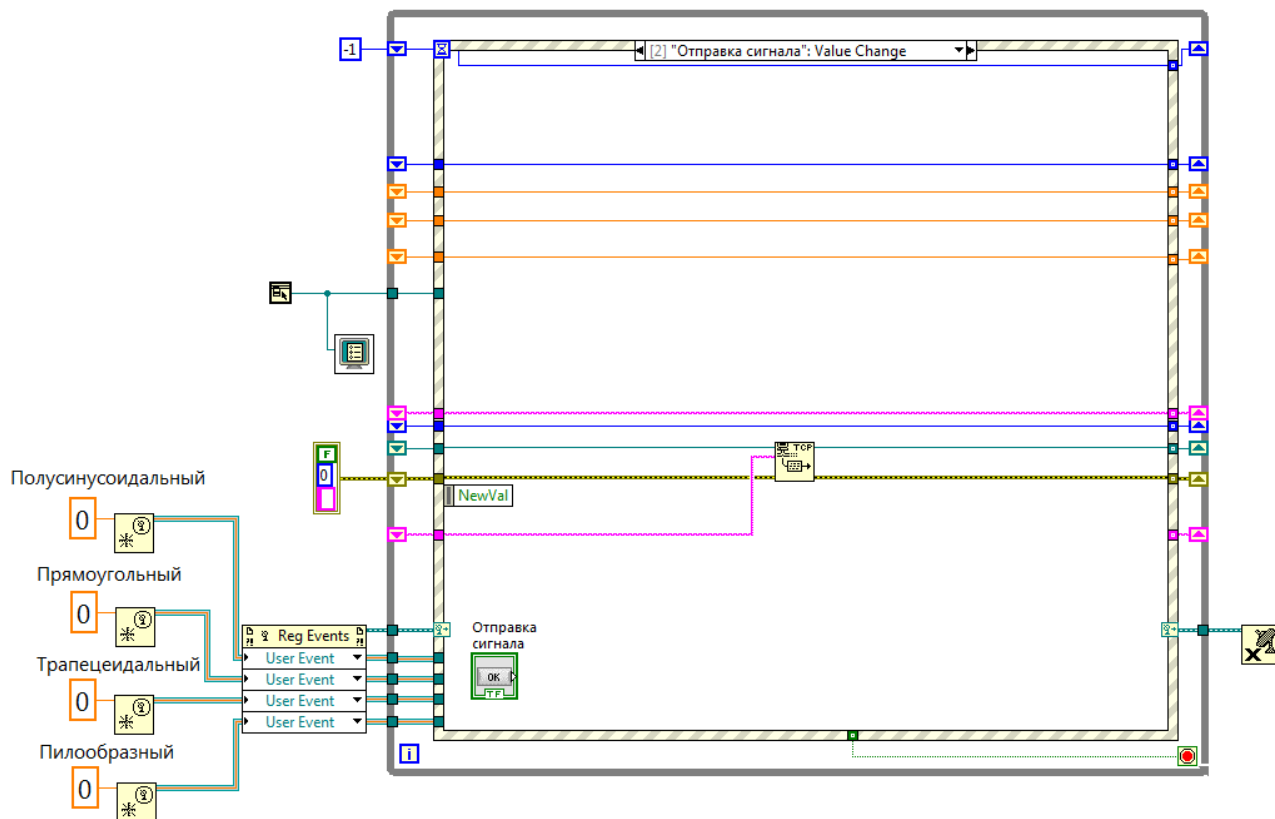


Рисунок 6.16 — Вкладка «Отправка сигнала»

Текстовая строка, содержащая последовательность временных точек, которые описывают генерируемые импульсы, передаются в эту вкладку с помощью сдвигового регистра. Передача через сеть текстовой строки осуществляется с помощью Функционального блока «TCP write».

Закрытие Ethernet соединения происходит при выборе «Стоп» в разделе меню «Управление». Код программы, выполняющийся при выборе «Стоп» в разделе меню «Управление» показан на рисунке 6.17.

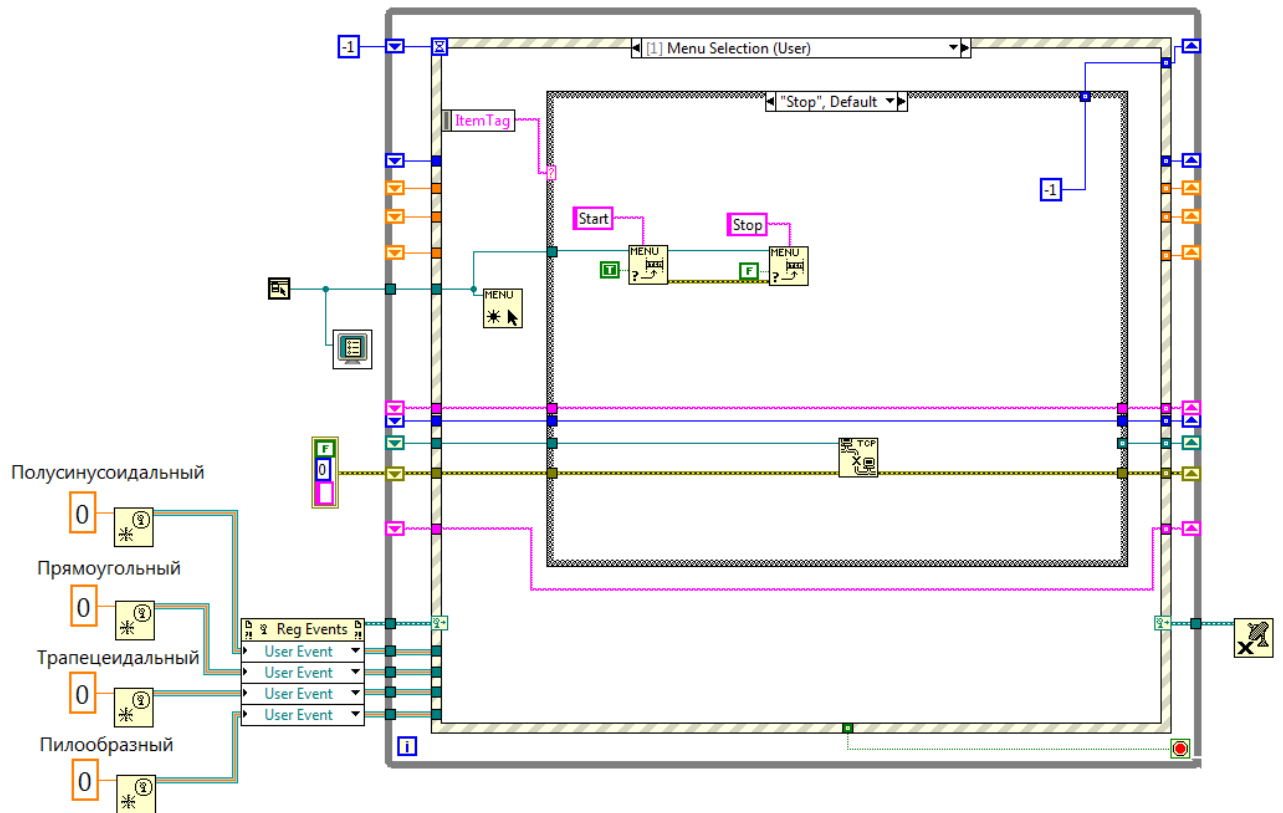


Рисунок 6.17 — Исполняемый код программы при нажатии «Стоп» в разделе меню «Управление»

После выбора пункта меню «Стоп» с помощью функционального блока «Set Menu Item Info» эта кнопка в меню становится неактивной. Становится активной кнопка «Стоп». Закрытие соединения осуществляется с помощью функционального блока «TCP Close Connection».

7 Разработка печатной платы системы управления силовой части источника тока.

Печатная плата собрана на двустороннем стеклотекстолите марки СФ-2 с толщиной фольги 105 мкм и толщиной всего листа 2 мм.

Выбор этого материала основан на его широком применении и низкой стоимости относительно всех марок стеклотекстолитов при наиболее оптимальных электрических, химических и механических характеристиках. Толщина материала 2 мм вполне соответствует требованиям условий эксплуатации к механической прочности печатной платы.

Рассчитаем ширину дорожек для силовых цепей. Подразумевается, что плата идентична для всех источников. Поэтому рассчитаем ширину дорожек для максимального тока, который может протекать по плате:

$$b = \sqrt{\frac{I^2 \cdot \rho}{\Delta t \cdot h^2 \cdot q \cdot c}} \quad (7.1)$$

где, I – ток, протекающий через дорожку,

$\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом/м — удельное сопротивление меди,

$\Delta t = 40$ °С — диапазон рабочих температур,

$h = 105 \cdot 10^{-6}$ м — глубина дорожки печатного проводника,

$q = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ — плотность меди,

$c = 390$ Дж/(кг*°С) — удельная теплоемкость меди.

Рассчитаем ширину дорожек цепи первичной обмотки трансформатора. В этой цепи протекает ток $I_1 = 3,234$ А. Тогда ширина дорожек будет равна:

$$b = \sqrt{\frac{3,234^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-8}}{40 \cdot (105 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 390}} = 3,46 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (7.2)$$

Для печатных проводников силовых цепей выберем ширину 1 мм. В сигнальных цепях, как правило, протекающий ток намного ниже, поэтому выберем ширину проводника 0,5 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате бакалаврской работы был разработан программируемый источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов.

В первой главе был сделан обзор технических решений, применяемых в промышленных источниках тока.

Во второй главе была разработана функциональная схема аппаратной части источника тока.

В третьей главе была разработана электрическая принципиальная схема источника тока.

В четвёртой главе была разработана и исследована модель источника тока в программе NI Multisim.

В пятой главе была разработана программа управляющего контроллера.

В шестой главе была разработана программная часть для компьютера.

В седьмой главе была разработана печатная плата системы управления силовой частью источника тока.

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хоровиц П. Искусство схемотехники. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Бином, 2014. – 706 с.
2. Полещук А. Методы повышения качества измерения характеристик СПП в области статических потерь / А. Полещук // Силовая электроника. – 2012. - №4. - С.14-16.
3. Хныков А. В. Теория и расчёт многообмоточных трансформаторов. / А. В. Хныков. – М.: СОЛОН – Пресс, 2003. – 112 с.
4. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
5. ЗАО «ЧИП и ДИП» — Приборы, Радиодетали и Электронные компоненты [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.chipdip.ru>
6. «ПЛАТАН»: электронные компоненты, радиодетали — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.platan.ru>
7. Шустов М. А. Основы силовой электроники./ М. А. Шустов. – СПб.: Наука и техника, 2017. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Алгоритм программы управляющего контроллера

```
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
Adafruit_MCP4725 dac;
byte mac[] = {0xAE, 0xB2, 0x26, 0xE4, 0x4A, 0x5C};
byte ip[] = {169, 254, 1, 12};
EthernetServer server(200);
char c;
char midcode [3];
int code [401];
int frequency;
int numberofpoints;
unsigned long delaytime;
unsigned long microstime;
int a=2;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dac.begin(0x60);
  Ethernet.begin(mac, ip);
  server.begin();
  Serial.println("server is at ");
  Serial.println(Ethernet.localIP());
}
void loop() {
  EthernetClient client = server.available();
  if (client){
    Serial.println("new client");
    while (client.connected()){
      if (client.available()) {
        a=2;
        int j=0;
        int n=0;
        for (int i=0;i<=2005; i++){
          c = client.read();
          if(c!=44){
            midcode[n]=c;
            if (n==0){
              midcode[1]=60;
            } else if(n==1){
              midcode[2]=60;
            } else if(n==2){
              midcode[3]=60; }
          n++;
        }else{
```

