



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки – 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

ООП – Интеллектуальные робототехнические и мехатронные системы

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Лабораторный блок питания с двумя режимами регулирования: тока и напряжения УДК 621.311.6

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E91	Садиков Роман Евгеньевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Тугов Иван Андреевич			

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Мезенцева Ирина Леонидовна			

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Кучман Алена Владимировна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Киселев Александр Викторович	к.т.н.		

Томск – 2023 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
<b>УК(У)-2</b>	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
<b>УК(У)-3</b>	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
<b>УК(У)-4</b>	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
<b>УК(У)-5</b>	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
<b>УК(У)-6</b>	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
<b>УК(У)-7</b>	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
<b>УК(У)-8</b>	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
<b>УК(У)-9</b>	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способен представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики
<b>ОПК(У)-2</b>	Владеет физико-математическим аппаратом, необходимым для описания мехатронных и робототехнических систем
<b>ОПК(У)-3</b>	Владеет современными информационными технологиями, готовностью применять современные средства автоматизированного проектирования и машинной графики при проектировании систем и их отдельных модулей, а также для подготовки конструкторско-технологической документации, соблюдать основные требования информационной безопасности
<b>ОПК(У)-4</b>	Готов собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии в своей профессиональной деятельности
<b>ОПК(У)-5</b>	Способен использовать основы экономических знаний при оценке эффективности результатов своей профессиональной деятельности
<b>ОПК(У)-6</b>	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением

Код компетенции	Наименование компетенции
	информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен составлять математические модели мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных элементов и модулей, включая информационные, электромеханические, гидравлические, электрогидравлические, электронные устройства и средства вычислительной техники
ПК(У)-2	Способен разрабатывать программное обеспечение, необходимое для обработки информации и управления в мехатронных и робототехнических системах, а также для их проектирования
ПК(У)-3	Способен разрабатывать экспериментальные макеты управляющих, информационных и исполнительных модулей мехатронных и робототехнических систем и проводить их экспериментальное исследование с применением современных информационных технологий
ПК(У)-4	Способен осуществлять анализ научно-технической информации, обобщать отечественный и зарубежный опыт в области средств автоматизации и управления, проводить патентный поиск
ПК(У)-5	Способен проводить эксперименты на действующих макетах, образцах мехатронных и робототехнических систем по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных технологий и технических средств
ПК(У)-6	Способен проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных пакетов с целью исследования математических моделей мехатронных и робототехнических систем
ПК(У)-7	Готов участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок
ПК(У)-8	Способен внедрять результаты исследований и разработок и организовывать защиту прав на объекты интеллектуальной собственности
ПК(У)-9	Способен участвовать в качестве исполнителя в научно-исследовательских разработках новых робототехнических и мехатронных систем
ПК(У)-10	Готов участвовать в подготовке технико-экономического обоснования проектов создания мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей
ПК(У)-11	Способен производить расчеты и проектирование отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием
ПК(У)-12	Способен разрабатывать конструкторскую и проектную документацию механических, электрических и электронных узлов мехатронных и робототехнических систем в соответствии с имеющимися стандартами и техническими условиями
ПК(У)-13	Готов участвовать в проведении предварительных испытаний составных частей опытного образца мехатронной или робототехнической системы по заданным программам и методикам и вести соответствующие журналы испытаний



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки – 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись) \_\_\_\_\_ (Дата) Мамонова Т.Е.  
(Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
8Е91	Садиков Роман Евгеньевич

Тема работы:

Лабораторный блок питания с двумя режимами регулирования: тока и напряжения	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.2023, №34-86/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	04.06.2023
--	------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом разработки является лабораторный блок питания.</p> <p>Исходные данные: Выходное напряжение <math>0 \div 27</math> В; Выходной ток <math>0 \div 3</math> А; Точность стабилизации по напряжению – 5 %; Точность стабилизации по току – 10 %; Количество режимов – 2.</p>
---	---

<p><b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литературный обзор предметной области;</li> <li>2. Разработка принципиальной электрической схемы силовой части блока питания;</li> <li>3. Разработка принципиальной электрической схемы системы управления блока питания;</li> <li>4. Разработка печатной платы;</li> <li>5. Разработка алгоритма управления;</li> <li>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>7. Социальная ответственность.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Принципиальная электрическая схема;  Печатная плата;  Спецификация.</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Мезенцева Ирина Леонидовна, старший преподаватель ООД ШБИП</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Былкова Татьяна Васильевна, доцент ОСГН ШБИП, к.э.н.</p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>03.02.2023</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Старший преподаватель ОАР ИШИТР</p>	<p>Тутов Иван Андреевич</p>			<p>03.02.2023</p>

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>8E91</p>	<p>Садиков Роман Евгеньевич</p>		<p>03.02.2023</p>



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
Направление подготовки (ООП) – Шифр 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»  
Уровень образования – Бакалавриат  
Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники  
Период выполнения – Весенний семестр 2022 /2023 учебного года

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

Группа	ФИО
8Е91	Садиков Роман Евгеньевич

Тема работы:

Лабораторный блок питания с двумя режимами регулирования: тока и напряжения
---

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	04.06.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.05.2023 г.	Основная часть ВКР	60
30.05.2023 г.	Раздел «Социальная ответственность»	20
30.05.2023 г.	Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	20

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Тутов Иван Андреевич			03.02.2023

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Татьяна Егоровна	к.т.н.		03.02.2023

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е91	Садиков Роман Евгеньевич		03.02.2023

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 123 страницы, 43 рисунка, 19 таблиц, 24 источника, 10 приложений.

Ключевые слова: Лабораторный блок питания, стабилизатор напряжения, стабилизатор тока, регулятор напряжения, регулятор тока, широтно-импульсная модуляция, полевые транзисторы.

Объектом разработки является лабораторный блок питания с двумя режимами регулирования: тока и напряжения.

Цель работы – исследование, проектирование и разработка лабораторного блока питания с двумя режимами регулирования: тока и напряжения.

В ходе работы проводились исследования существующих конструкций блоков питания и принципы их работы, проводилось проектирование принципиальной электрической схемы устройства, в том числе определение параметров электронных компонентов, проводилось САД-проектирование печатной платы устройства, разрабатывалось программное обеспечение, проводилось тестирование полученных результатов в лабораторных условиях.

В результате исследования разработаны принципиальная электрическая схема устройства, печатная плата и алгоритм работы управляющего контроллера.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики:

- 1) 2 режима регулирования;
- 2) стабилизация и регулирование выходного напряжения от 0 до 27 В;
- 3) стабилизация и регулирование выходного тока от 0 до 3 А;
- 4) точность стабилизации по напряжению 5 %;
- 5) точность стабилизации по току 10 %.

Степень внедрения: минимально жизнеспособный продукт (MVP), стадия зрелости технологии (согласно оценке TRL): TRL 3 – 4.

Область применения: оборудование для предприятий и сервисов, которые занимаются разработкой, изготовлением и/или ремонтом радиоэлектронной аппаратуры, научно-исследовательских центров и ВУЗов, проводящих исследования в области электротехники, робототехники и радиотехники.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке бюджетного варианта лабораторного блока питания на основе недорогой и широко распространённой элементной базы с техническими характеристиками приближёнными (соответствующими, не уступающими, не значительно уступающими и т.д.) характеристикам дорогих промышленных аналогов, что в условиях постоянно расширяющихся санкций, возникновения дефицита и удорожания импортной элементной базы может привести к востребованности недорогих аналогов особенно в среде малого, среднего предпринимательства и бюджетных организаций.

В будущем планируется качественная проработка программно-аппаратного комплекса с использованием современных компонентов, в том числе и возможность использования компонентов отечественных производителей, улучшение масса-габаритных характеристик, за счет применения более совершенной топологии и прохождение серий тестов в промышленных условиях.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

БП – блок питания;

КЗ – короткое замыкание;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЭДС – электродвижущая сила;

ТЗ – техническое задание;

МК – микроконтроллер;

MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) – полевой транзистор с изолированным затвором;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ОУ – операционный усилитель;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ПК – персональный компьютер;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

**листинг:** Выходной файл табличного вида, создаваемый транслятором и имеющий текстовый вид, необходимый при отладке программы, поскольку кроме строк самой программы содержит дополнительную информацию.

## Содержание

Реферат .....	7
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки .....	9
Введение .....	14
1 Обзор литературы и анализ предметной области.....	16
1.1 Задачи вторичного источника электропитания.....	16
1.2 Основные конструкции источников вторичного электропитания .....	17
1.2.1 Линейный блок питания.....	17
1.2.2 Импульсный блок питания.....	18
1.3 Достоинства и недостатки .....	19
1.3.1 Достоинства трансформаторных БП .....	19
1.3.2 Недостатки трансформаторных БП .....	19
1.3.3 Достоинства импульсных БП.....	19
1.3.4 Недостатки импульсных БП .....	20
1.4 Импульсные преобразователи напряжения .....	20
1.4.1 Понижающий преобразователь .....	23
2 Разработка принципиальной электрической схемы силовой части блока питания .....	25
2.1 Разработка структурной схемы.....	25
2.2 Расчет номиналов элементов .....	26
2.3 Определение максимального и минимального значений коэффициента заполнения.....	27
2.4 Выбор контроллера и определение рабочей частоты преобразователя ....	28
2.5 Расчет параметров силового дросселя .....	28
2.6 Расчет параметров выходного конденсатора фильтра .....	29
2.7 Расчет параметров диода .....	30
2.8 Расчет параметров ключевого транзистора .....	31
2.9 Расчет параметров входного конденсатора .....	32
2.10 Расчет мощности трансформатора .....	33