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90

```

if (midcode[3]==60){
    code[j]=100*chartoint(midcode[0])+10*chartoint(midcode[1])+chartoint(midcode[2]);
}else if (midcode[3]==60&&midcode[2]==60){
    code[j]=10*chartoint(midcode[0])+chartoint(midcode[1]);
}else if(midcode[3]==60&&midcode[2]==60&&midcode[1]==60){
    code[j]=chartoint(midcode[0]);
}else{
code[j]=1000*chartoint(midcode[0])+100*chartoint(midcode[1])+10*chartoint(midcode[2])+
chartoint(midcode[3]);
}
    j++;
    n=0;
} }
frequency=code[0];
numberofpoints=code[1];
delaytime=(1/frequency*numberofpoints)*1000000;
} }
client. stop();
}
if ((micros()-microstime)>=delaytime){
    dac.setVoltage(code[a], false);
    microstime=micros();
a++;
if (a>=(numberofpoints+2)){
    a=2;
}}}
int chartoint (int element)
{
if (element == 48){
    return 0;
} else if (element == 49){
    return 1;
}else if (element == 50){
    return 2;
}else if (element == 51){
    return 3;
}else if (element == 52){
    return 4;
}else if (element == 53){
    return 5;
}else if (element == 54){
    return 6;
}else if (element == 55){
    return 7;
}else if (element == 56){
    return 8;
}else if (element == 57){
    return 9;
} }

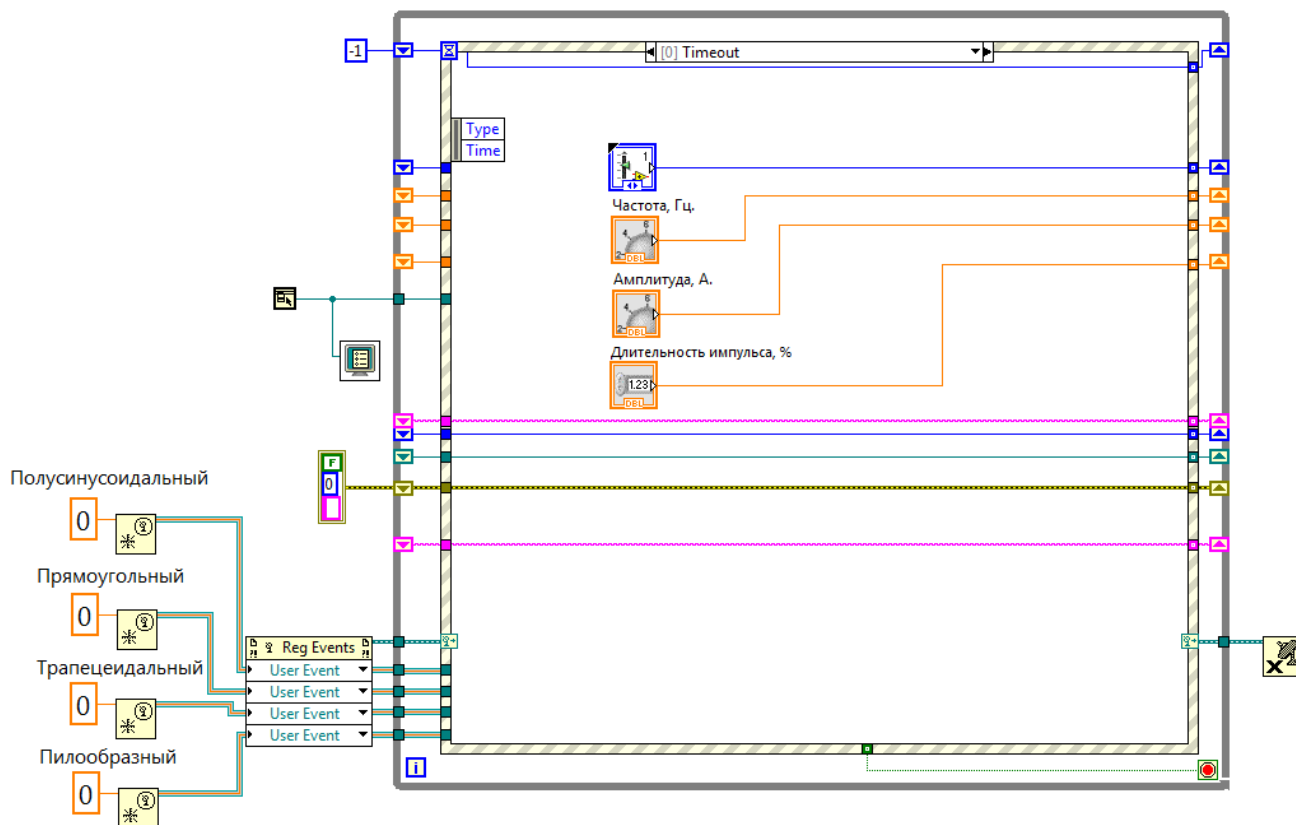
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

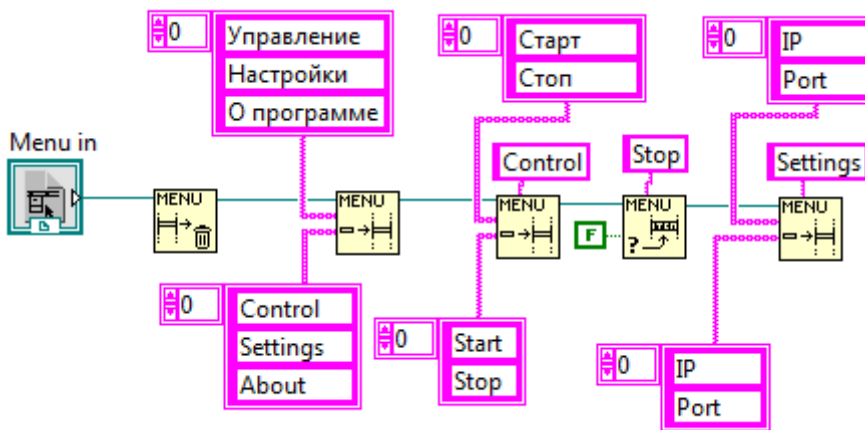
(обязательное)

Алгоритм программы для компьютера

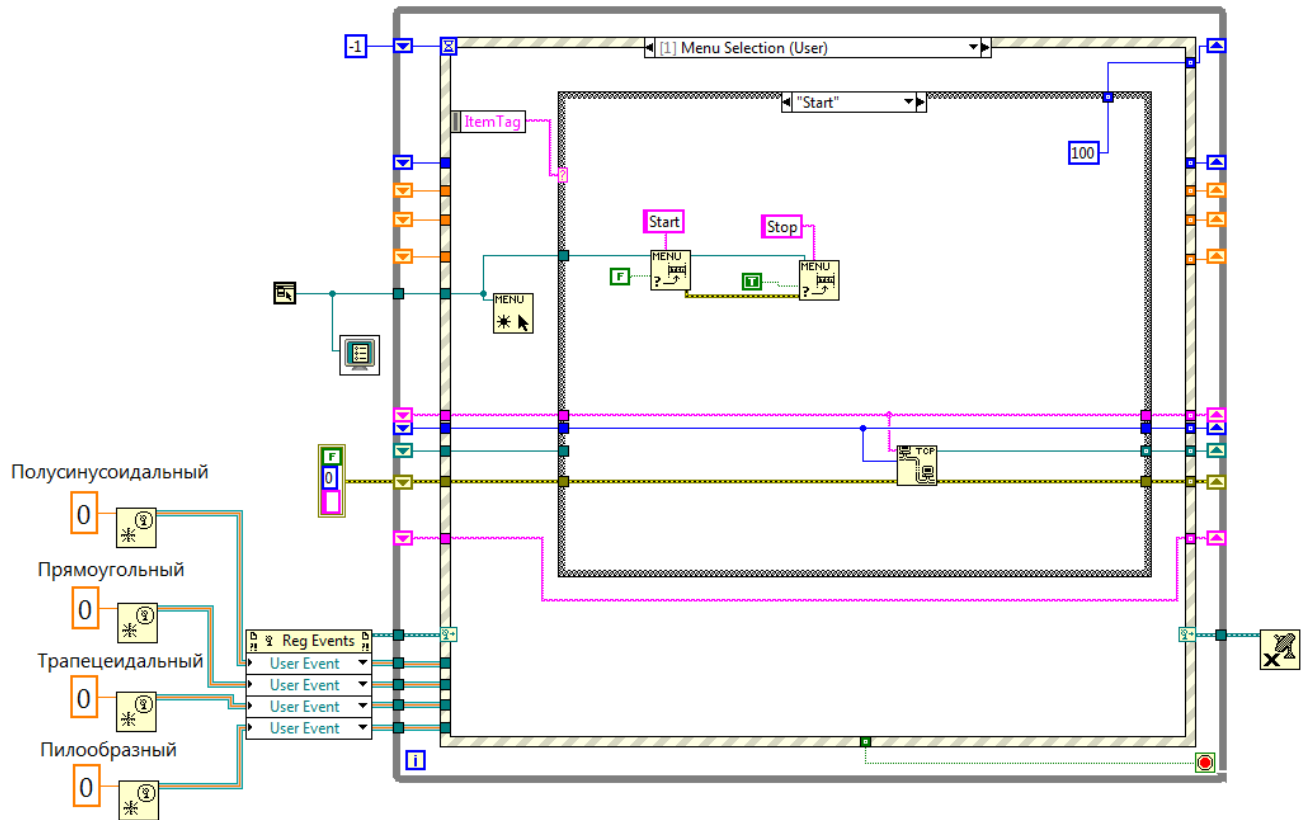
Общий вид программы и вкладка «Timeout».



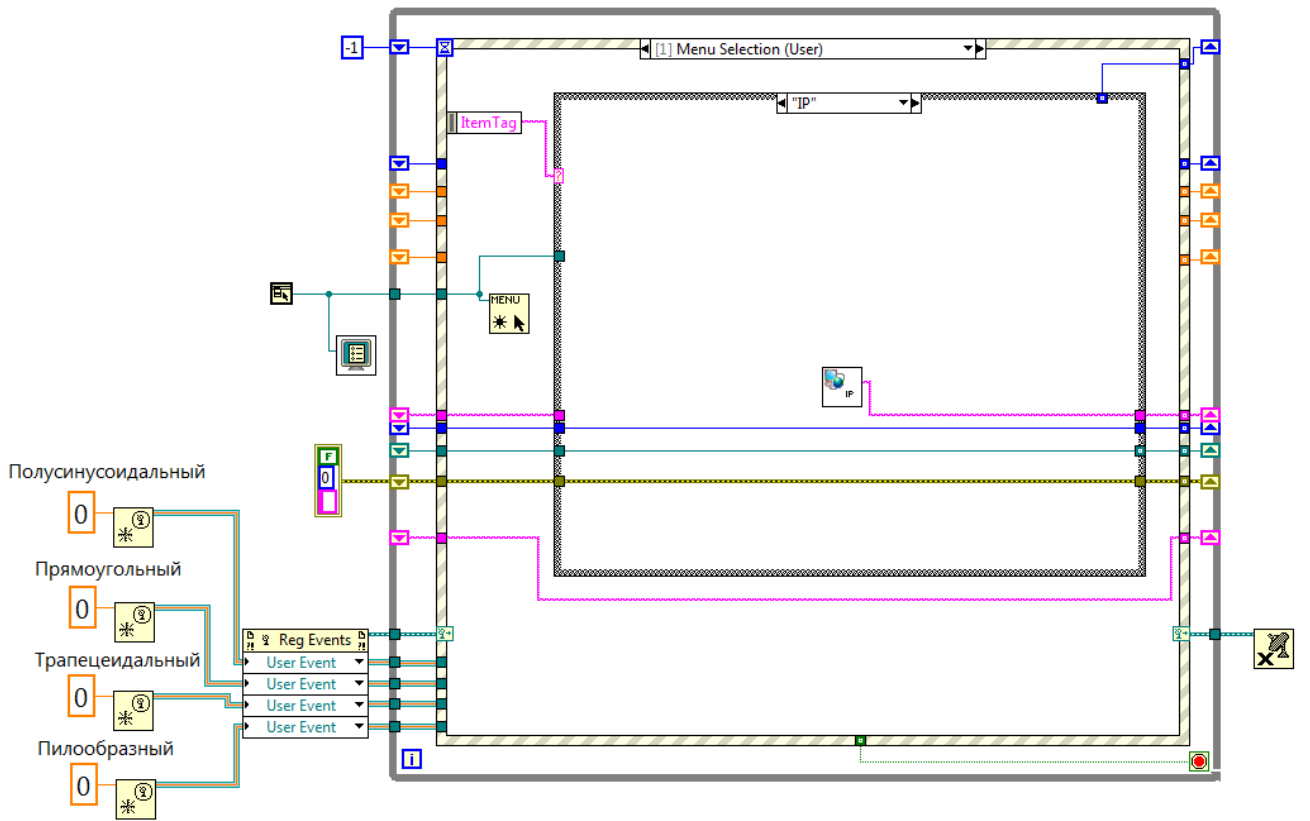
Настройка меню.



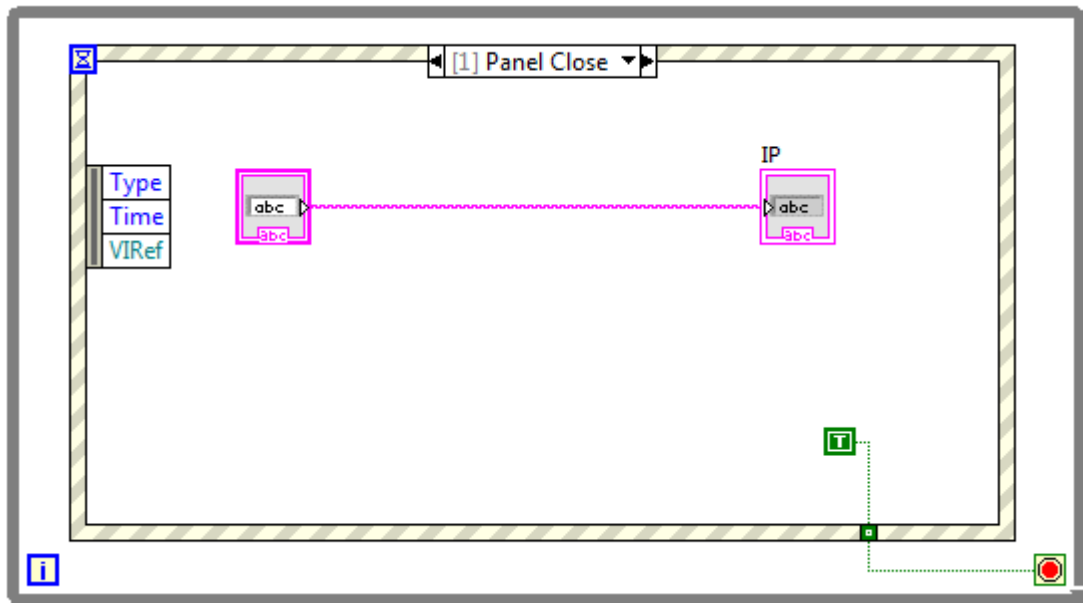
Вкладка «Start».



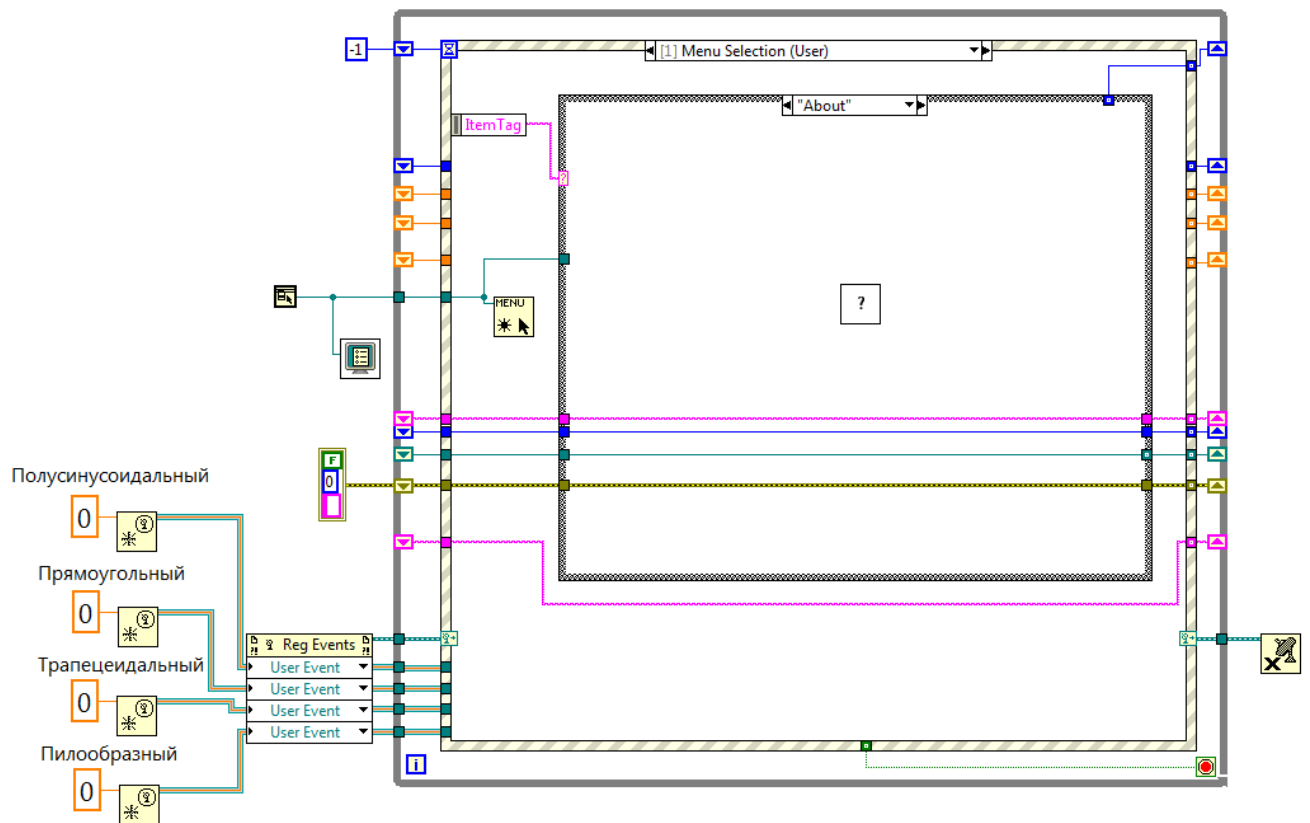
Вкладка «IP».



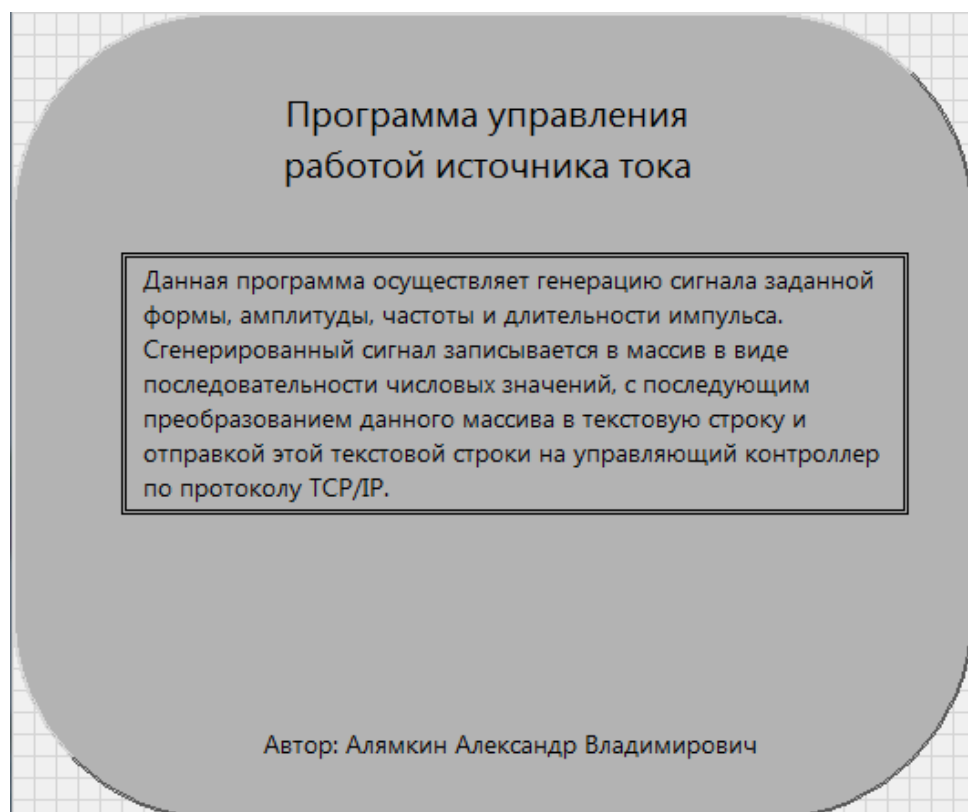
Подпрограмма «IP».



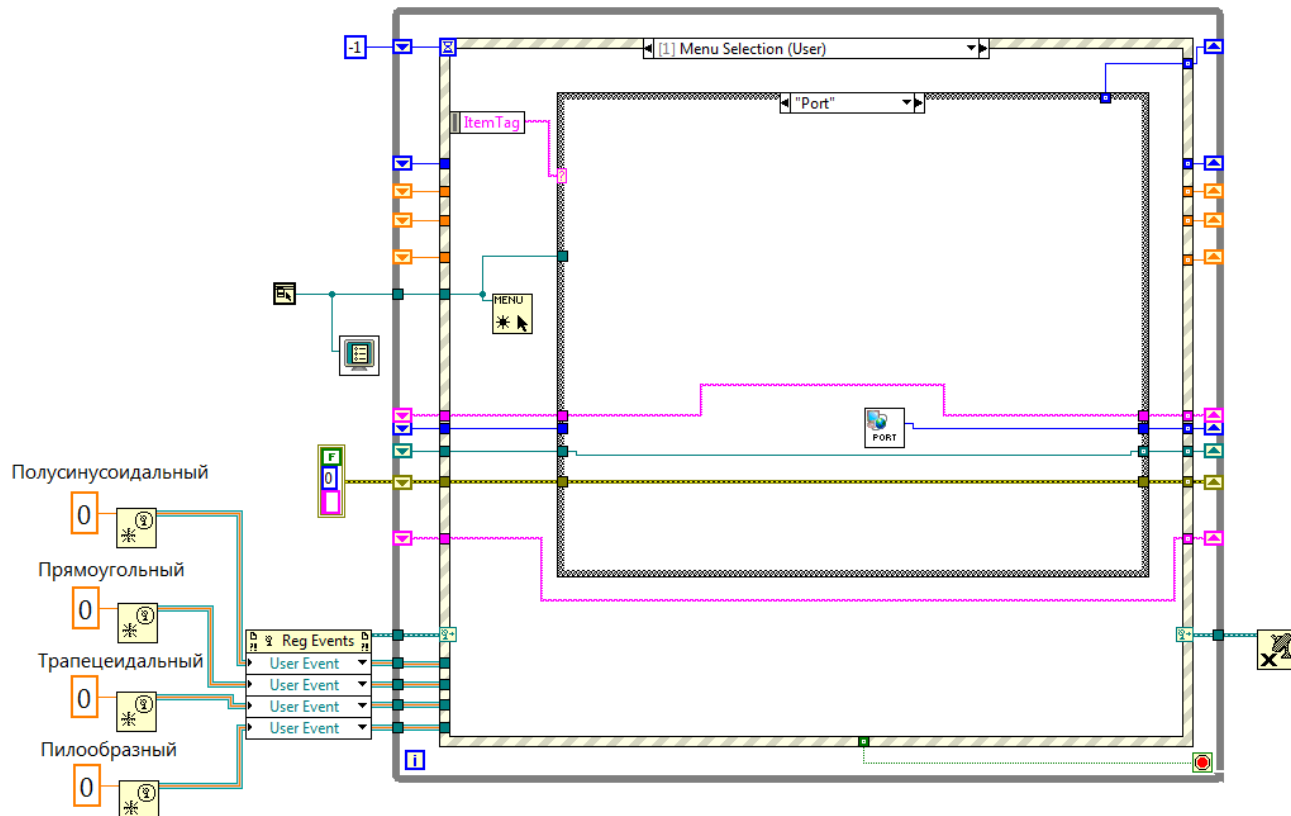
Вкладка «About».



Подпрограмма «About»



Вкладка «Port».



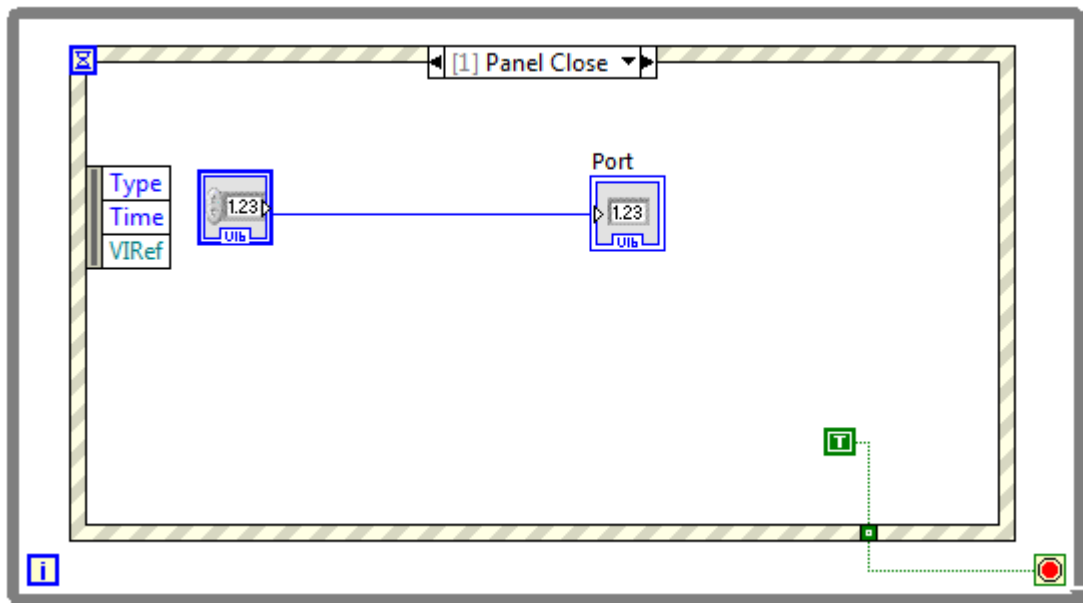
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

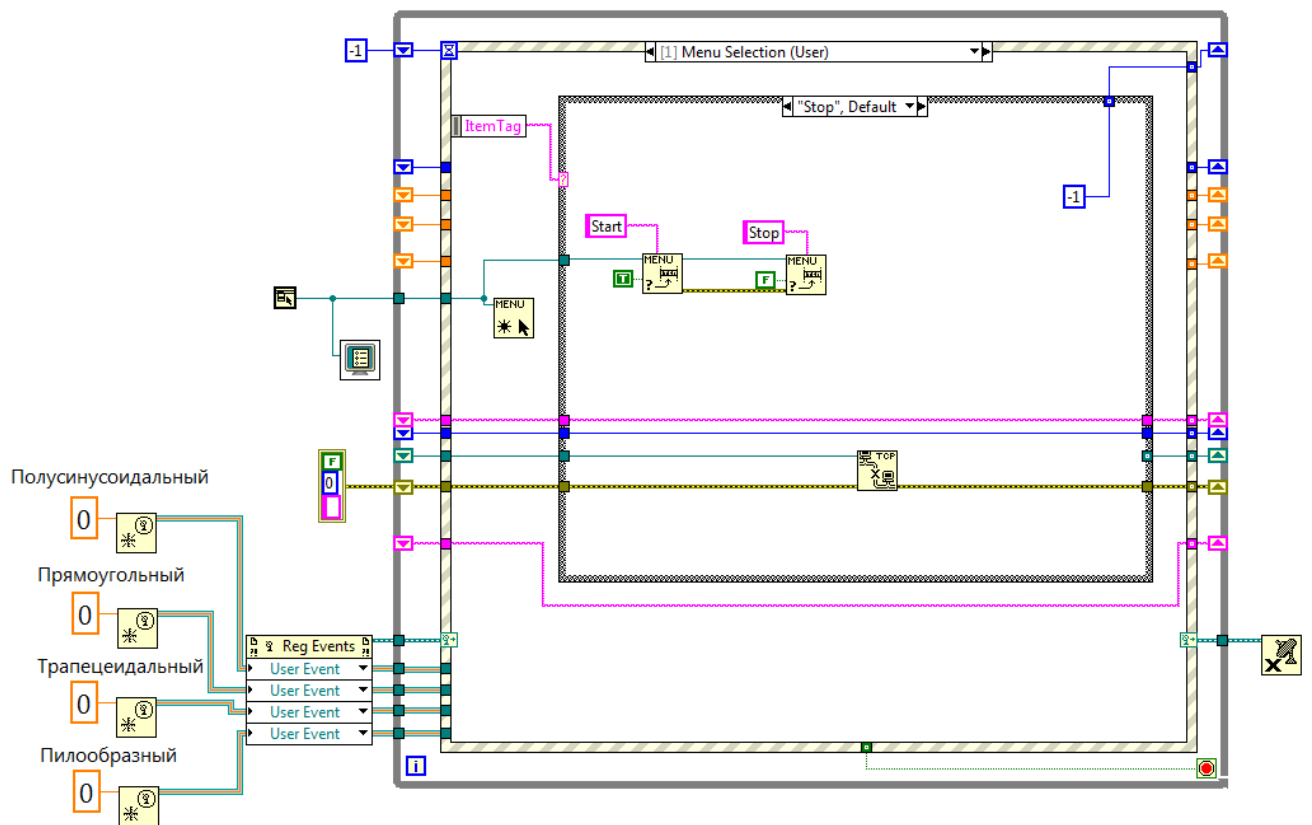
Лист

95

Подпрограмма «Port».



Вкладка «Stop».



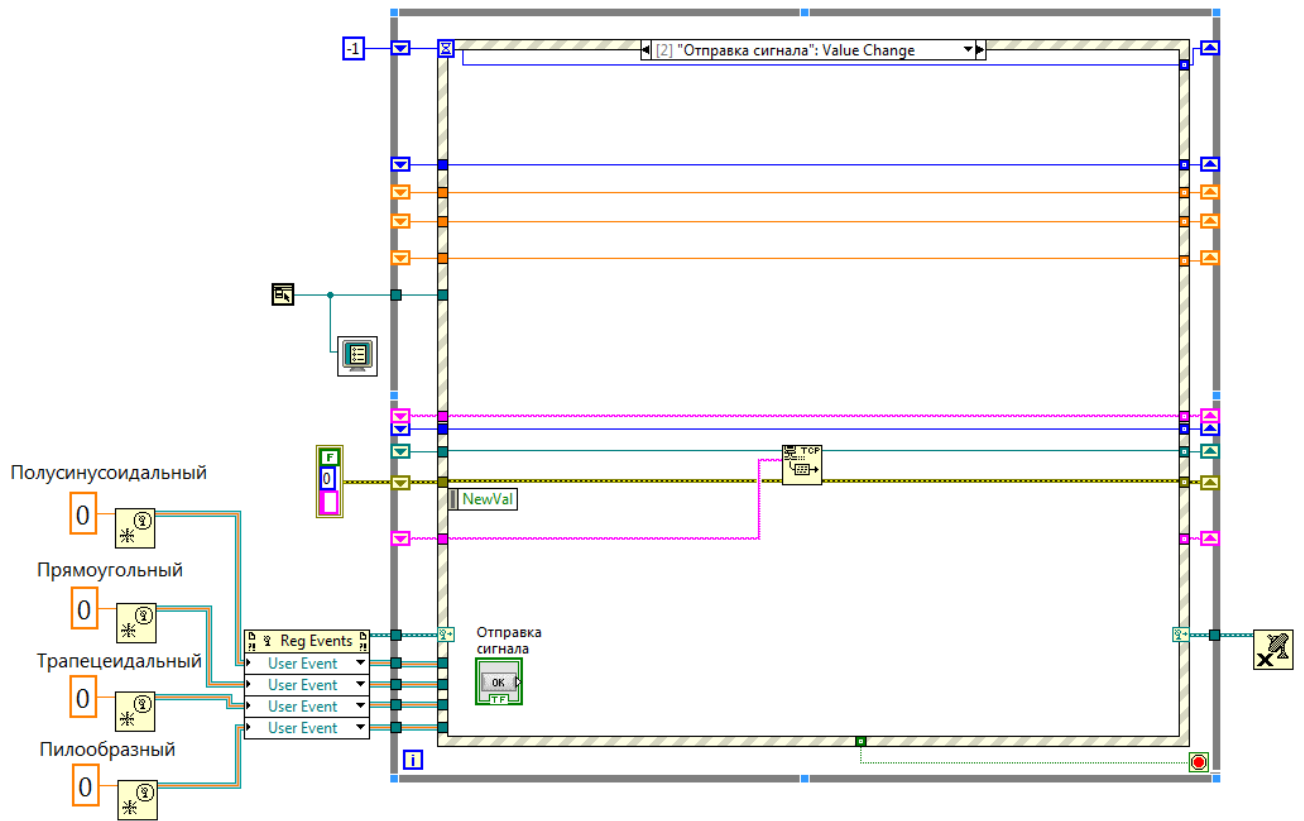
Вкладка «Отправка сигнала».

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

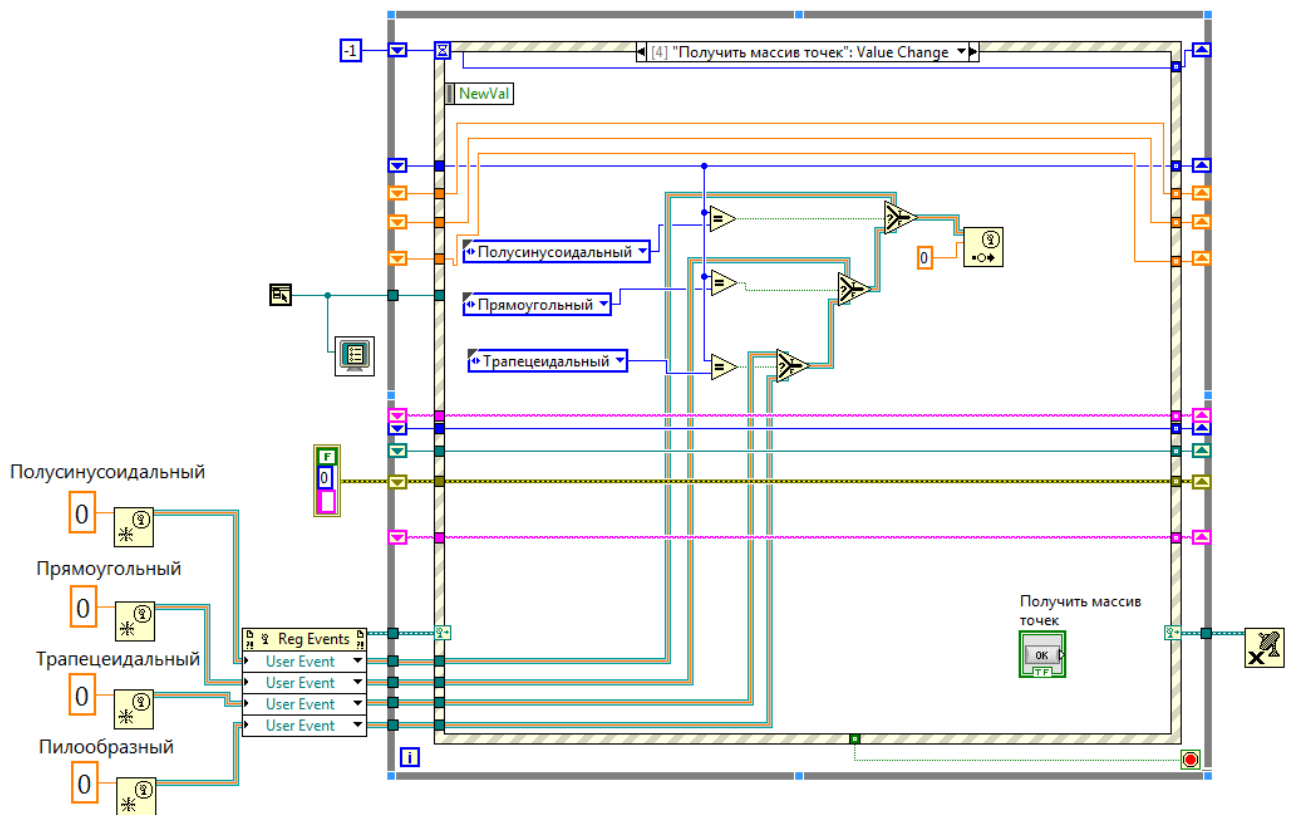
БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист

96



Вкладка «Получить массив точек».



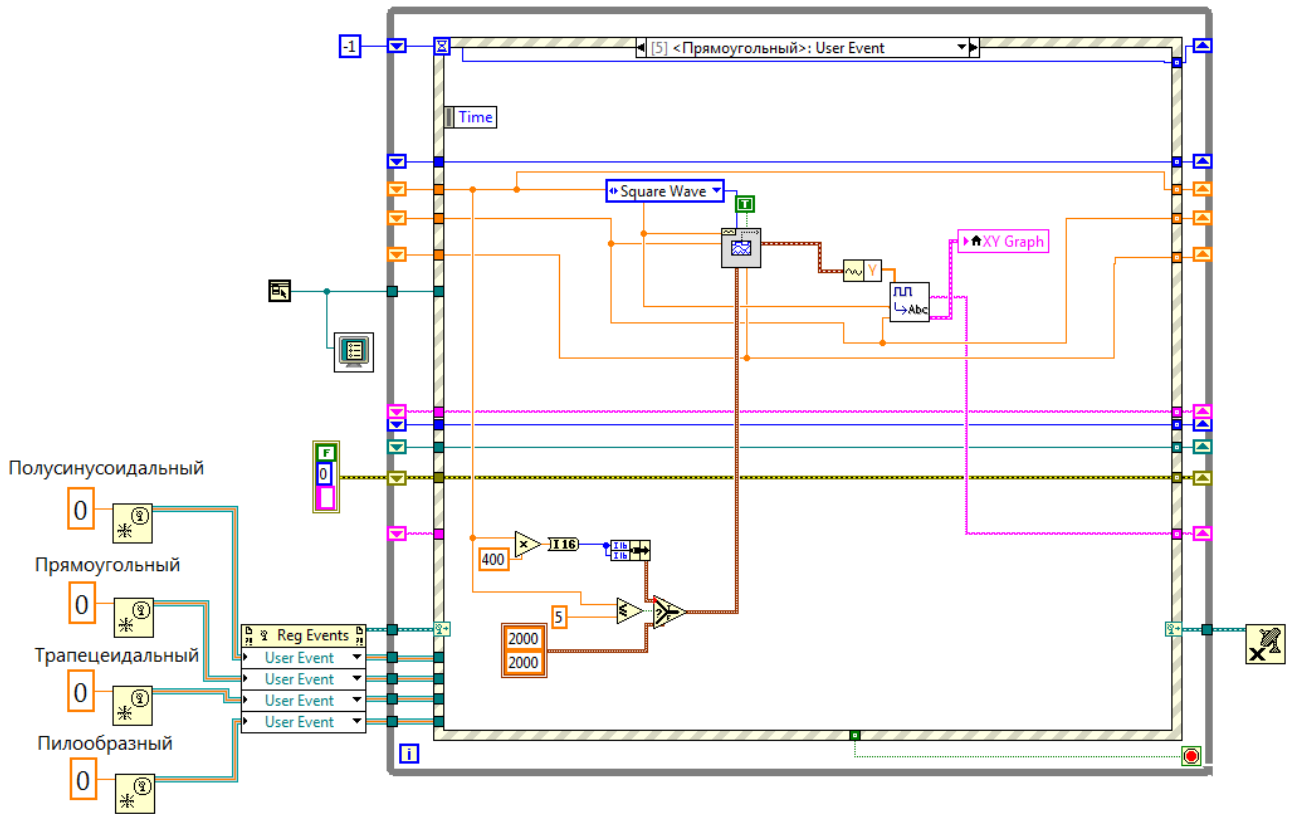
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист

97

Вкладка «Прямоугольный».



Полусинусоидальный

0

Прямоугольный

0

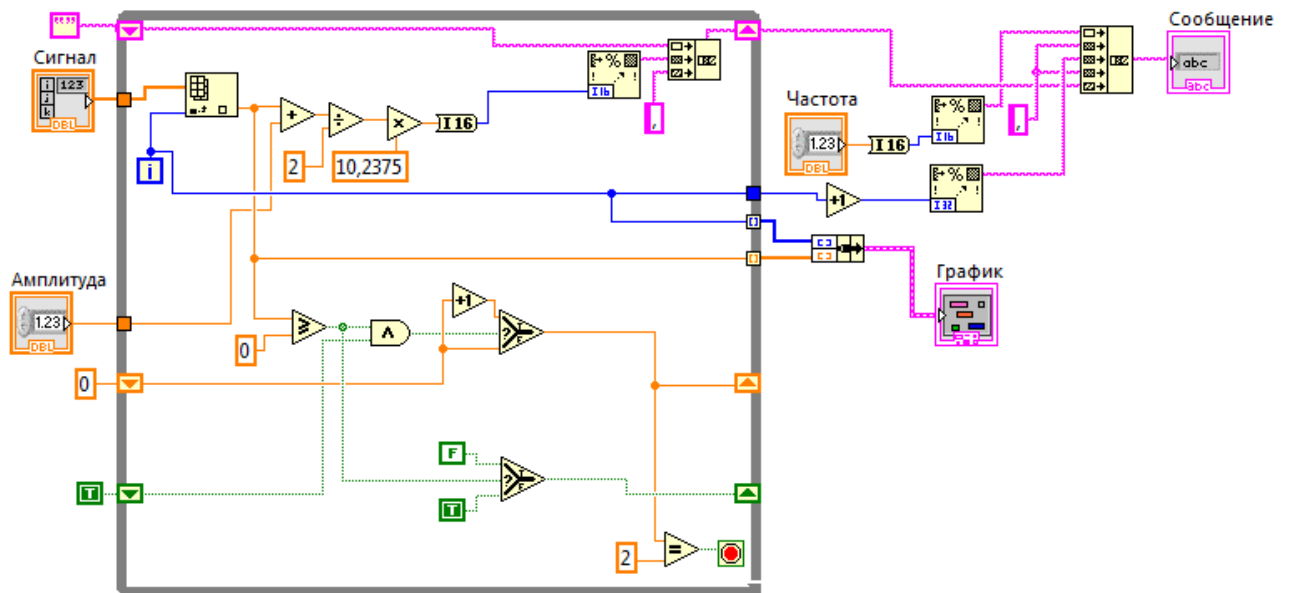
Трапецеидальный

0

Пилообразный

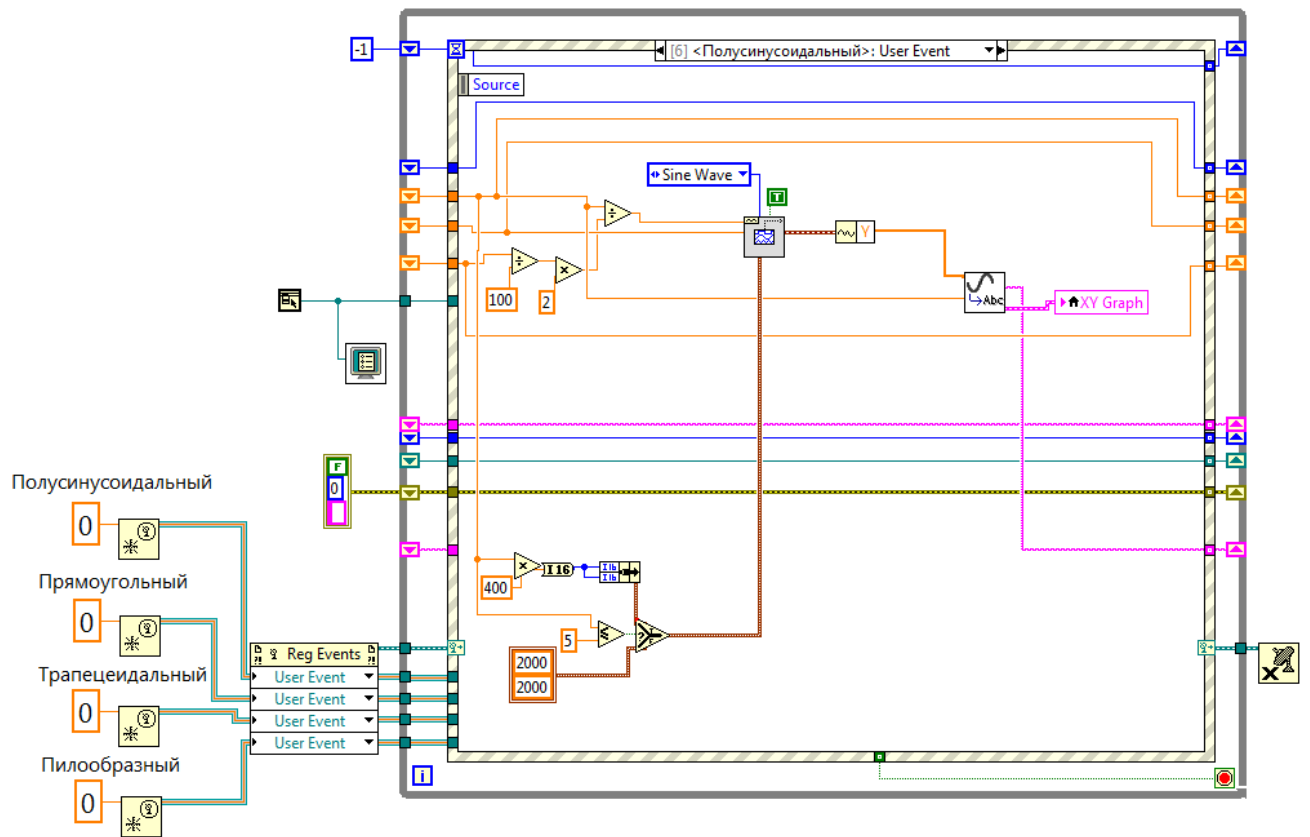
0

Подпрограмма «Square_to_string».

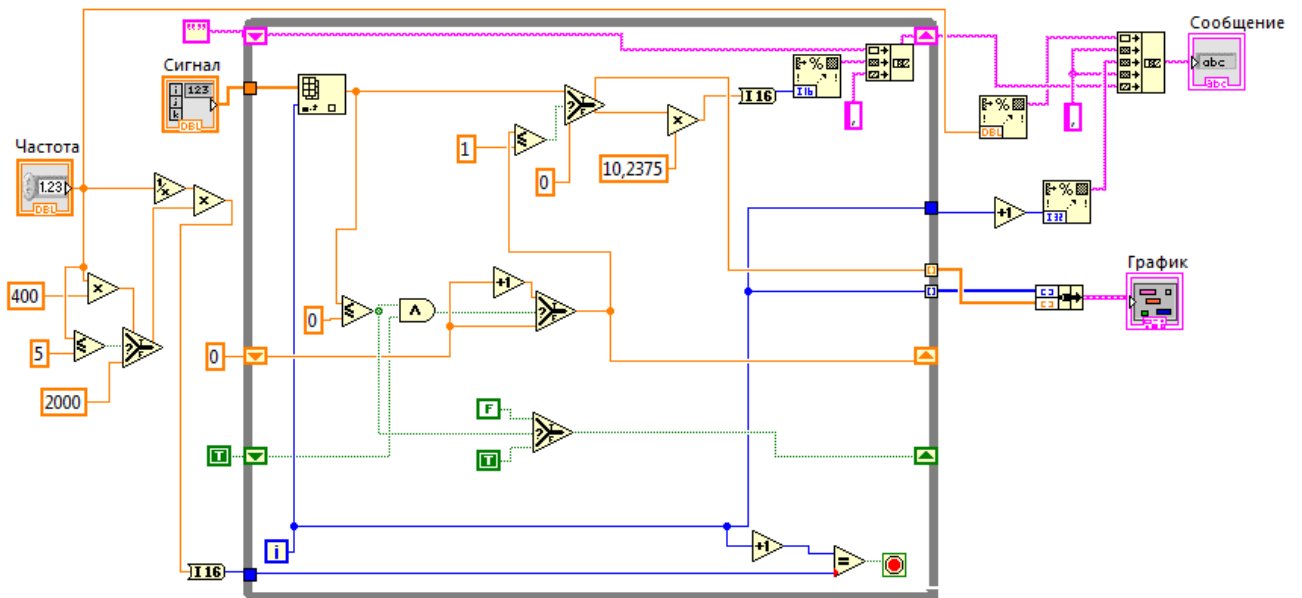


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

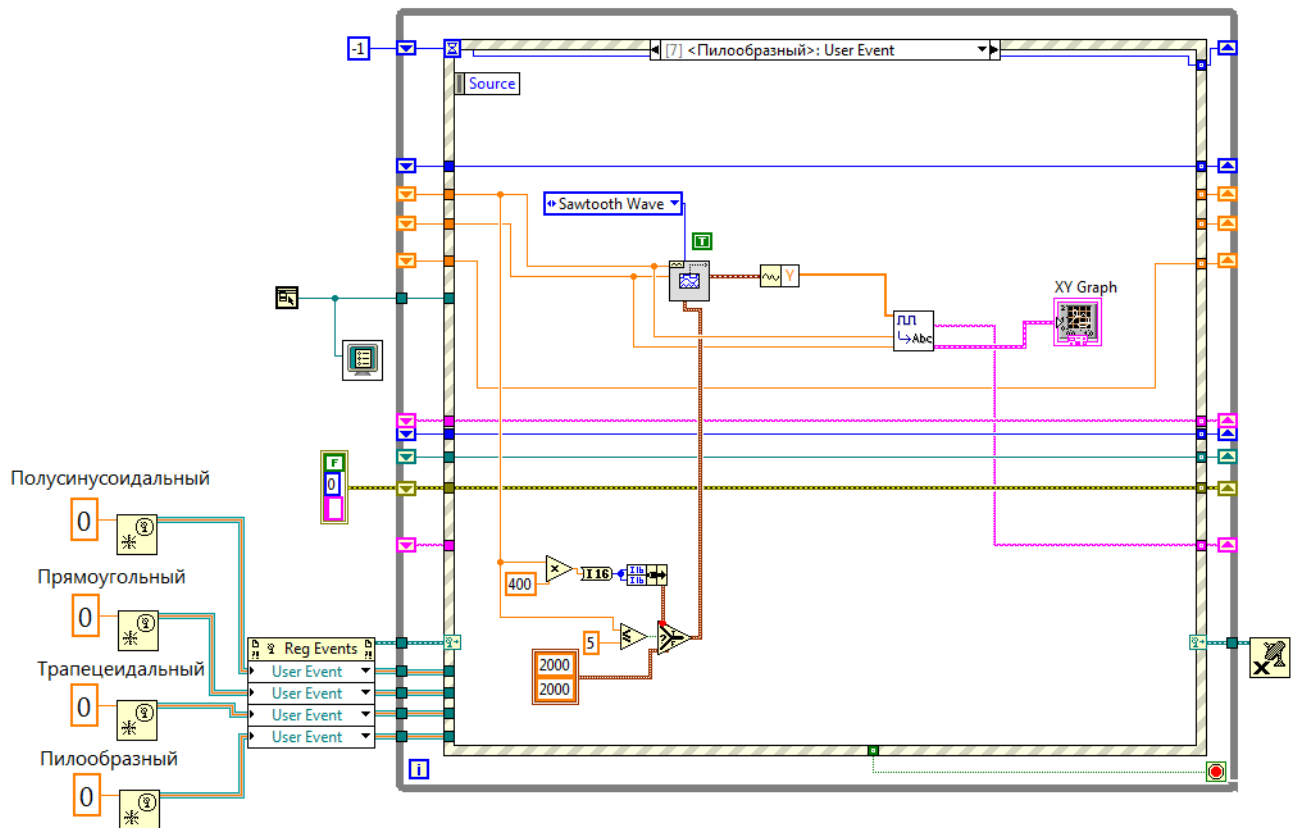
Вкладка «Полусинусоидальный».



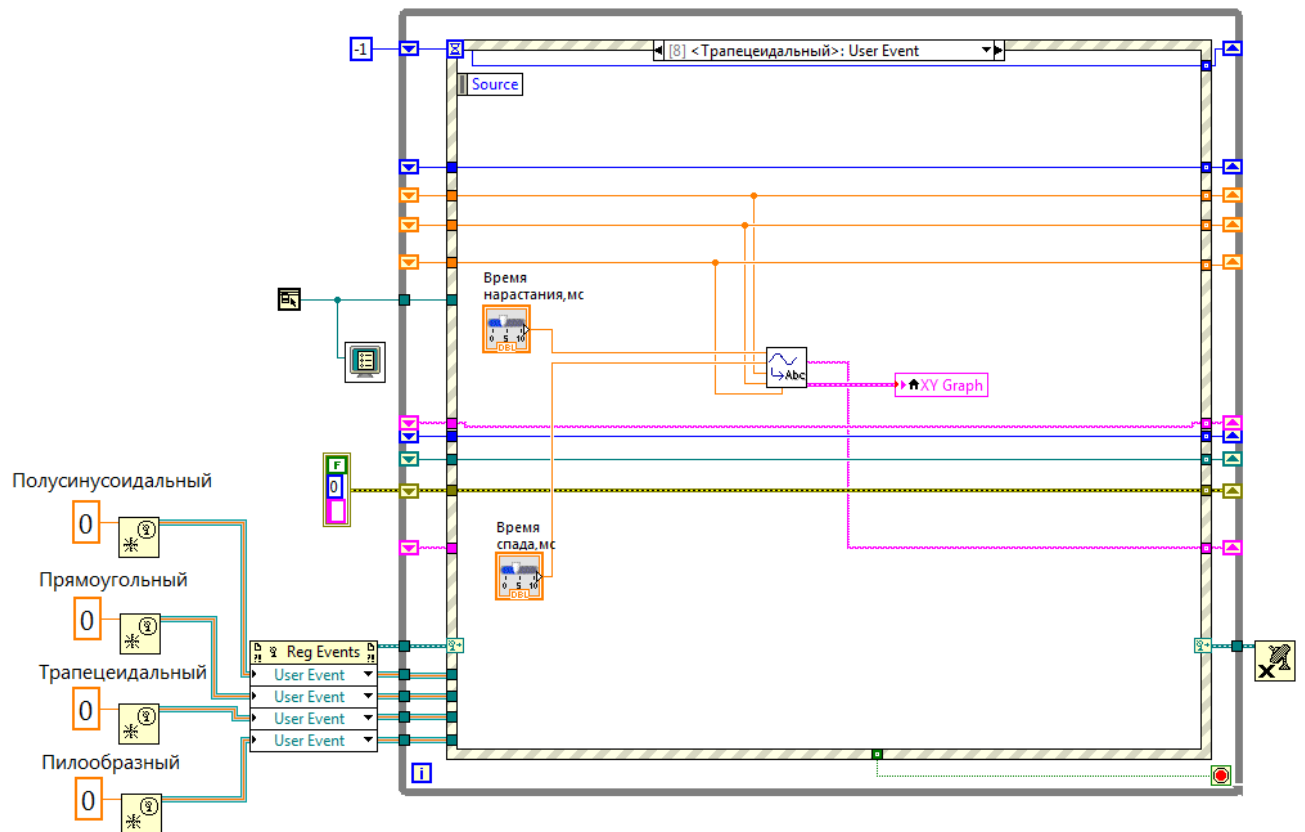
Подпрограмма «Sin_to_string».



Вкладка «Пилообразный».



Вкладка «Трапецидальный».



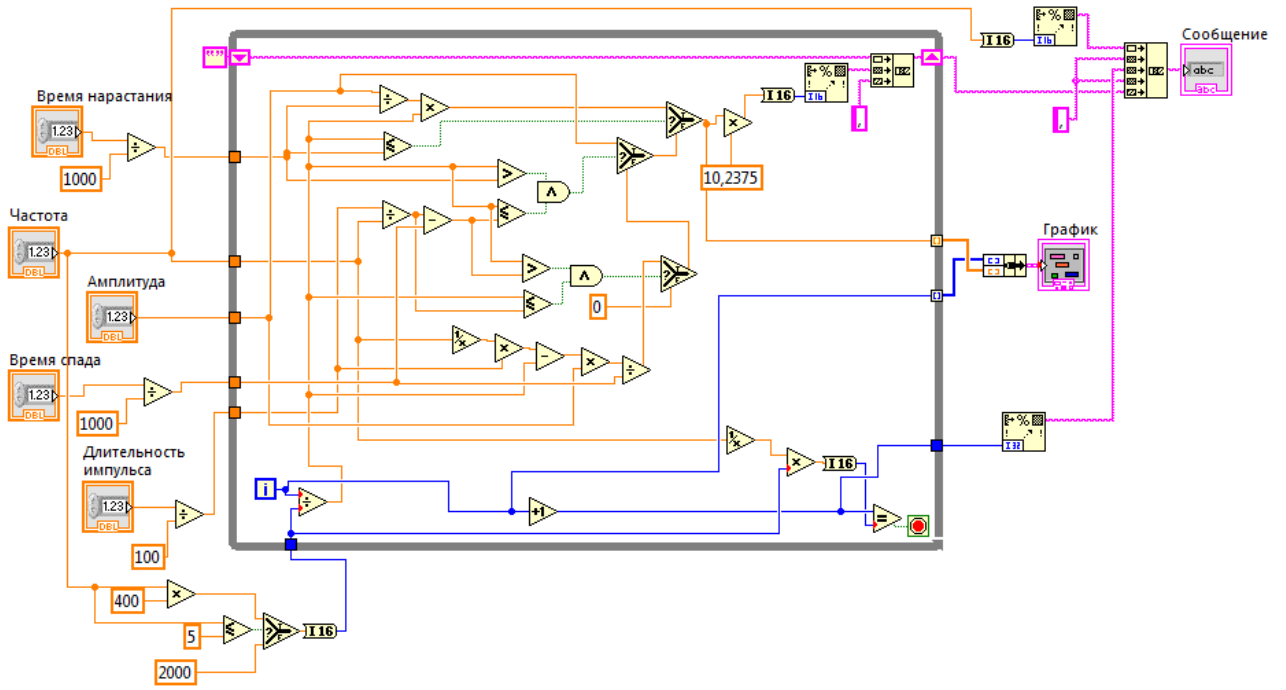
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

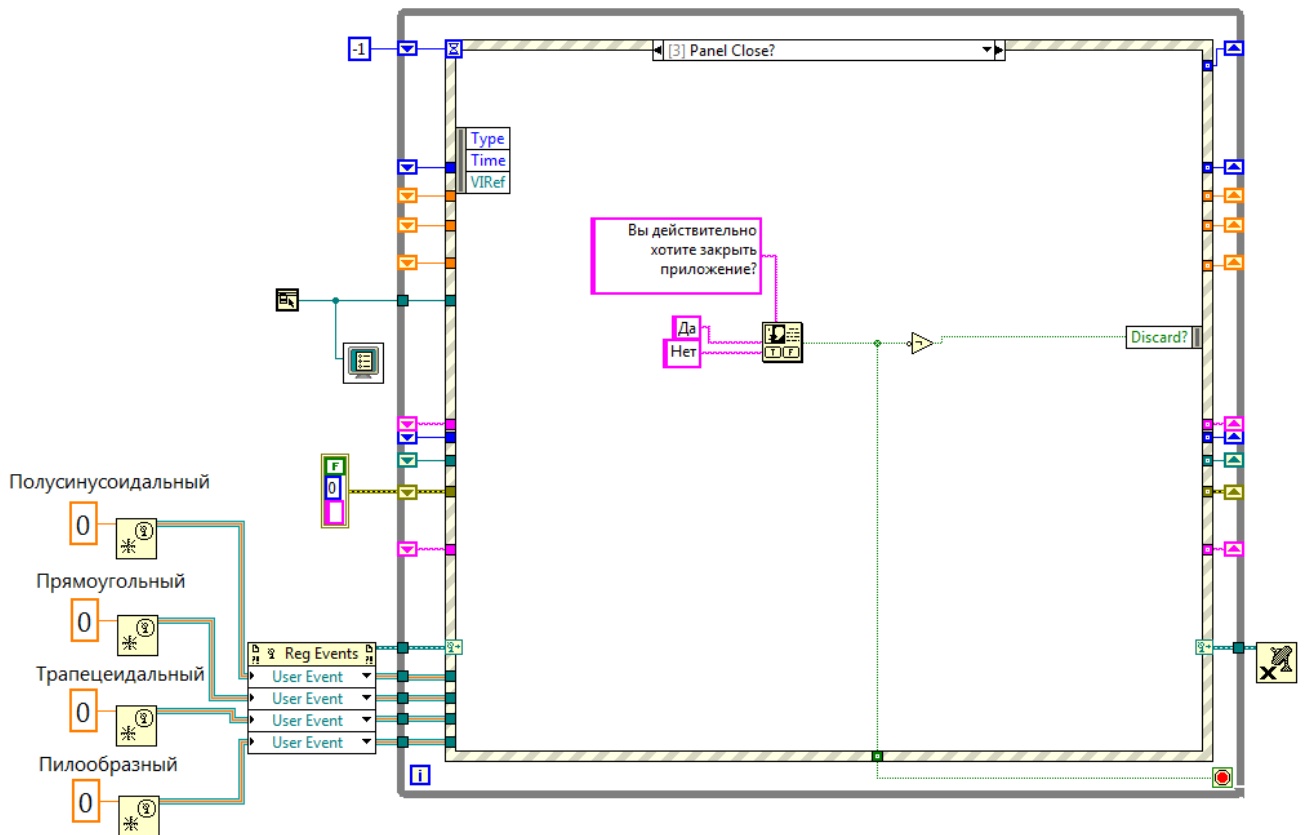
Лист

100

Подпрограмма «Trapezium_to_string».



Вкладка «Panel Close».



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист

101

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

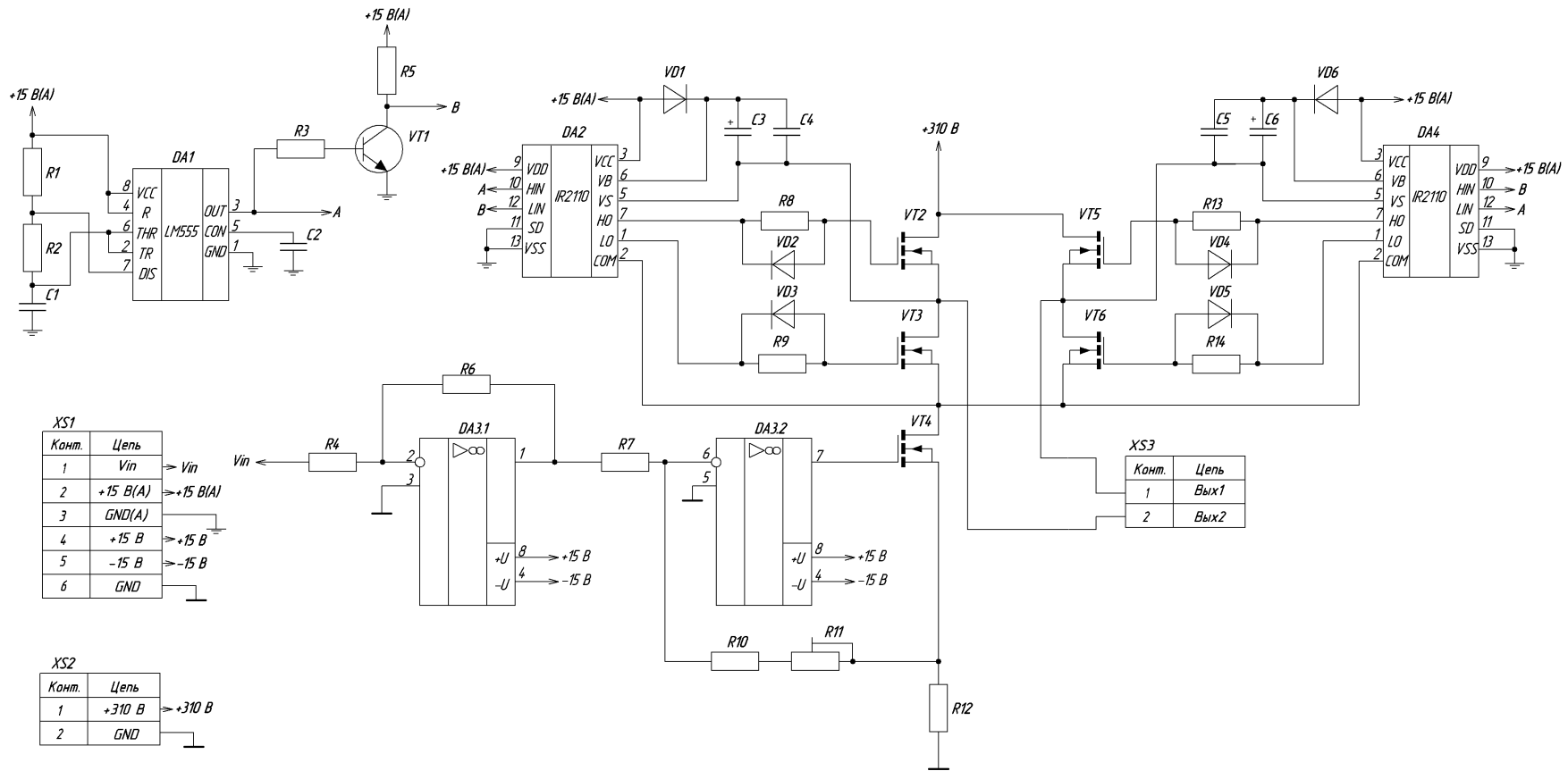
Электрическая принципиальная схема источника тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист

102



XS1

Конт.	Цель
1	Vin
2	+15 B(A)
3	GND(A)
4	+15 B
5	-15 B
6	GND

XS2

Конт.	Цель
1	+310 B
2	GND

XS3

Конт.	Цель
1	Вых1
2	Вых2

EP-02069964-11.03.04-01-19 ЭЭ								
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Источник тока Схема электрическая принципиальная	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.		Алякин А. В.	<i>А.В.</i>	19.06.19		1		1:1
Провер.		Ильин М. В.	<i>М.В.</i>	19.06.19		Лист	1	Листов
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А.А.</i>	19.06.19	МГУ им. Н.П. Огарева ИЭС П 411 гр.			
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.</i>	19.06.19				

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Перечень элементов источника тока

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
<u>Конденсаторы</u>			
C1	K10-17Б имп. 0,33 мкФ, 10%, 0805	1	
C2	K10-17Б имп. 0,01 мкФ, 10%, 0805	1	
C3, C6	ЕСАР (К50-35 мини), 22 мкФ, 50 В	2	
C4, C5	K10-17Б имп., 0,1 мкФ х7R, 10%, 0805	2	
<u>Микросхемы</u>			
DA1	LM555	1	
DA2, DA4	IR2110	2	
DA3	AD8066	1	
<u>Резисторы</u>			