3	Разработка принципиальной электрической схемы системы управления блока питания .....	34
3.1	Факторы учитываемые при разработке системы управления.....	34
3.2	Драйвер силового транзистора .....	35
3.2.1	Вспомогательный ключ на MOSFET транзисторе .....	35
3.2.2	Микросхема-драйвер IR2117 .....	49
3.2.3	Микросхема-драйвер IR2110 .....	53
3.3	Обратная связь по напряжению.....	56
3.4	Обратная связь по току .....	57
4	Разработка печатной платы .....	61
5	Разработка алгоритма работы микроконтроллера.....	64
5.1	Конфигурация портов ввода-вывода.....	64
5.2	Инициализация АЦП.....	64
5.3	Чтение данных с АЦП.....	66
5.4	Определение переменных .....	67
5.5	Основная функция.....	68
5.6	Индикация.....	68
5.7	Функции стабилизаторов .....	69
6	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	76
6.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	76
6.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	76
6.1.2	Анализ конкурентных технических решений .....	76
6.1.3	SWOT – анализ .....	77
6.2	Определение возможных альтернатив проведения научных исследований .....	78
6.3	Планирование научно-исследовательских работ .....	80
6.4	Бюджет научно-технического исследования .....	83
6.4.1	Расчет материальных затрат НТИ .....	83

6.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование .....	84
6.4.3 Расчет затрат на основную заработную плату исполнителей и отчисления во внебюджетные фонды .....	84
6.4.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	85
6.5 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности разработки.....	86
6.6 Вывод по главе .....	88
7 Социальная ответственность .....	91
7.1 Введение .....	91
7.2.1 Правовые нормы трудового законодательства .....	91
7.2.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны.....	92
7.3 Производственная безопасность.....	94
7.3.1 Отклонение показателей микроклимата .....	94
7.3.2 Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума.....	96
7.3.3 Статические физические перегрузки.....	97
7.3.4 Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения .....	97
7.3.5 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения .....	98
7.3.6 Опасность поражения электрическим током .....	99
Заключение .....	104
Список использованных источников .....	105
Приложение А (Обязательное) Листинг функции setup.....	108
Приложение Б (Обязательное) Листинг инициализации АЦП.....	109
Приложение В (Обязательное) Листинг функции чтения данных с АЦП.....	110
Приложение Г (Обязательное) Листинг используемых переменных .....	111
Приложение Д (Обязательное) Листинг основной функции .....	112
Приложение Е (Обязательное) Листинг функций индикации.....	113

Приложение Ж (Обязательное) Листинг функций стабилизаторов.....	114
Приложение З (Обязательное) Нагрузочные характеристики.....	116
Приложение И (Обязательное) Отклонение регулируемых величин от заданных .....	118
Приложение К (Обязательное) Спецификация к принципиальной электрической схеме .....	120

## Введение

Радиоэлектронная промышленность — одна из ключевых отраслей любой национальной экономики, охватывающая все сферы жизни общества. В любой продукции высокого передела присутствуют или простые электронные компоненты, или целые радиоэлектронные узлы и модули. Можно без преувеличения сказать, что по своему влиянию на уровень благосостояния и безопасности населения, на качество жизни в стране в целом, эта отрасль является основной. При этом очень весомым остается влияние радиоэлектроники и на развитие современных средств вооружения и военной техники. Поэтому не удивительно что еще в декабре 2012 года президентом РФ В. В. Путиным был подписан указ об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013 – 2025 годы» [23].

Однако радиоэлектронная аппаратура и приборы автоматике предъявляют весьма жесткие требования к качеству потребляемой ими электрической энергии, а в ряде случаев требуют обязательного преобразования энергии от первичного источника. Поэтому прогресс в автоматике и радиоэлектронике сопряжен с развитием преобразовательной техники и статических средств вторичного электропитания [1].

По расчетам BusinesStat, за 2016-2019 годы продажи преобразователей в России выросли на 21,4 %: с 62,2 до 75,5 млн шт. Наибольшие темпы прироста наблюдались в 2017 и 2018 годах – 14,3 % и 5,4 % относительно прошлых лет соответственно. Это было обусловлено необходимостью замены давно функционирующих и выходящих из строя преобразователей. Отечественное производство преобразовательной техники не способно удовлетворить внутренние потребности в ней. Российские производители не выдерживают конкуренции с китайской продукцией, импорт которой в 2016-2020 годах составлял 50,6-61,4 млн шт. в год [24].

При этом, одним из этапов проектирования электроники является этап макетирования и проверки его работоспособности и соответствия заданным

параметрам. На данном этапе лабораторный блок питания, представляющий собой автономный источник вторичного электропитания, предназначенный для питания стабильными током и напряжением различных макетируемых устройств, является одним из ключевых элементов.

Таким образом целью данной работы является исследование и проектирование лабораторного блока питания с двумя режимами регулирования: по току и напряжению. Для достижения данной цели предстоит решить ряд задач, таких как: изучение существующих конструкций блоков питания, разработка принципиальной электрической схемы устройства, включающую в себя силовую часть и систему управления, трассировка печатной платы устройства с использованием САПР, разработка управляющей программы микроконтроллера, а также сборка макета, для проведения тестовых запусков.

## **1 Обзор литературы и анализ предметной области**

Вторичный источник электропитания – устройство, которое преобразует параметры электроэнергии основного источника электроснабжения (например, промышленной сети) в электроэнергию с параметрами, необходимыми для функционирования вспомогательных устройств [2].

### **1.1 Задачи вторичного источника электропитания**

К задачам вторичного источника питания относят следующее.

1. Обеспечение передачи мощности — источник электропитания должен обеспечивать передачу заданной мощности с наименьшими потерями и соблюдением заданных характеристик на выходе без вреда для себя. Обычно мощность источника питания берут с некоторым запасом.

2. Преобразование формы напряжения — преобразование переменного напряжения в постоянное, и наоборот, а также преобразование частоты, формирование импульсов напряжения и т. д. Чаще всего необходимо преобразование переменного напряжения промышленной частоты в постоянное.

3. Преобразование величины напряжения — как повышение, так и понижение. Нередко необходим набор из нескольких напряжений различной величины, для питания различных цепей.

4. Стабилизация — напряжение, ток и другие параметры на выходе источника питания должны лежать в определённых пределах, в зависимости от его назначения при влиянии большого количества дестабилизирующих факторов: изменения напряжения на входе, тока нагрузки и так далее. Чаще всего необходима стабилизация напряжения на нагрузке, однако иногда (например, для зарядки аккумуляторов) необходима стабилизация тока.

5. Защита — напряжение, или ток нагрузки в случае неисправности (например, короткого замыкания) каких-либо цепей может превысить допустимые пределы и вывести электроприбор, или сам источник питания из строя. Также во многих случаях требуется защита от прохождения тока по

неправильному пути: например, прохождения тока через землю при прикосновении человека или постороннего предмета к токоведущим частям.

6. Гальваническая развязка цепей — одна из мер защиты от протекания тока по неверному пути.

7. Регулировка — в процессе эксплуатации может потребоваться изменение каких-либо параметров для обеспечения правильной работы электроприбора.

8. Управление — может включать регулировку, включение/отключение каких-либо цепей, или источника питания в целом. Может быть как непосредственным (с помощью органов управления на корпусе устройства), так и дистанционным, а также программным (обеспечение включения/выключения, регулировка в заданное время или с наступлением каких-либо событий).

9. Контроль — отображение параметров на входе и на выходе источника питания, включения/выключения цепей, срабатывания защит. Также может быть непосредственным или дистанционным.

## **1.2 Основные конструкции источников вторичного электропитания**

Две наиболее типичных конструкции — это линейные и импульсные источники питания.

### **1.2.1 Линейный блок питания**

Классическим БП является трансформаторный БП, выполненный по линейной схеме. В общем случае он состоит из понижающего трансформатора или автотрансформатора, у которого первичная обмотка рассчитана на сетевое напряжение. Ко вторичной обмотке подключен выпрямитель, преобразующий переменное напряжение в постоянное (пульсирующее однонаправленное). После выпрямителя устанавливается фильтр, сглаживающий колебания (пульсации).

Также в схеме могут быть установлены фильтры высокочастотных помех, всплесков, защиты от КЗ, стабилизаторы напряжения и тока.

### **1.2.2 Импульсный блок питания**

Импульсные блоки питания являются инверторной системой. В импульсных блоках питания переменное входное напряжение сначала выпрямляется. Полученное постоянное напряжение преобразуется в прямоугольные импульсы повышенной частоты и определённой скважности, либо подаваемые на трансформатор (в случае импульсных БП с гальванической развязкой от питающей сети) или напрямую на выходной фильтр нижних частот (в импульсных БП без гальванической развязки). В импульсных БП могут применяться малогабаритные трансформаторы — это объясняется тем, что с ростом частоты повышается эффективность работы трансформатора и уменьшаются требования к габаритам (сечению) сердечника, требуемым для передачи эквивалентной мощности. В большинстве случаев такой сердечник может быть выполнен из ферромагнитных материалов, в отличие от сердечников низкочастотных трансформаторов, для которых используется электротехническая сталь.

В импульсных блоках питания стабилизация напряжения обеспечивается посредством отрицательной обратной связи. Обратная связь позволяет поддерживать выходное напряжение на относительно постоянном уровне вне зависимости от колебаний входного напряжения и величины нагрузки. В зависимости от величины сигнала обратной связи (зависящего от выходного напряжения), изменяется скважность импульсов на выходе ШИМ-контроллера. Если развязка не требуется, то, как правило, используется простой резистивный делитель напряжения. Таким образом, блок питания поддерживает стабильное выходное напряжение.

### **1.3 Достоинства и недостатки**

#### **1.3.1 Достоинства трансформаторных БП**

К достоинствам трансформаторных бп можно отнести:

- 1) простота конструкции;
- 2) надёжность;
- 3) малый коэффициент пульсаций выходного напряжения;
- 4) отсутствие создаваемых радиопомех (в отличие от импульсных,

создающих помехи за счёт гармонических составляющих).

#### **1.3.2 Недостатки трансформаторных БП**

Недостатками при этом являются:

- 1) большой вес и габариты, пропорционально мощности;
- 2) компромисс между снижением кпд и стабильностью выходного

напряжения: для обеспечения стабильного напряжения требуется стабилизатор, вносящий дополнительные потери.

#### **1.3.3 Достоинства импульсных БП**

Сравнимые по выходной мощности с линейными стабилизаторами соответствующие им импульсные стабилизаторы обладают следующими основными достоинствами:

1) меньшим весом за счёт того, что с повышением частоты можно использовать трансформаторы меньших размеров при той же передаваемой мощности;

2) значительно более высоким кпд (вплоть до 96 %);

3) меньшей стоимостью, благодаря массовому выпуску унифицированной элементной базы и разработке ключевых транзисторов высокой мощности. Кроме этого, следует отметить значительно более низкую стоимость импульсных трансформаторов при сравнимой передаваемой мощности, и возможность использования менее мощных силовых элементов, поскольку режим их работы ключевой;

4) широким диапазоном питающего напряжения и частоты, недостижимым для сравнимого по цене линейного;

5) наличием в большинстве современных бп встроенных цепей защиты от различных непредвиденных ситуаций, например, от короткого замыкания и от отсутствия нагрузки на выходе.

### **1.3.4 Недостатки импульсных БП**

При этом им присущи следующие недостатки:

1) работа основной части схемы без гальванической развязки от сети, что, в частности, несколько затрудняет ремонт таких бп;

2) все без исключения импульсные блоки питания являются источником высокочастотных помех, поскольку это связано с самим принципом их работы. В связи с этим часто недопустимо применение импульсных бп для некоторых видов аппаратуры.

### **1.4 Импульсные преобразователи напряжения**

Методы преобразования постоянного тока в постоянный, в которых используются трансформаторы или катушки индуктивности, работающие на гораздо более высоких частотах, позволяют использовать гораздо меньшие, более легкие и дешевые компоненты намотки. Эти методы используются даже там, где можно использовать сетевой трансформатор; например, для бытовых электронных приборов предпочтительно выпрямлять сетевое напряжение до постоянного тока, использовать импульсные методы для преобразования его в высокочастотный переменный ток при желаемом напряжении, а затем, как правило, выпрямлять его до постоянного тока. Вся сложная схема дешевле и эффективнее, чем простая схема линейного блока питания той же мощности.

На сегодняшний день существует множество импульсных преобразователей постоянного напряжения, отличающихся количеством и типом реактивных компонентов, алгоритмами преобразования и прочими характеристиками. Однако наиболее простыми, а следовательно, и наиболее популярными являются всего четыре схемы: понижающая, повышающая, инвертирующая и обратноходовая (Рисунок 1). Эти преобразователи используют одинаковый принцип работы, имеют идентичное количество компонентов и

отличаются лишь способом коммутации накопительного дросселя  $L_1$ , от режима работы которого и зависят все характеристики схемы.

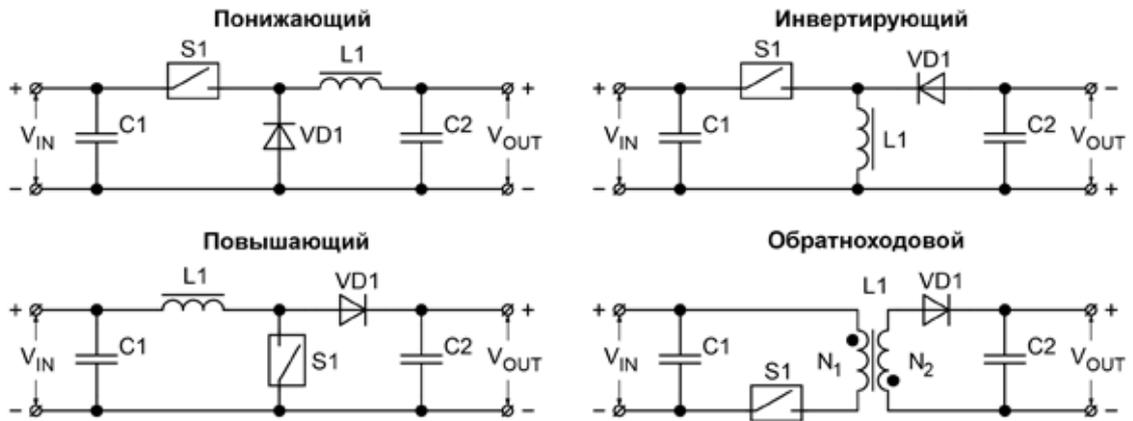


Рисунок 1 – Схемы наиболее популярных преобразователей

Преобразование электрической энергии происходит в два этапа. На первом этапе ключ  $S_1$  замыкается, и к дросселю прикладывается некоторое напряжение  $V_{L1}$ , под действием которого за время  $t_{ON}$  его ток возрастает на величину  $dI_1$ .

$$dI_1 = \frac{V_{L1}}{L_1} \cdot t_{ON}, \quad (1)$$

где  $L_1$  – индуктивность обмотки, активной на первом этапе.

При этом к диоду  $VD1$  приложено напряжение обратной полярности, поэтому ток через него не протекает. В конце этого интервала ток дросселя достигает максимального значения  $I_{MAX1}$ , а это значит, что в его магнитопроводе накапливается энергия:

$$E = \frac{I_{MAX1}^2 \cdot L_1}{2} \quad (2)$$

После размыкания ключа  $S_1$  на выводах всех обмоток дросселя формируется ЭДС самоиндукции, полярность которой противоположна полярности, присутствовавшей на первом этапе, это означает, что дроссель  $L_1$  теперь становится не потребителем, а источником электрической энергии. Изменение полярности напряжения на обмотках приводит к открытию диода  $VD1$ , который и обеспечивает путь протекания тока на втором этапе, называемом этапом возврата, или разряда дросселя.

Поскольку количество энергии в дросселе в момент коммутации ключей не изменяется, то ток в его активной обмотке сразу после размыкания ключа  $S_1$  также будет максимальным, однако его величина  $I_{MAX2}$  может измениться, ведь он теперь может протекать уже по другому количеству витков:

$$E = \frac{I_{MAX2}^2 \cdot L_2}{2}, \quad (3)$$

где  $L_2$  – индуктивность обмотки на втором этапе.

Дроссель понижающей, повышающей и инвертирующей схем обычно содержит только одну обмотку, поэтому  $L_1 = L_2$ , а значит и  $I_{MAX1} = I_{MAX2} = I_{MAX}$ . А вот для обратнoходовой схемы индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  чаще всего отличаются, поэтому ток  $I_{MAX2}$  можно определить по формуле:

$$I_{MAX2} = I_{MAX1} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = I_{MAX1} \cdot \frac{N_1}{N_2}, \quad (4)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – количество витков, соответственно, первичной и вторичной обмоток.

Вторую часть формулы можно получить, вспомнив, что индуктивность обмотки пропорциональна квадрату количества витков:

$$L_{1,2} = N_{1,2}^2 \cdot A_L, \quad (5)$$

где  $A_L$  – конструктивный параметр магнитопровода.

После открытия диода напряжение на обмотке дросселя фиксируется на уровне  $V_{L2}$ , под действием которого ток дросселя за время  $t_{OFF}$  уменьшится на величину  $dI_2$ .

$$dI_2 = \frac{V_{L2}}{L_2} \cdot t_{OFF} \quad (6)$$

В квазиустановившемся режиме, когда отсутствуют какие-либо переходные процессы как в цепях питания, так и в цепях нагрузки, дроссель на втором этапе преобразования должен отдать всю энергию, накопленную на первом интервале. Это означает, что к моменту начала следующего цикла его ток должен быть таким же, как и в начале предыдущего. Для схем с однообмоточным

дросселем  $dI_1 = -dI_2$ , но в общем случае изменения токов обмоток определяются Законом полного тока:

$$dI_1 \cdot N_1 = -dI_2 \cdot N_2 \quad (7)$$

С учетом полученных выше соотношений, можно получить основное уравнение, связывающее величины напряжений на выводах обмоток дросселя с отношением длительностей основных этапов преобразования:

$$\frac{V_{L1}}{N_1} \cdot t_{ON} = -\frac{V_{L2}}{N_2} \cdot t_{OFF} \quad (8)$$

Самой популярной схемой преобразователей постоянного напряжения можно назвать понижающую, ведь в реальной аппаратуре задача уменьшения напряжения возникает намного чаще, чем увеличения или изменения его полярности. Поэтому далее рассмотрим зависимость выходного напряжения от относительной длительности первого этапа преобразования только понижающего преобразователя, как наиболее подходящего решения для использования в разрабатываемом блоке питания.

#### 1.4.1 Понижающий преобразователь

Понижающий преобразователь обычно имеет только одну обмотку, поэтому  $N_1 = N_2$ . На первом этапе преобразования к дросселю приложена разность входного и выходного напряжений ( $V_{L1} = V_{IN} - V_{OUT}$ ), а на втором – только выходное напряжение ( $V_{L2} = V_{OUT}$ ). Используя данные соотношения в уравнении, связывающем значения напряжений и длительности этапов преобразования, получаем:

$$(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot t_{ON} = -V_{OUT} \cdot t_{OFF} \quad (9)$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = V_{IN} \cdot D, \quad (10)$$

где  $D$  – коэффициент заполнения.

Из формулы видно, что выходное напряжение  $V_{OUT}$  понижающего преобразователя не может превышать входное  $V_{IN}$ . Регулируя коэффициент заполнения сигнала, поступающего с ШИМ-контроллера можно регулировать уровень напряжения на выходе.