R1, R2	CF-25 (C1-4) 1 Вт, 1,1 кОм, ±5%	2	
R3	SQP, 5 Вт, 56 Ом, 5%.	1	
R4, R6	CF-100 (C1-4), 1 Вт, 10 кОм, 5%	2	
R5	CF-25, (C1-4), 0,25 Вт, 390 кОм, 5%	1	
R7	CF-25 (C1-4) 0,25 Вт, 1 кОм ±5%	1	
R8, R9	CF-100 (C1-4), 1Вт, 10 Ом, 5%	2	
R10	CF-25 (C1-4), 0,25 Вт, 150 Ом, 5%	1	
R11	СПЗ-19б, 0,5 Вт, 150 Ом	1	
R12	SQP 5 Вт, 0,27 Ом, 5%	1	
R13, R14	CF-100 (C1-4), 1Вт, 10 Ом, 5%	2	
<u>Диоды</u>			
VD1 - VD6	UF4007	6	
<u>Транзисторы</u>			
VT1	BC547	1	
VT2 - VT6	IRFP460	5	
<u>Разъемы</u>			
XS1 - XS3	DPBS-9M-S (DS1034 09M)	3	

БР-02069964-11.03.04-01-19

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Аляшкин А. В.		19.06.19
Провер.		Ильин М. В.		19.06.19
Н. контр.		Шестеркина А. А.		19.06.19
Утверд.		Беспалов Н. Н.		19.06.19

Источник тока

Перечень элементов

Лит	Лист	Листов
	1	1

МГУ им. Н.П. Огарева
ИЭС ЭНЭ 411 гр.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

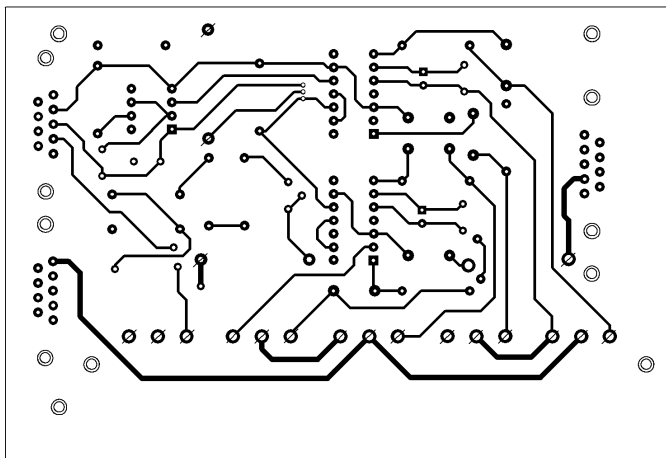
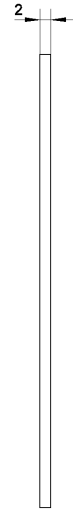
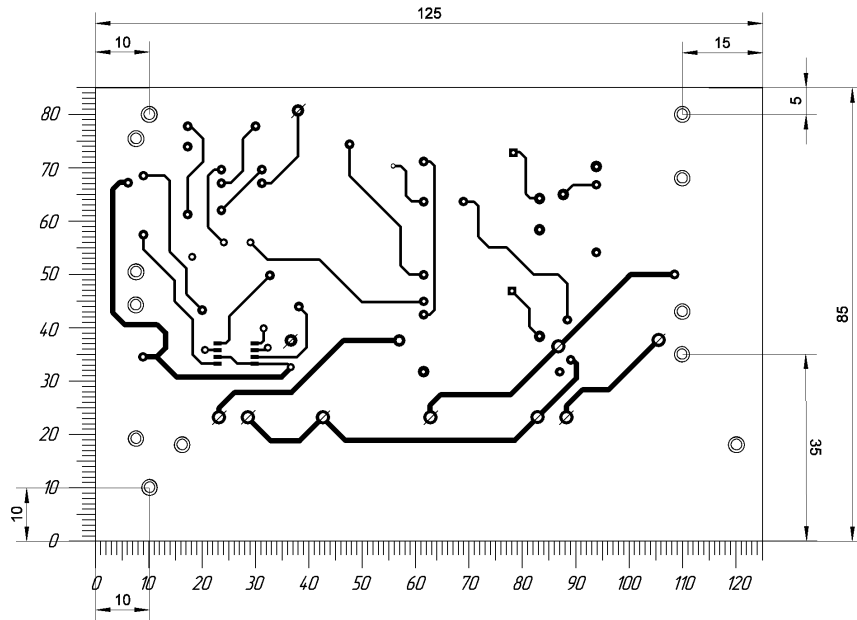
Чертеж печатной платы источника тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист

104



1. Плату изготовить комбинированным методом.
2. Шаг координатной сетки - 1 мм.
3. Ширина печатных проводников 0,5 мм и 1 мм.
4. Расстояние между проводниками в узких местах 1 мм.
5. Предельное отклонение расстояния между центрами отверстий 0,2 мм.
6. Форма контактных площадок произвольная.
8. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752-79.

Условное обозначение отверстия	Диаметр/Размеры отверстия, мм	Наличие металлизации	Диаметр/Размеры конт. площадки, мм	Количество отверстий
○	0,7	да	19	121
∅	1,5	да	2,6	21
◎	3	нет	—	12

					БР-02069964-11.03.04-01-19			
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Источник тока Печатная плата	Лит	Масса	Масштаб
Разраб.		Алякин А. В.	<i>А.В.А.</i>	13.06.18				1:1
Провер.		Ильин М. В.	<i>М.В.И.</i>	19.06.18		Лист 1	Листов 1	
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А.А.Ш.</i>	26.06.18	МГУ им. Н.П. Огарева ИЭС 411 гр.			
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.Б.</i>	19.06.18				

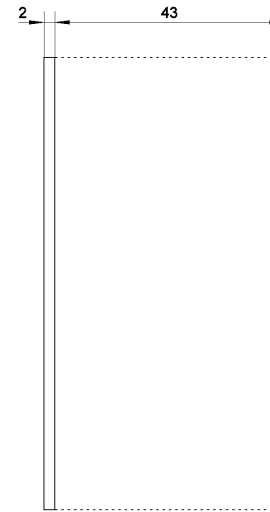
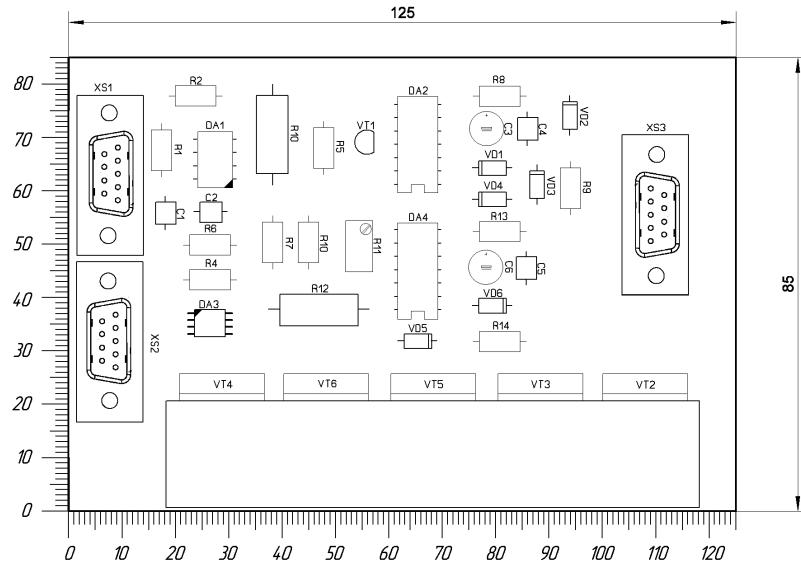
ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

Сборочный чертеж источника тока