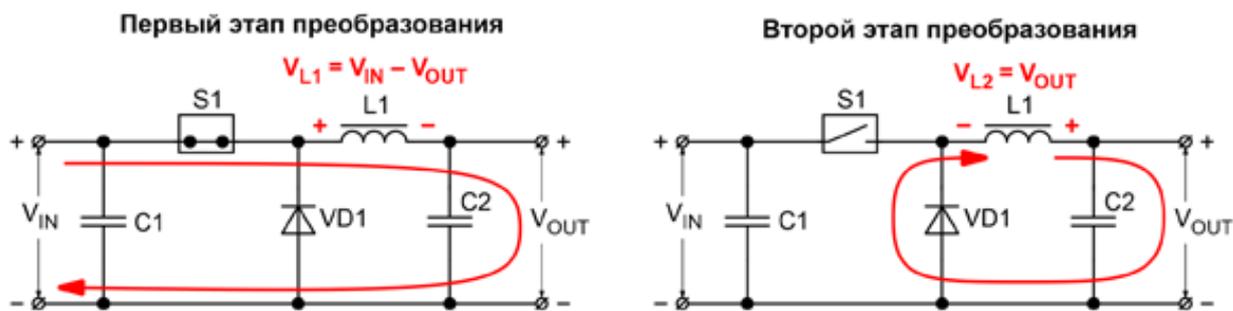


Рисунок 2 – Принцип работы понижающего преобразователя

## 2 Разработка принципиальной электрической схемы силовой части блока питания

### 2.1 Разработка структурной схемы

Классическая структурная схема регулируемого импульсного блока питания приведена на рисунке ниже (Рисунок 3):

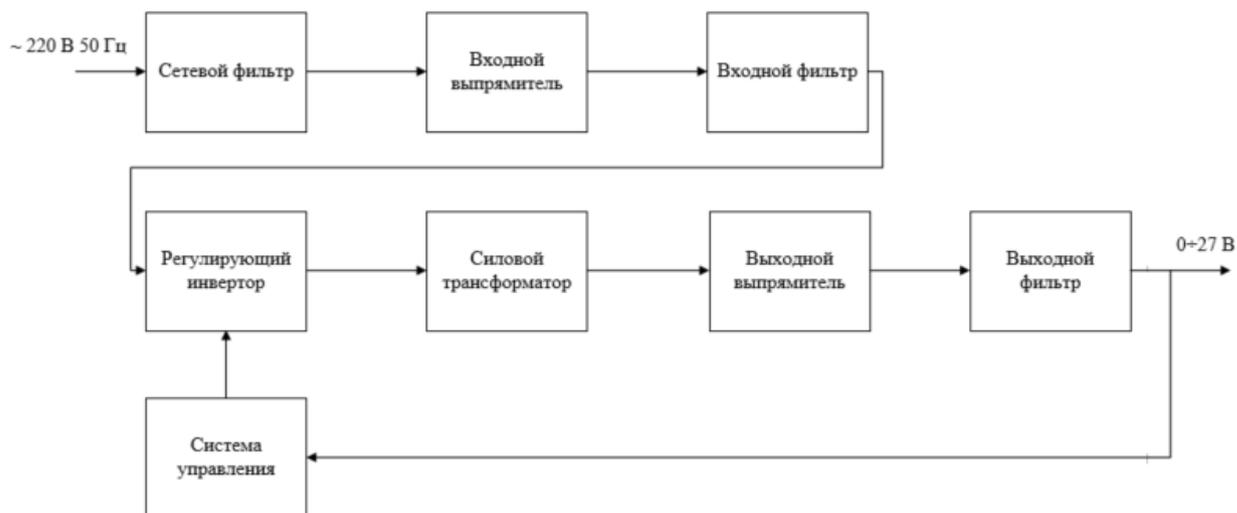


Рисунок 3 – Классическая структурная схема импульсного блока питания

Сетевой фильтр предусмотрен для того, чтобы исключить наведение помехи от питаемого устройства в промышленную сеть. Для преобразования входного синусоидального напряжения в постоянное используется входной выпрямитель, после чего, пульсирующее напряжение сглаживается входным фильтром блока питания. На следующем этапе, постоянное выпрямленное и сглаженное напряжение преобразуется с помощью инвертора в переменное напряжение прямоугольной формы, с заданной системой управления скважностью, и значительно более высокой, по сравнению с сетевой, частоты. Данное переменное напряжение подается на первичную обмотку силового импульсного трансформатора. После чего также преобразовывается с помощью выпрямителя и фильтра в постоянное напряжение требуемой величины.

Однако, поскольку данная работа является учебной, в целях обеспечения безопасности при разработке, структурная схема была преобразована к виду, приведенному на рисунке ниже (Рисунок 4):

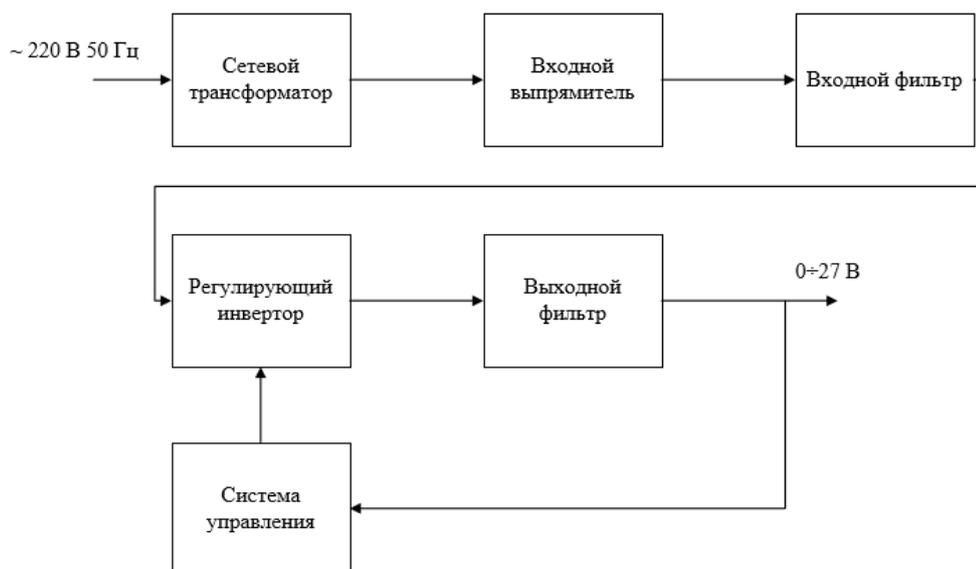


Рисунок 4 – Структурная схема разрабатываемого блока питания

Опираясь при разработке на данную структурную схему, появляется возможность работать не с сетевым напряжением, а с пониженным до безопасного уровня. Кроме того, за счет того, что на выходе инвертора напряжение будет иметь прямоугольную форму только одной полярности, нет необходимости в использовании дополнительного выпрямителя, но достаточно сгладить пульсирующее напряжение.

## 2.2 Расчет номиналов элементов

Для расчета элементов, входящих в состав БП, необходимо задать исходные параметры. Для расчета основной части – стабилизатора напряжения потребуются следующие значения:

- 1) входное напряжения  $U_{in}$ ;
- 2) диапазон регулировки выходного напряжения  $U_{out\_min} \div U_{out\_max}$ ;
- 3) максимальное значение выходного тока  $I_{out\_max}$ ;
- 4) максимальная величина пульсаций выходного напряжения  $\Delta U_{out}$ ;
- 5) максимальная величина пульсаций выходного тока  $\Delta I_{out}$ .

Схема силовой части, для которой производится расчет приведена ниже (Рисунок 5).

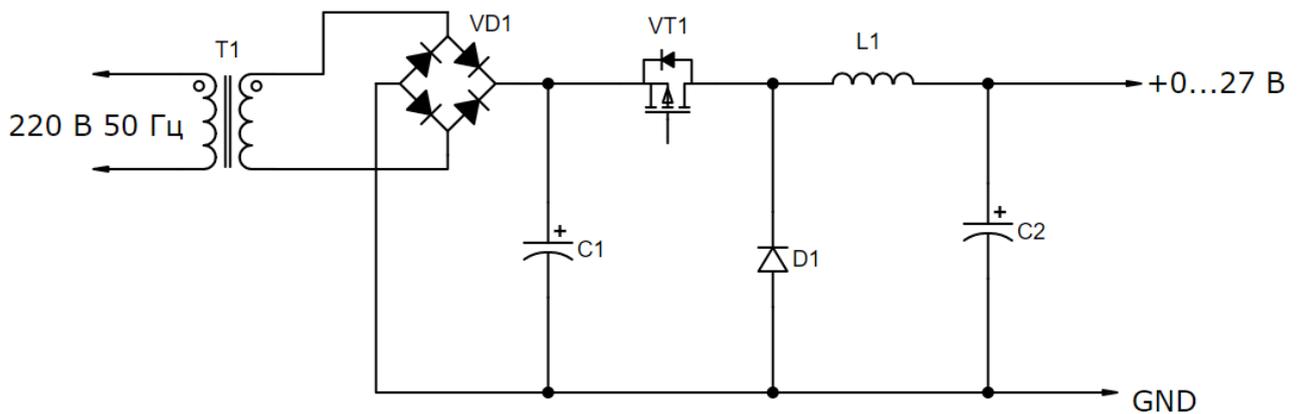


Рисунок 5 – Схема силовой части блока питания

Согласно техническому заданию, блок питания должен обеспечивать регулировку напряжения в диапазоне от 0 до 27 В. Однако в связи с тем, что используемый в тестовом образце трансформатор имеет амплитудное напряжение 40 В, все расчеты будут происходить из данного значения. Ограничение же на величину выходного напряжения будет наложено программным методом, на этапе разработки алгоритма управления.

Входное напряжение примем как выходное напряжение при коэффициенте заполнения  $q = 1$ , то есть равным максимальному выходному напряжению.

Максимальное значение выходного тока примем 3 А. Такого тока достаточно для выполнения большинства задач, для которых потребуется данный блок питания.

Максимальная величина пульсаций выходного напряжения для хорошего преобразователя составляет менее 5 %. Зададимся этой величиной как исходной. Максимальная величина пульсаций тока согласно ТЗ определим не более 10 %.

### 2.3 Определение максимального и минимального значений коэффициента заполнения

В установившемся режиме, при неизменном значении напряжения питания, выходное напряжение стабилизатора прямо пропорционально относительной длительности открытого состояния регулирующего транзистора  $q$  [1]:

$$U_{out} = U_{in} \cdot q, \quad (11)$$

где  $q = t_{и} \cdot f$ ;

$t_{и}$  – длительность открытого состояния регулирующего транзистора;

$f$  – частота преобразования.

В случае если входное напряжение постоянно, а выходное изменяется, значение коэффициента заполнения определяется по соотношениям:

$$\begin{cases} q_{max} = \frac{U_{out\_max}}{U_{in}} = 1 \\ q_{min} = \frac{U_{out\_min}}{U_{in}} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

## 2.4 Выбор контроллера и определение рабочей частоты преобразователя

Для тестового образца в качестве ШИМ-контроллера в разрабатываемом устройстве будет выступать плата Arduino Uno на базе микроконтроллера atmega328p. При питании микросхемы напряжением 5 В, безопасно можно использовать максимальную тактовую частоту 20 МГц. С использованием предделителей или сторонних библиотек, а также выборе режима ШИМ можно получить любую требуемую частоту. Для предварительных расчетов и последующего тестирования образца выберем тактовую частоту работы микроконтроллера 16 МГц, ШИМ с использованием предделителя 512 будет иметь частоту сигнала  $f = 31250$  Гц.

## 2.5 Расчет параметров силового дросселя

Максимальное значение индуктивности катушка будет иметь в случае, когда максимальны пульсации тока дросселя. Данные пульсации для определенного ранее диапазона коэффициента заполнения будут максимальны, при значении коэффициента  $q_{\Delta I_{max}} = 0.5$ .

Индуктивность дросселя понижающего стабилизатора рассчитывается по формуле [1]:

$$L = \frac{U_{in}}{f \cdot \Delta I_L} \cdot (q_{\Delta I_{max}} - q_{\Delta I_{max}}^2), \quad (13)$$

где  $\Delta I_L$  – пульсации тока дросселя.

Величина пульсаций тока дросселя определяется из условия:

$$\Delta I_L = (0.3 \cdot 0.6) I_{out}, \quad (14)$$

где  $I_{out}$  – максимальный выходной ток.

Коэффициент 0.3 обладает наилучшим соотношением между КПД и скоростью реакции на изменения нагрузки. Увеличение постоянной приведет к повышению пульсаций тока дросселя, но улучшению динамики переходных характеристик, а уменьшение, следовательно, снижение пульсаций тока, но замедление переходных процессов.

Таким образом требуемая индуктивность составит:

$$L = \frac{40}{31250 \cdot 0.3 \cdot 3} \cdot (0.5 - 0.25) \approx 350 \text{ мкГн}. \quad (15)$$

Максимальный ток через дроссель [1]:

$$I_{L_{max}} = I_{out_{max}} + \frac{1}{2} \Delta I_L = 3.45 \text{ А}. \quad (16)$$

Таким образом требуемые параметры дросселя: Индуктивность не менее 350 мкГн, максимальный ток следует выбирать с запасом 20-25 % от расчетного, чтобы компенсировать отклонения параметров схемы и разницу между действительными и расчетными значениями компонентов.

## 2.6 Расчет параметров выходного конденсатора фильтра

Максимальное напряжение на выходном конденсаторе равно максимальной величине выходного напряжения  $U_{out_{max}}$ . В нашем случае:

$$U_{Cout} = U_{out_{max}} = 40 \text{ В}. \quad (17)$$

При выборе типа конденсатора его максимальное напряжение должно минимум на 20-25 % превышать рассчитанное значение для обеспечения безопасной работы.

Амплитуда пульсаций выходного напряжения  $\Delta U_H$  при известном значении произведения  $L \cdot C_{out}$ , определяется выражением [1]:

$$\Delta U_H = \frac{U_{in} \cdot (q_{\Delta I_{max}} - q_{\Delta I_{max}}^2)}{8 \cdot L \cdot C_{out} \cdot f^2}, \quad (18)$$

где  $C_{out}$  – емкость выходного конденсатора.

Отсюда значение емкости определяется по формуле:

$$C_{out} = \frac{U_{in} \cdot (q_{\Delta I_{max}} - q_{\Delta I_{max}}^2)}{8 \cdot L \cdot \Delta U_H \cdot f^2}. \quad (19)$$

Значение пульсаций выходного напряжения в соответствии с требованиями технического задания составляют 5 %, следовательно:

$$\Delta U_H = 0.05 \cdot 40 \text{ В} = 2 \text{ В}. \quad (20)$$

Рассчитываем минимальное значение емкости выходного конденсатора фильтра  $C_{out}$ :

$$C_{out} = \frac{40 \cdot (0.5 - 0.25)}{8 \cdot 350 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 31250^2} \approx 2 \text{ мкФ}. \quad (21)$$

## 2.7 Расчет параметров диода

Максимальное обратное напряжение, прикладываемое к диоду  $U_{VD_{max}}$  равно входному напряжению стабилизатора  $U_{in}$ :

$$U_{VD_{max}} = U_{in} = 40 \text{ В}. \quad (22)$$

Максимальное значение тока, протекающего через диод  $I_{VD_{max}}$  равно максимальному току через индуктивность  $I_{L_{max}}$ :

$$I_{VD_{max}} = I_{L_{max}} = 3.45 \text{ А} \quad (23)$$

Поскольку максимальное обратное напряжение не велико, лучшим вариантом будет использование диода Шоттки. Данный тип диодов обладает высоким быстродействием и малым прямым падением напряжения.

Также при выборе диода ограничивающим фактором является рассеиваемая мощность. Средняя мощность для наихудшего случая может быть рассчитана по формуле [8]:

$$P_{VD} = (1 - q_{min}) \cdot I_{VD_{max}} \cdot U_{VD}, \quad (24)$$

где  $U_{VD}$  – прямое падение напряжения на диоде (0.3...0.5 В для диода Шоттки).

Выберем значение  $U_{VD} = 0.5 \text{ В}$ , для определения максимального значения, тогда мощность, рассеиваемая диодом должна быть не менее:

$$P_{VD} = (1 - 0) \cdot 3.45 \cdot 0.5 = 1.73 \text{ Вт}. \quad (25)$$

## 2.8 Расчет параметров ключевого транзистора

Максимальное обратное напряжение  $U_{VT\_max}$ , прикладываемое к транзистору равно значению входного напряжению стабилизатора  $U_{in}$ :

$$U_{VT\_max} = U_{in} = 40 \text{ В.} \quad (26)$$

В реальности максимальное напряжение должно на 20-25 % превышать рассчитанное значение.

Максимальное значение тока, протекающего через ключевой транзистор  $I_{VT\_max}$  равно максимальному току через индуктивность  $I_{L\_max}$  [1]:

$$I_{VT\_max} = I_{L\_max} = 3.45 \text{ А.} \quad (27)$$

Среднеквадратичное значение тока через транзистор  $I_{VT\_rms}$  рассчитывается по формуле [8]:

$$I_{VT\_rms} = I_{out\_max} \cdot \sqrt{q_{max} \cdot \left(1 + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{\Delta I_L}{I_{out\_max}}\right)^2\right)}. \quad (28)$$

Следовательно, среднеквадратичное значение тока через транзистор равно:

$$I_{VT\_rms} = 3 \cdot \sqrt{1 \cdot \left(1 + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{0.9}{3}\right)^2\right)} = 3 \text{ А.} \quad (29)$$

Согласно полученным значениям  $U_{VT\_max} = 40 \text{ В}$  и  $I_{VT\_max} = 3.45 \text{ А}$ , был выбран N канальный MOSFET транзистор IRFZ24N, с максимальным напряжением сток-исток  $U_{VT} = 55 \text{ В}$ , и максимальным значением тока  $I_{VT\_max} = 17 \text{ А}$ . Сопротивление открытого канала при приложенном к затвору напряжении  $U_{GS} = 10 \text{ В}$  составляет  $R_{DS} = 0.07 \text{ Ом}$ .

Рассеиваемая мощность транзистора складывается из мощности статических и динамических потерь. Мощность статических потерь для MOSFET – транзисторов равна [8]:

$$P_{VT\_stat} = I_{VT\_rms}^2 \cdot R_{DS} = 9 \cdot 0.07 = 0.63 \text{ Вт.} \quad (30)$$

Выделяемая в кристалле MOSFET транзистора мощность динамических потерь  $P_{VT\_sw}$  рассчитывается как [8]:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot I_{out\_max} \cdot U_{in} \cdot (t_f + t_r) + \frac{1}{2} \cdot C_{oss} \cdot U_{in}^2 \right) \cdot f, \quad (31)$$

где  $t_f$  – время спада напряжения на транзисторе (в момент коммутации);  
 $t_r$  – время нарастания напряжения на транзисторе (переход в закрытое состояние);

$C_{oss}$  – выходная емкость транзистора, определяемая как сумма ёмкостей «затвор–сток»  $C_{GD}$  и «сток–исток»  $C_{DS}$ .

В документации на выбранный транзистор выходная емкость указывается равной  $C_{oss} = 140$  пФ, время нарастания напряжения  $t_r = 34$  нс и время спада  $t_f = 27$  нс. Таким образом, динамическая рассеиваемая мощность:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (34 + 27) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 140 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 0.12 \text{ Вт.} \quad (32)$$

Суммарная мощность тепловых потерь на транзисторе определяется как сумма мощностей статических и динамических потерь [8]:

$$P_{VT} = P_{VT\_stat} + P_{VT\_sw} = 0.63 + 0.12 = 0.75 \text{ Вт.} \quad (33)$$

Безопасная рассеиваемая мощность корпуса ТО-220АВ составляет 1 Вт, однако следует учитывать, что заданные документацией время нарастания и спада трудно достижимы, потому вероятным решением становится использование радиатора. С радиатором выбранный транзистор способен рассеять  $P_{VT\_IRF} = 45$  Вт, что с достаточным запасом гарантирует защищенность транзистора от перегрева.

## 2.9 Расчет параметров входного конденсатора

Максимальное напряжение на входном конденсаторе равно максимальной величине входного напряжения  $U_{in}$ , то есть:

$$U_{Cin\_max} = U_{in} = 40 \text{ В.} \quad (34)$$

При выборе типа конденсатора его максимальное напряжение должно минимум на 20-25 % превышать рассчитанное значение для безопасной работы.

Минимальное значение емкости входного конденсатора  $C_{in}$  рассчитывается по соотношению:

$$C_{in} = \frac{I_{L\_max}^2 \cdot L_{PS}}{\Delta U_{Cin\_disch} \cdot U_{in}}, \quad (35)$$

где  $L_{PS}$  – индуктивность цепи питания стабилизатора (индуктивность первичного источника);

$\Delta U_{Cin\_disch}$  – падение напряжения вследствие разряда конденсатора.

Однако, так как значение индуктивности подводящих цепей неизвестно, то рекомендуемое значение емкости  $C_{in}$  для обычных лабораторных источников питания выбирают исходя из эмпирического положения «от 1000 мкФ до 2200 мкФ на ампер нагрузки».

Ранее было получено максимальное значение тока на катушке  $I_{L\_max} = 3.45$  А, значит минимальная емкость входного конденсатора составит  $C_{in} = 4000$  мкФ.