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ



1. Плата должна соответствовать чертежу печатной платы
2. Установку элементов производить по ГОСТ.ГО.010.030.
3. Установочные размеры по сетке с шагом 1 мм.
4. Плату перед сборкой покрыть флюсом ФПЭТ РМ11029.011.
5. Припой ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
6. Печатные проводники и переходные отверстия условно не показаны

					БР-02069964-11.03.04-01-19 СБ				
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Источник тока Сборочный чертёж	Лит	Масса	Масштаб	
Разраб.		Алякин А. В.	<i>А.В.А.</i>	19.06.19				1:1	
Провер.		Ильин М. В.	<i>И.М.И.</i>	19.06.19					
						Лист	1	Листов	1
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А.А.Ш.</i>	19.06.19	МГУ им. Н.П. Огарева ИЭС 411 гр.				
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.Б.</i>	19.06.19					

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

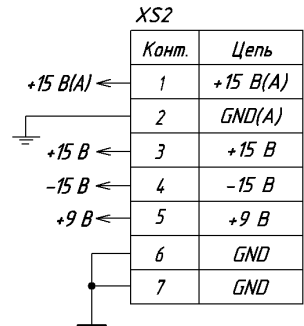
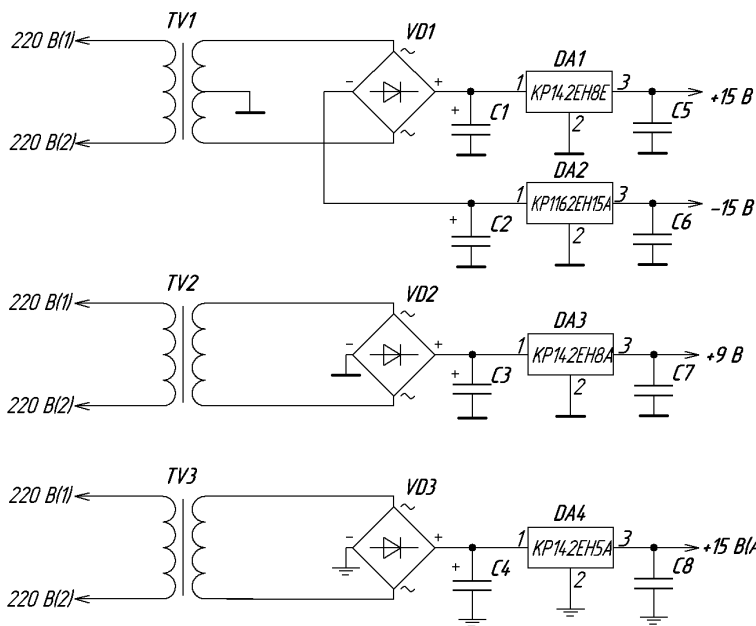
(обязательное)

Электрическая принципиальная схема источника питания

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист
106



XS1

Конт.	Цепь
1	220 В(1) → 220 В(1)
2	220 В(2) → 220 В(2)

БР-02069964-11.03.04-01-19 ЭЗ

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Алямкин А. В.	<i>А.В.А.</i>	19.06.19
Провер.		Ильин М. В.	<i>М.В.И.</i>	19.06.19
Н. контр.		Шестёркина А. А.	<i>А.А.Ш.</i>	19.06.19
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.Б.</i>	19.06.19

Источник питания
Схема электрическая
принципиальная

Лит	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	1	Листов
	1	1

МГУ им. Н.П. Огарёва
ИЭС П 411 зр.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

(обязательное)

Перечень элементов источника питания

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист

107

ПРИЛОЖЕНИЕ И

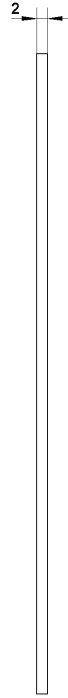
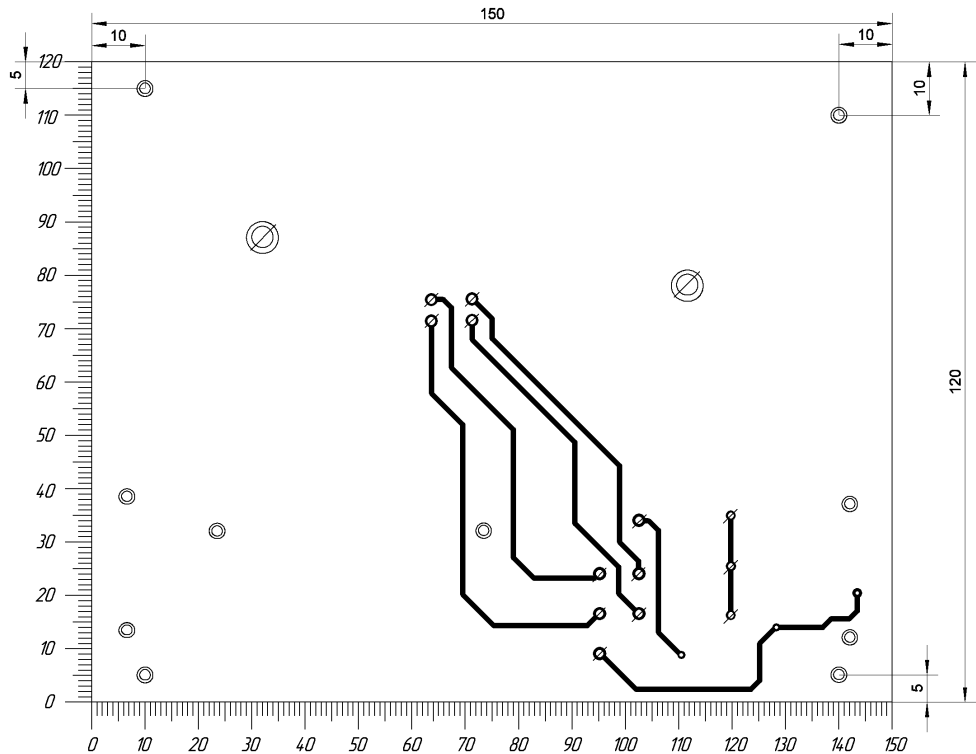
(обязательное)

Чертёж печатной платы источника питания

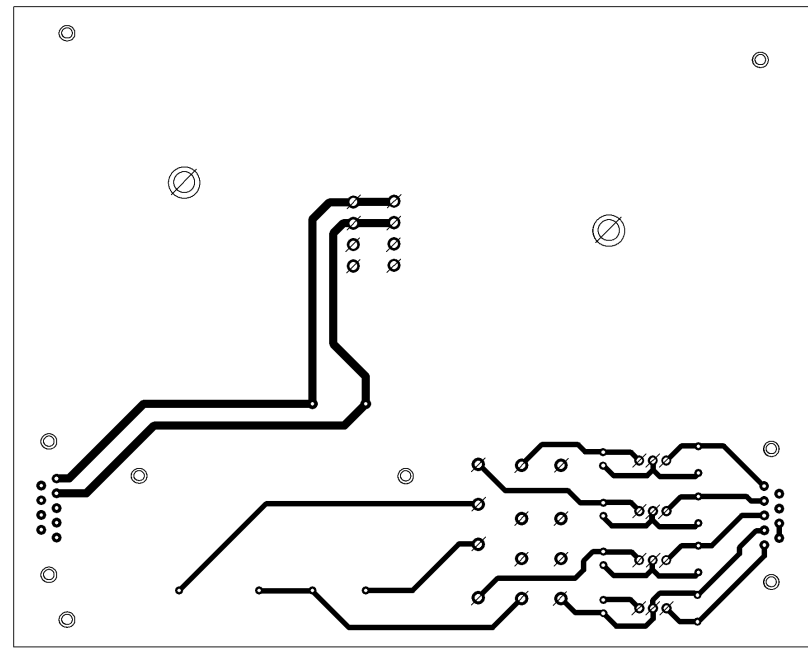
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ

Лист
108



1. Плату изготовить комбинированным методом.
2. Шаг координатной сетки - 1 мм.
3. Ширина печатных проводников 1 мм.