## 2.10 Расчет мощности трансформатора

Мощность трансформатора определяется как сумма активных мощностей вторичных обмоток. Помимо этого, необходимо учитывать коэффициент запаса по мощности, в среднем при проектировании закладывается запас в 10-20 %. Положим данный коэффициент равным 10 %, что обусловлено лучшими массогабаритным и ценовым показателями. В тестовом образце используется одна вторичная обмотка, следовательно, требуемая мощность трансформатора равна:

$$P_{расч} = 1.1 \cdot U_{out\_max} \cdot I_{L\_max}. \quad (36)$$

Подставляя числовые значения получаем:

$$P_{расч} = 1.1 \cdot 40 \cdot 3.45 = 152 \text{ Вт}. \quad (37)$$

КПД трансформаторов при мощности в пределах 150...300 Вт составляет 0.9...0.93 [9], тогда требуемая мощность трансформатора с учетом КПД:

$$P_{тр} = \frac{P_{расч}}{\eta}, \quad (38)$$

Подставляя числовые значения получаем требуемую мощность:

$$P_{тр} = \frac{152}{0.9} \approx 170 \text{ Вт}.$$

### **3 Разработка принципиальной электрической схемы системы управления блока питания**

#### **3.1 Факторы учитываемые при разработке системы управления**

При разработке схемы системы управления, первым важным фактором на который нужно обратить внимание – расположение силового транзистора. В разрабатываемой схеме существует два варианта: транзистор располагается сверху и разрывает цепь со стороны «плюса», или внизу, и разрывает цепь со стороны «минуса». Эти варианты расположения также называются ключ верхнего и нижнего уровня соответственно.

При использовании ключа нижнего уровня, с одной стороны имеется явное преимущество, поскольку управляющее напряжение подается относительно уровня земли, то есть нулевого потенциала.

С другой стороны, это накладывает трудности на обработку сигнала обратной связи. Поскольку при каждом открытии и закрытии транзистора будет происходить изменение потенциала в точках измерения тока и напряжения, это потребует более сложных схемотехнических решений для цепи обратной связи.

При использовании же ключа верхнего уровня ситуация прямо противоположная. Возникает некоторое усложнение цепи драйвера для силового ключа, поскольку в данном случае он разрывает цепь «плюса».

Однако измерение показаний для цепи обратной связи значительно упрощается, за счет того, что потенциал «земли» для них изменяться не будет.

Проанализировав данные преимущества и недостатки, было принято решение использовать вариант с использованием ключа верхнего уровня, как более простого.

Следующим важным фактором при разработке системы управления является скорость открытия транзистора. Данный фактор обусловлен наличием паразитных емкостей MOSFET транзисторов. Несмотря на то, что в общем представлении считается что MOSFET транзисторы управляются напряжением, а ток затвора пренебрежительно мал, в сравнении с биполярными транзисторами и током базы, на практике это не так. Скорость открытия и закрытия транзистора

напрямую зависит от скорости заряда и разряда внутренней паразитной емкости, а для этого, требуется чтобы генератор импульсов обеспечивал серьезный ток. Максимальный ток, который способна обеспечить Atmega328p составляет 50 мА, что является недопустимо малым значением в данной ситуации. Для улучшения динамических характеристик необходимо использование специальных схем – драйверов.

### **3.2 Драйвер силового транзистора**

#### **3.2.1 Вспомогательный ключ на MOSFET транзисторе**

Первым вариантом схемы стало применение р-канального MOSFET транзистора IRF9Z24N. Напряжение Сток-Исток данного транзистора составляет  $V_{DSS} = 55$  В, ток стока  $I_D = 12$  А, сопротивление открытого канала  $R_{DS(on)} = 0.175$  Ом, паразитная входная емкость  $C_{iss} = 350$  пФ, паразитная выходная емкость  $C_{oss} = 170$  пФ, паразитная емкость обратного перехода  $C_{riss} = 92$  пФ, максимальная мощность рассеиваемая с радиатором составляет  $P_D = 45$  Вт. Выбор данного транзистора обусловлен в первую очередь низкими значениями паразитных емкостей, поскольку при равном значении подаваемого на затвор напряжения и протекающего через него тока транзистор имеющий меньшее значение емкости паразитного конденсатора открывается и запирается быстрее, что благоприятно сказывается на величине рассеиваемой мощности.

Для того что бы р-канальный MOSFET транзистор мог открыться на его затвор относительно истока необходимо подать отрицательное напряжение. Исток ключевого транзистора подключен к плюсу питания, поэтому напряжение на затвор будет подаваться через вспомогательный транзистор с минусовой линии питания. Однако напрямую данное напряжение подать нельзя, так как величина напряжения питания составляет  $V_{in} = 40$  В, поэтому в цепь стока вспомогательного транзистора необходимо установить делитель напряжения из расчета что на затворе силового ключа относительно истока может быть приложено максимум  $V_{GS} = -20$  В. Схема данного варианта показана ниже (Рисунок 6).

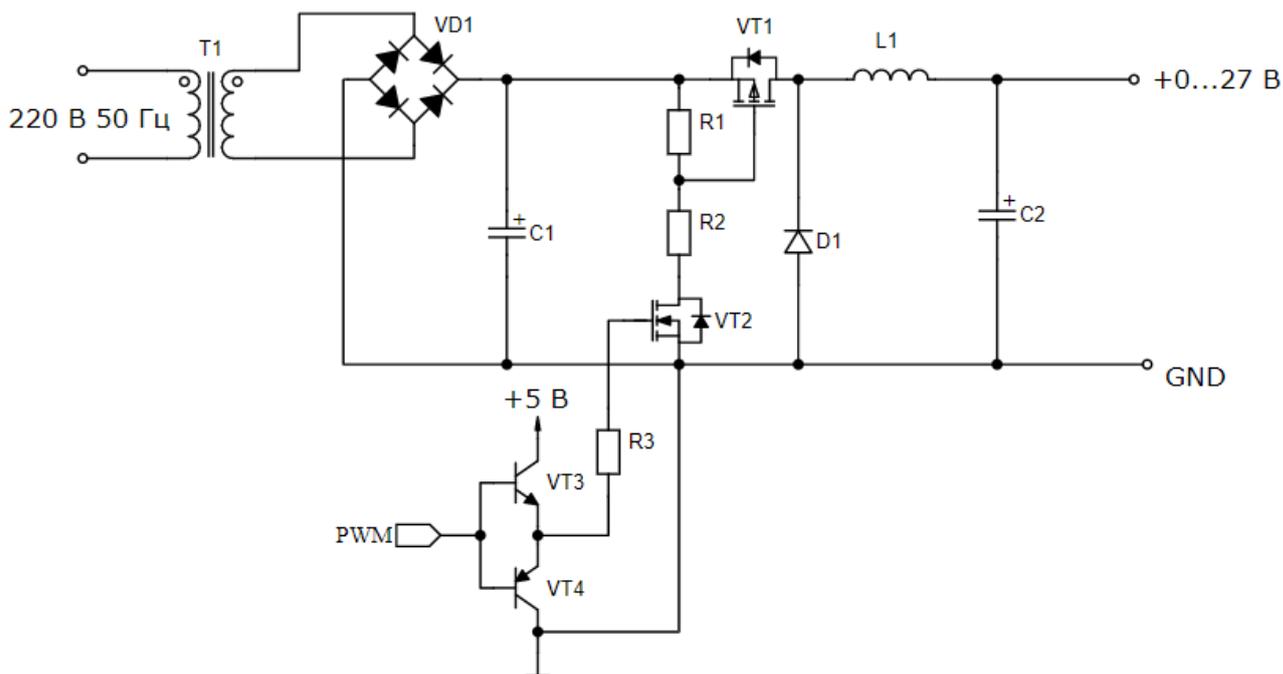


Рисунок 6 – Схема с применением вспомогательного MOSFET транзистора

При использовании такого варианта включения цепи заряда и разряда емкости затвора представляют из себя RC-цепи. Согласно документации, на выбранный транзистор, минимальное время за которое способен открыться и закрыться транзистор составляют:

$$\begin{cases} t_{on} = t_{d(on)} + t_r \\ t_{off} = t_{d(off)} + t_f' \end{cases} \quad (39)$$

где  $t_{d(on)} = 13$  нс – время задержки на включение,

$t_r = 55$  нс – время нарастания,

$t_{d(off)} = 23$  нс – время задержки на выключение.

$t_f = 37$  нс – время спада.

Таким образом получаем:

$$\begin{cases} t_{on} = 13 + 55 = 68 \text{ нс} \\ t_{off} = 23 + 37 = 60 \text{ нс} \end{cases} \quad (40)$$

Положим время открытия транзистора равным  $t_{on} = 90$  нс. Тогда через постоянную времени RC-цепи можно рассчитать значение резистора. Так как за время равное трем постоянным времени конденсатор заряжается до напряжения 95 %, то:

$$\tau = \frac{t_{on}}{3} = \frac{90}{3} = 30 \text{ нс.} \quad (41)$$

Теперь зная соотношение для постоянной времени можно выразить значение сопротивления резистора:

$$\tau = R_2 \cdot C_{iss} \Rightarrow R_2 = \frac{\tau}{C_{iss}}, \quad (42)$$

где  $R_2$  – сопротивление резистора заряда,

$C_{iss} = 350$  пФ – входная паразитная емкость транзистора.

Получаем значение:

$$R_2 = \frac{30 \cdot 10^{-9} \text{ с}}{350 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} = 85.7 \text{ Ом.} \quad (43)$$

Из номинального ряда выбираем ближайшее значение  $R_2 = 91$  Ом. Далее необходимо получить значение сопротивления резистора разряда. Для этого воспользуемся значением необходимого напряжения на затворе относительно истока. Для того чтобы силовой ключ полностью открылся и мог пропустить максимальный ток нагрузки, на затвор достаточно подать  $V_{GS} = -10$  В. Таким образом, на резисторе, подключенном к плюсу питания падение напряжения составит  $\Delta U_{R2} = 10$  В. Таким образом, исходя из того, что напряжение питания составляет 40 В, требуется делитель 1 к 3.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3} \Rightarrow R_1 = \frac{R_2}{3} = \frac{91}{3} = 30.3 \text{ Ом.} \quad (44)$$

Из номинального ряда выбираем резистор с сопротивлением  $R_1 = 30$  Ом.

Далее необходимо подобрать вспомогательный MOSFET-транзистор и обеспечить его быстрое отпирание и запираение. Проверке подлежат следующие транзисторы: N-канальные IRF640N и IRFZ24N, а также N-канальные логического уровня IRL3705N и IRLZ24N.

Для быстрого открытия и закрытия была выбрана схема драйвера из комплементарной пары биполярных транзисторов КТ316В и КТ317В.

Для того чтобы проверить транзисторы в равных условиях, было принято решение ограничить зарядовый ток на уровне  $I_g = 0.1$  А. Так как схема драйвера является по сути эмиттерным повторителем, для осуществления этого решения

необходимо установить между эмиттерами биполярных транзисторов и затвором MOSFETа резистор. Это так же предотвратит выход из строя биполярные транзисторы, поскольку паразитная емкость в разряженном состоянии не препятствует неконтрольному протеканию тока, то наличие ограничительного резистора не позволит протекать чрезмерному коллекторному току. Значение сопротивления определяется из закона Ома и составляет:

$$R_3 = \frac{V_{GS}}{I_g}, \quad (45)$$

где  $V_{GS}$  – напряжение, приложенное к затвору.

Значение  $V_{GS} = 4.3$  В, поскольку напряжение на базе  $V = 5$  В, а падение напряжения на переходе база-эмиттер составляет 0.7 В. Значит искомое сопротивление равно:

$$R_3 = \frac{4.3}{0.1} = 43 \text{ Ом}. \quad (46)$$

Из номинального ряда выбираем сопротивление  $R_3 = 47$  Ом.

Время отпирания транзистора связано с сопротивлением затвора следующим соотношением:

$$R_3 = \frac{V_{GS} \cdot t_{on}}{Q_g}, \quad (47)$$

где  $Q_g$  – заряд затвора транзистора.

Таким образом время на отпирание для транзистора IRF640N составит:

$$t_{on} = \frac{R_3 \cdot Q_g}{V_{GS}} = \frac{47 \cdot 20 \cdot 10^{-9}}{4.3} = 220 \text{ нс}. \quad (48)$$

Для транзистора IRFZ24N:

$$t_{on} = \frac{47 \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{4.3} = 87 \text{ нс}. \quad (49)$$

Для транзистора IRL3705N:

$$t_{on} = \frac{47 \cdot 60 \cdot 10^{-9}}{4.3} = 660 \text{ нс}. \quad (50)$$

Для транзистора IRLZ24N:

$$t_{on} = \frac{47 \cdot 10 \cdot 10^{-9}}{4.3} = 110 \text{ нс.} \quad (51)$$

Время запираания в идеальном случае должно совпадать с временем отпираания, так как разряд емкости происходит через цепь с тем же сопротивлением и через ррр транзистор схожий по параметрам с ррп транзистором через который происходит заряд. Однако с реальными компонентами это время может разительно отличаться.

Ниже приведены показания осциллографа (Рисунок 7 – Рисунок 14) подключенного к затвору силового транзистора. Для каждого случая произведем расчет динамических потерь силового транзистора.

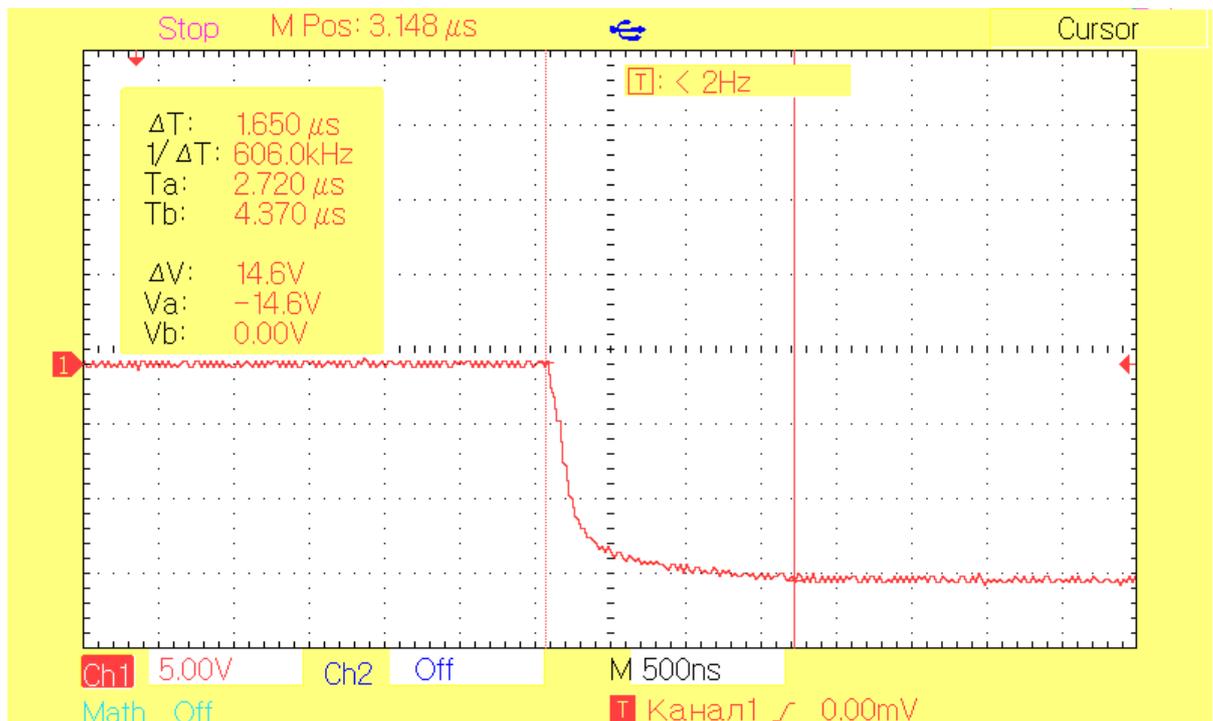


Рисунок 7 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный - IRF640N, вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 500нс/дел)

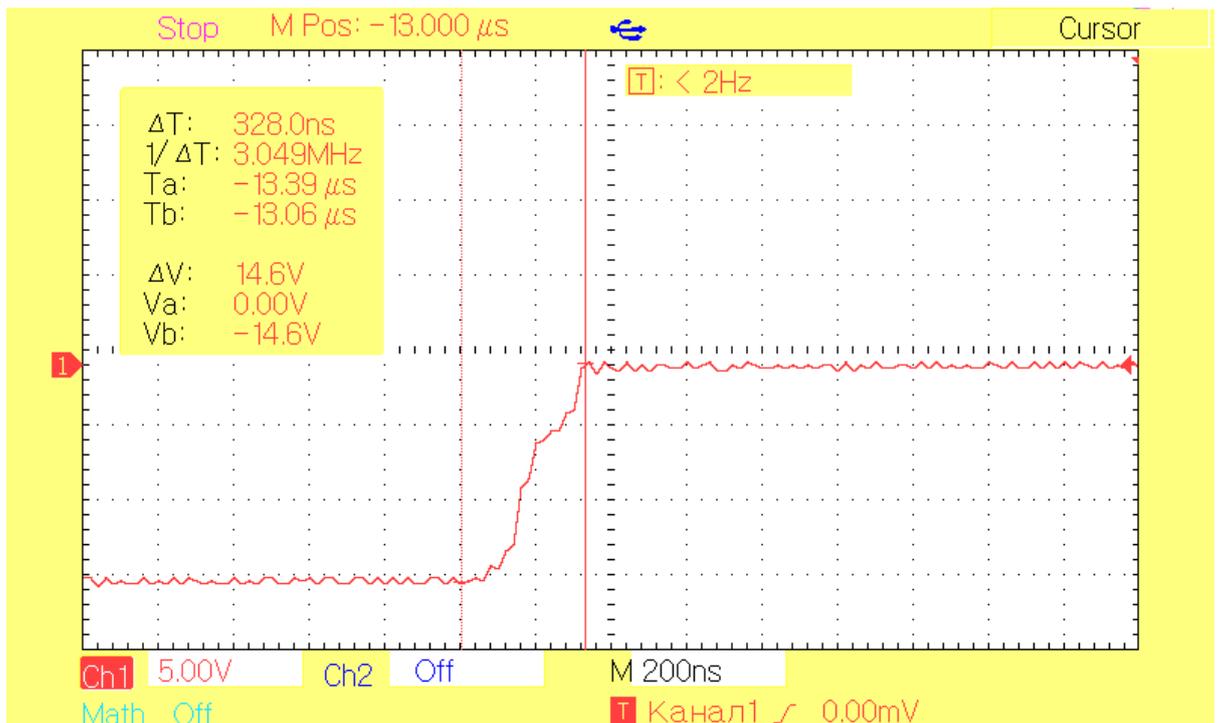


Рисунок 8 – Спад сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный - IRF640N, вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