4. Расстояние между проводниками в узких местах 1 мм.
5. Предельное отклонение расстояния между центрами отверстий 0,2 мм.
6. Форма контактных площадок произвольная.
8. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752-79.



Условное обозначение отверстия	Диаметр/Размеры отверстия мм	Наличие металлизации	Диаметр/Размеры конт. площадки мм	Количество отверстий
○	0,7	да	19	40
⊘	1,5	да	2,6	32
⊙	3	нет	—	10
⊗	6	нет	—	2

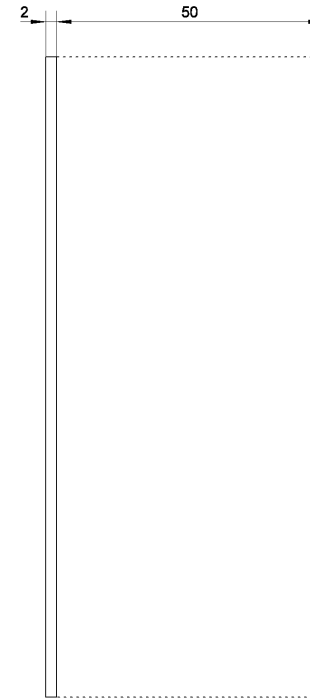
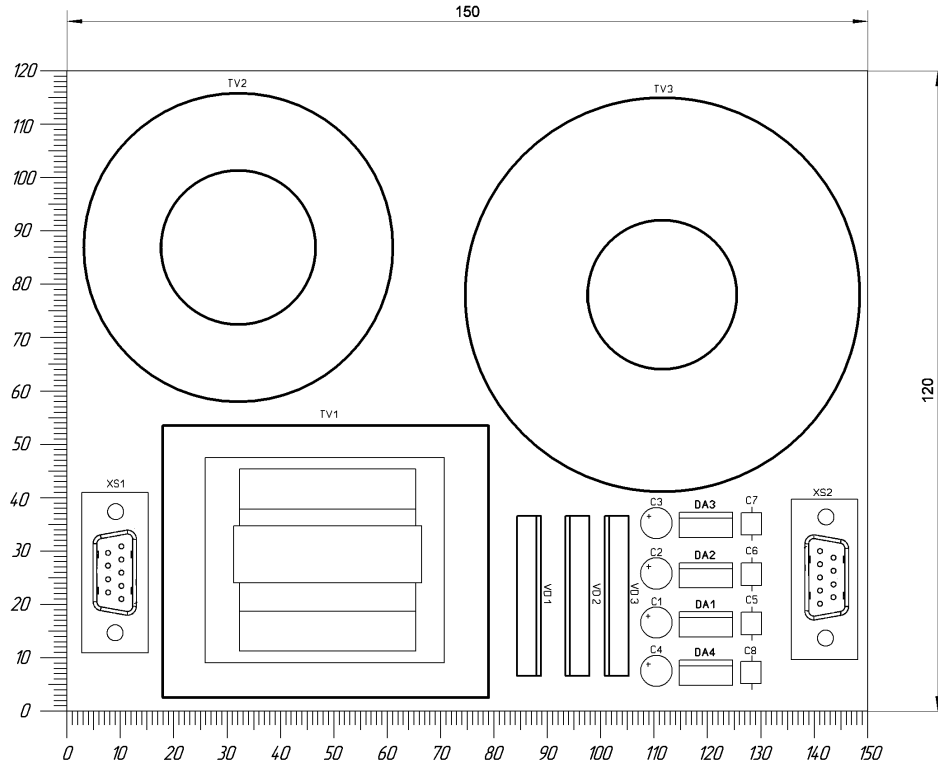
БР-02069964-11.03.04-01-19								
					Источник питания Печатная плата	Лист	Масса	Масштаб
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		1		1:1
Разраб.		Алякин А. В.	<i>А.В.А.</i>	19.06.19				
Провер.		Ильин М. В.	<i>М.В.И.</i>	19.06.19				
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А.А.Ш.</i>	19.06.19				
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.Б.</i>	19.06.19				
МГУ им. Н.П. Огарева ИЭС 411 гр.								

ПРИЛОЖЕНИЕ К

(обязательное)

Сборочный чертёж источника тока

					<i>БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>109</i>



1. Плата должна соответствовать чертежу печатной платы
2. Установку элементов производить по ОСТ.ГО.010.030.
3. Установочные размеры по сетке с шагом 1 мм.
4. Плату перед сборкой покрыть флюсом ФПЭТ РМ11029.011.
5. Применить ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
6. Печатные проводники и переходные отверстия условно не показаны

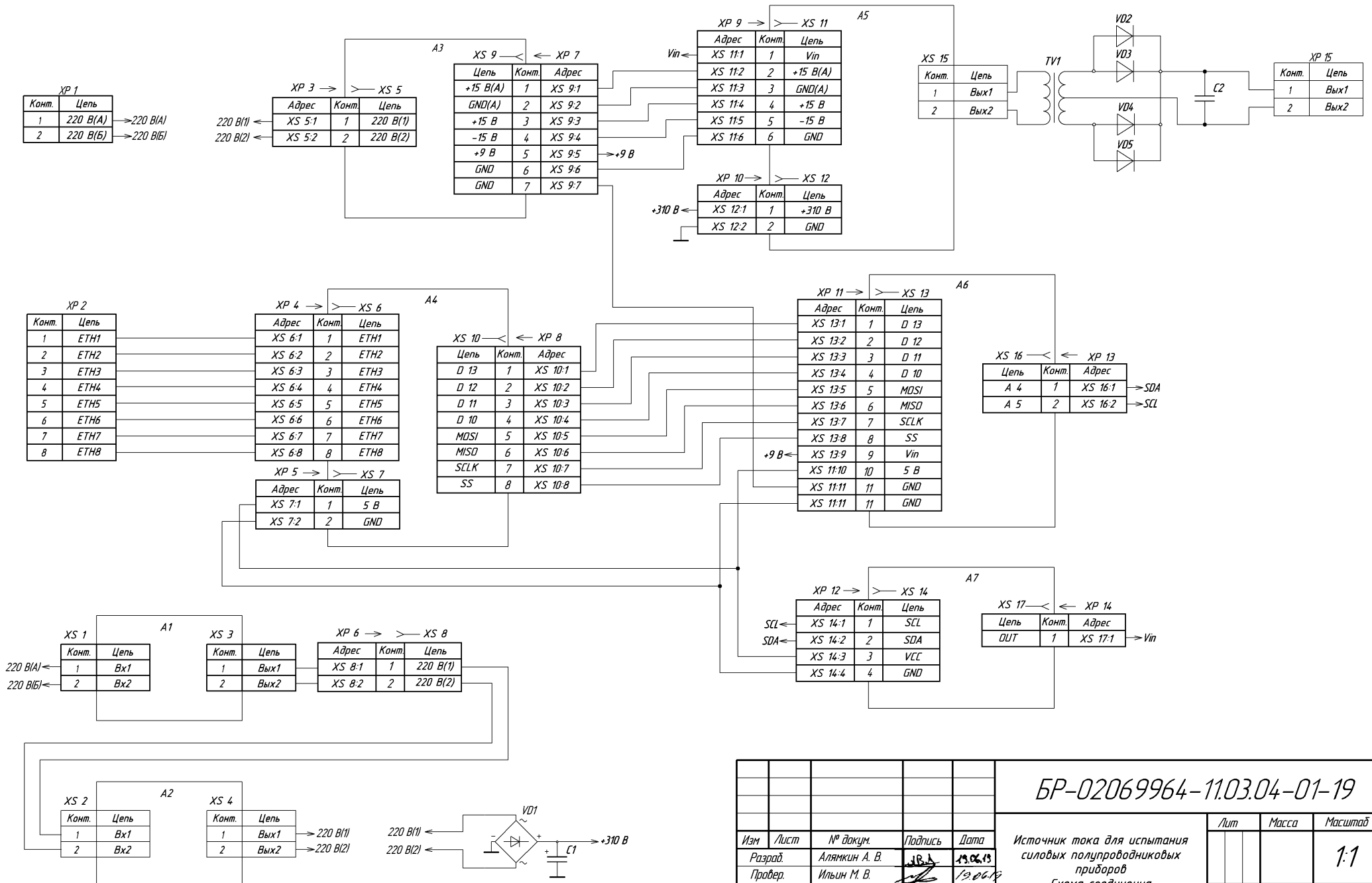
					БР-02069964-11.03.04-01-19 СБ			
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Источник питания Сборочный чертёж	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.		Алякин А. В.	<i>А.В.А.</i>	19.06.19				1:1
Провер.		Ильин М. В.	<i>И.М.И.</i>	19.06.19		Лист	1	Листов
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А.А.Ш.</i>	19.06.19	МГУ им. Н.П. Огарева ИЭС 411 гр.			
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.Б.</i>	19.06.19				

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

(обязательное)

Монтажная схема

					<i>БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>110</i>



БР-02069964-11.03.04-01-19				Лист	Масса	Масштаб
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов Схема соединения	
Разраб.		Алямкин А. В.	<i>А.В.</i>	19.06.19		
Провер.		Ильин М. В.	<i>М.В.</i>	19.06.19		
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А.А.</i>	19.06.19	Лист	1
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н.Н.</i>	19.06.19	Листов	1
МГУ им. Н.П. Огарева ИЭС П 411 гр.						

ПРИЛОЖЕНИЕ М

(обязательное)

Перечень элементов монтажной схемы

					БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		111

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
	<u>Трансформаторы</u>		
A1	ОСЗР-2,0-220/220	1	
	<u>Выключатели</u>		
A2	S202 C10	1	
	<u>Источники питания</u>		
A3	Источник питания	1	
	<u>Платы микроконтроллеров</u>		
A4	Ethernet Shield W5100	1	
A6	Arduino UNO	1	
	<u>Источники тока</u>		
A5	Источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов	1	
	<u>Модули ЦАП</u>		
A7	МСР4725	1	
	<u>Конденсаторы</u>		
C1	ЕСАР (К50-35), 2200 мкФ, 400 В	1	
C2	ЕСАР (К50-35), 6800 мкФ, 16 В	1	
	<u>Диоды</u>		
VD1	GBJ2510-F	1	
VD2 - VD4	242NQ030Pb	4	
	<u>Разъемы</u>		
XP1	Вилка V4(B) 16A	1	
XP2, XP4	TP8P8C-R-P5	2	
XP3	DB-9F (DS1033-09F)	1	
XP5	DNO 0206 (L TO 25 06)	2	
XP6	AS-4 12 (K24 17) (AC-102) (CP-22S)	1	
XP7	DB-9F (DS1033-09F)	1	
XP8	DNO 0206 (L TO 25 06)	8	
XP9, XP10	DB-9F (DS1033-09F)	2	
XP11	DNO 0206 (L TO 25 06)	12	

БР-02069964-11.03.04-01-19

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Алямкин А. В.		19.06.19
Провер.		Ильин М. В.		19.06.19
Н. контр.		Шестеркина А. А.		19.06.19
Утверд.		Беспалов Н. Н.		19.06.19

Источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов
Перечень элементов

Лит

Лист

Листов

1

2

МГУ им. Н.П. Огарева
ИЭС ЭНЭ 411 гр.

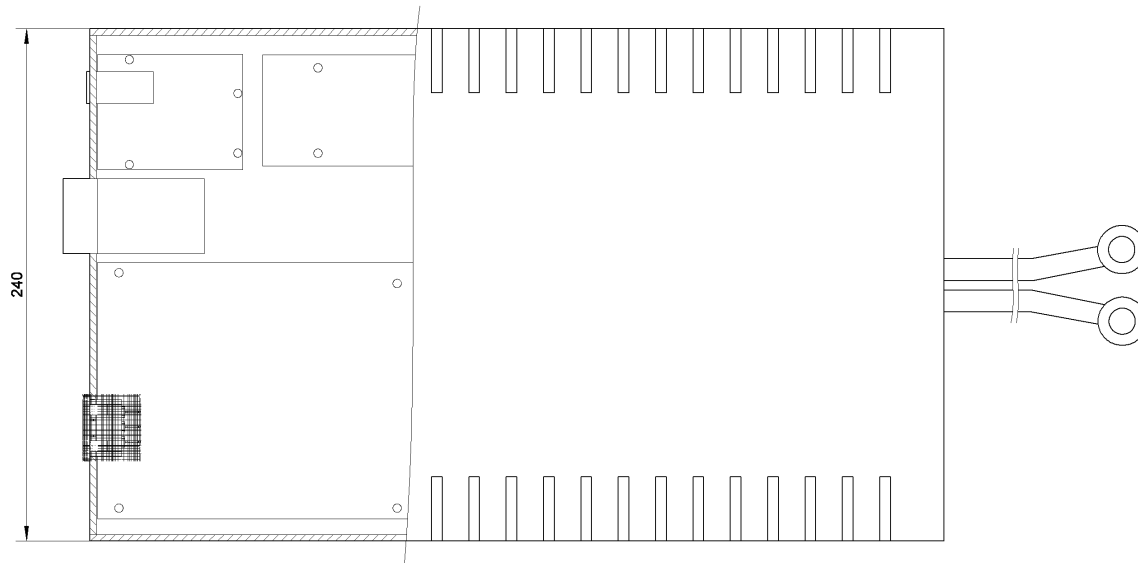
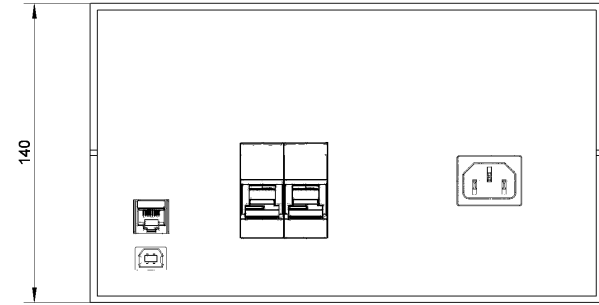
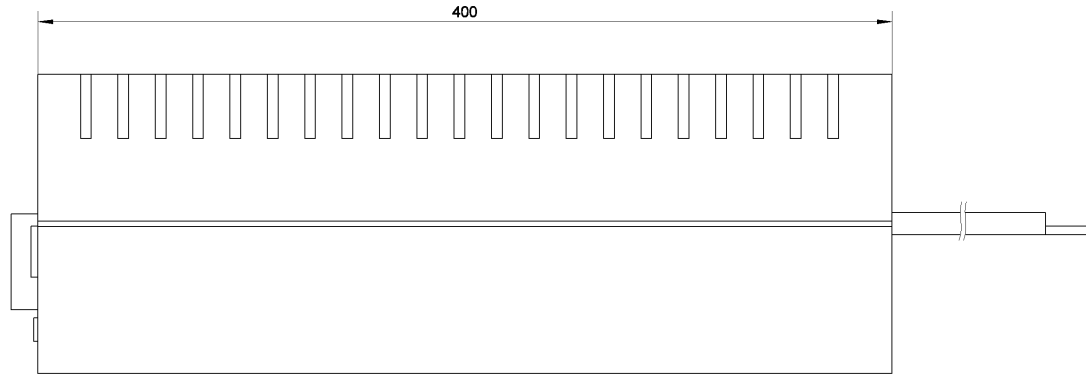
ПРИЛОЖЕНИЕ Н

(обязательное)

Чертёж корпуса устройства

					<i>БР-02069964-11.03.04-01-19 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>112</i>

БР-02069964-11.03.04-01-19



					БР-02069964-11.03.04-01-19			
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Источник тока для испытания силовых полупроводниковых приборов Корпус устройства</i>	<i>Лит</i>	<i>Масса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Алякин А. В.</i>	<i>А.В.</i>	<i>19.06.19</i>				1:2,5
<i>Провер.</i>		<i>Ильин М. В.</i>	<i>М.В.</i>	<i>19.06.19</i>				
						<i>Лист</i> 1	<i>Листов</i> 1	
<i>Н. контр.</i>		<i>Шестеркина А. А.</i>	<i>А.А.</i>	<i>19.06.19</i>		<i>МГУ им. Н.П. Огарева ИЭС 411 зр.</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Беспалов Н. Н.</i>	<i>Н.Н.</i>	<i>19.06.19</i>				

№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Кол. листов	Прим.
1			<u>Документация текстовая</u>		
2	A4	БР-02069964-11.03.04-01-19	Пояснительная записка	112	
3	A4	БР-02069964-11.03.04-01-19	Перечень элементов	1	
4			источник тока		
5	A4	БР-02069964-11.03.04-01-19	Перечень элементов	1	
6			источник питания		
7	A4	БР-02069964-11.03.04-01-19	Перечень элементов		
8			источник тока для испытания силовых	2	
9			полупроводниковых приборов		
10					
11			<u>Документация графическая</u>		
12	A3	БР-02069964-11.03.04-01-19 ЗЗ	Схема электрическая принципиальная	1	
13			Источник тока		
14	A4	БР-02069964-11.03.04-01-19 ЗЗ	Схема электрическая принципиальная	1	
15			Источник питания		
16	A3	БР-02069964-11.03.04-01-19	Чертеж печатной платы	1	
17			источника тока		
18	A3	БР-02069964-11.03.04-01-19	Чертеж печатной платы	1	
19			источника питания		
20	A3	БР-02069964-11.03.04-01-19 СБ	Сборочный чертеж	1	
21			источника тока		
22	A3	БР-02069964-11.03.04-01-19 СБ	Сборочный чертеж	1	
23			источника питания		
24	A3	БР-02069964-11.03.04-01-19	Монтажная схема	1	
25			источник тока для испытания силовых		
26			полупроводниковых приборов		
27					

БР-02069964-11.03.04-01-19

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Алямкин А. В.		19.06.19	Лит	Лист	Листов
Провер.		Ильин М. В.		19.06.19		1	2
Н. контр.		Шестёркина А. А.		19.06.19	МГУ им. Н.П. Огарёва ИЭС ЭНЗ 411 гр.		
Утверд.		Беспалов Н. Н.		19.06.19			

Источник тока
для испытания силовых
полупроводниковых приборов

<i>№ строки</i>	<i>Формат</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование</i>	<i>Кол. листов</i>	<i>Прим.</i>
1	A3	БР-02069964-11.03.04-01-19	Чертеж корпуса устройства	1	
2			источника тока для испытания силовых		
3			полупроводниковых приборов		
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
					<i>Лист</i>
					2
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	

БР-02069964-11.03.04-01-19