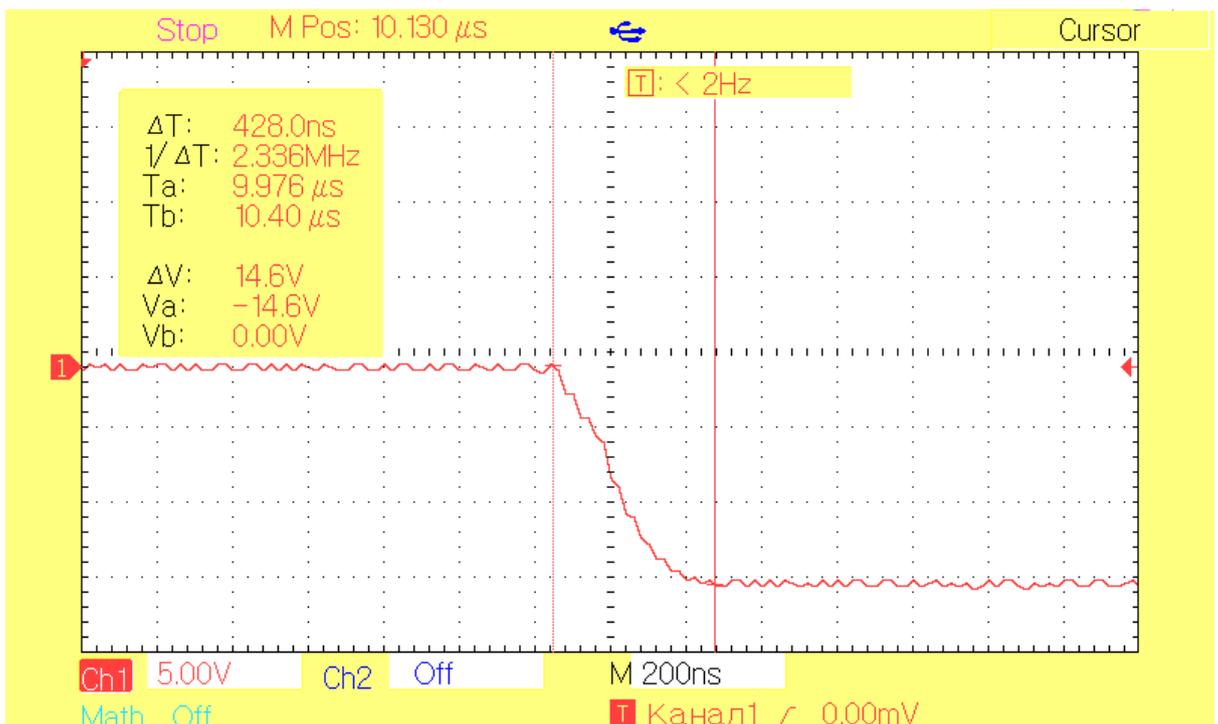


Рисунок 9 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRFZ24N, вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

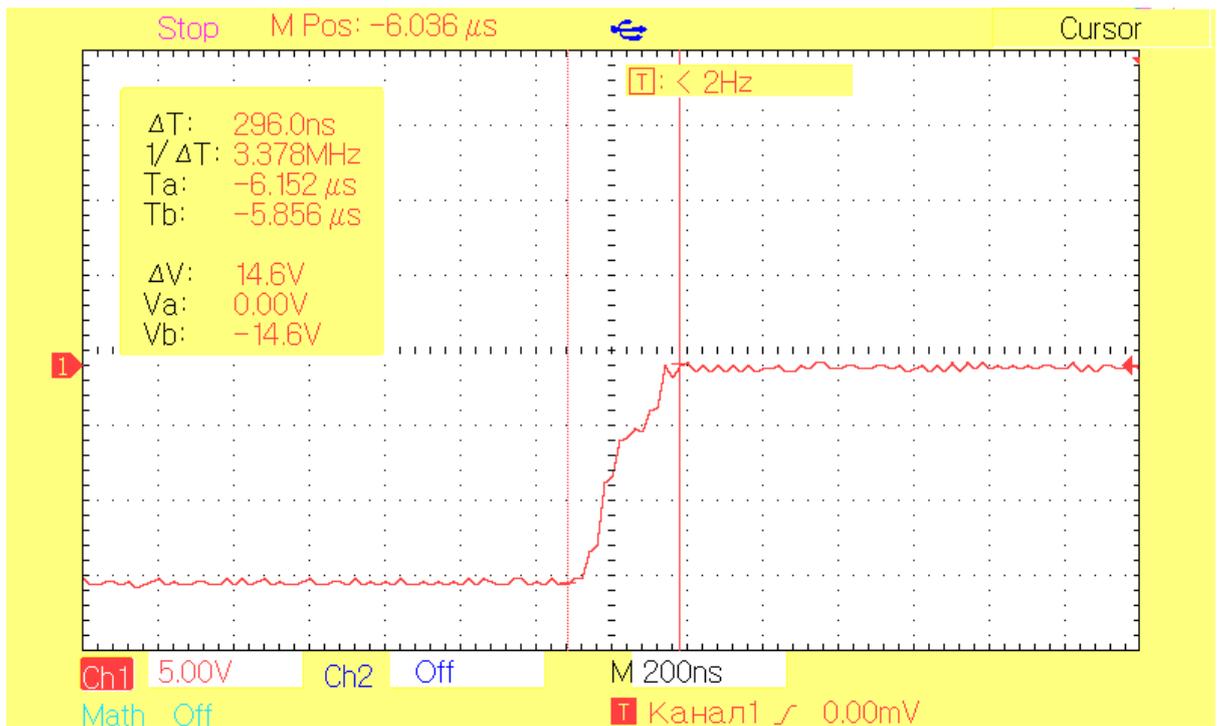


Рисунок 10 – Спад сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRFZ24N, вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

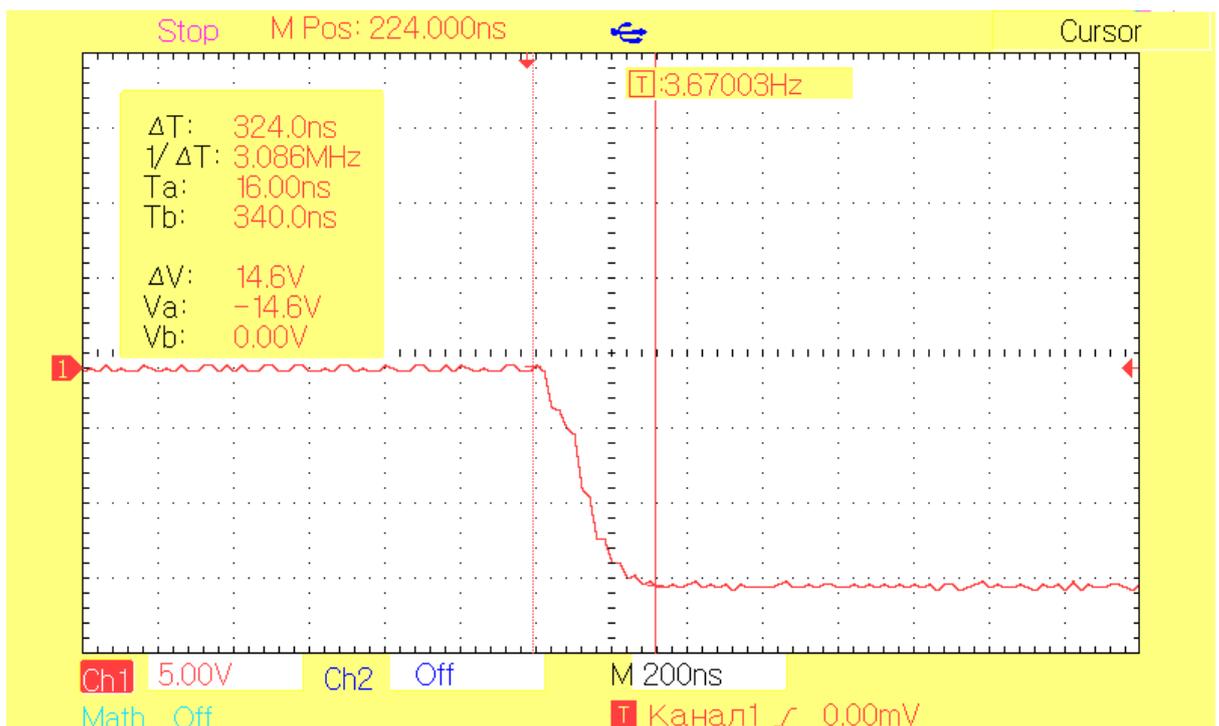


Рисунок 11 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRL3705N, вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

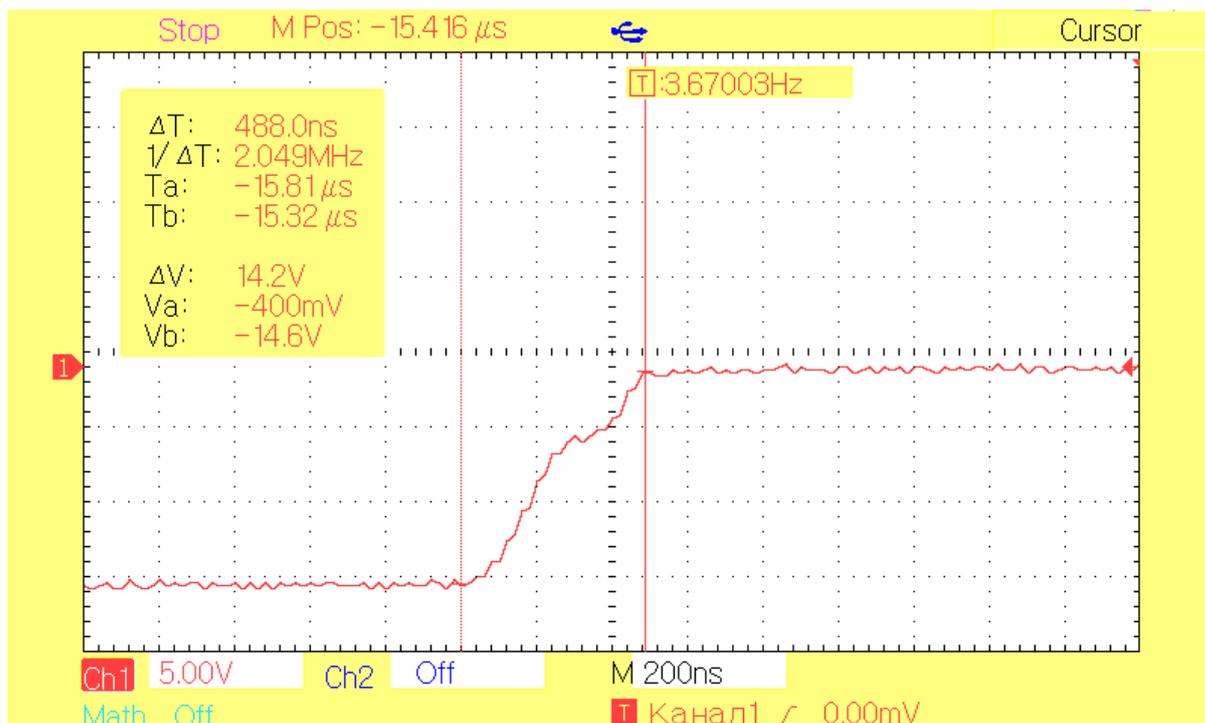


Рисунок 12 – Спад сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRL3705N, вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

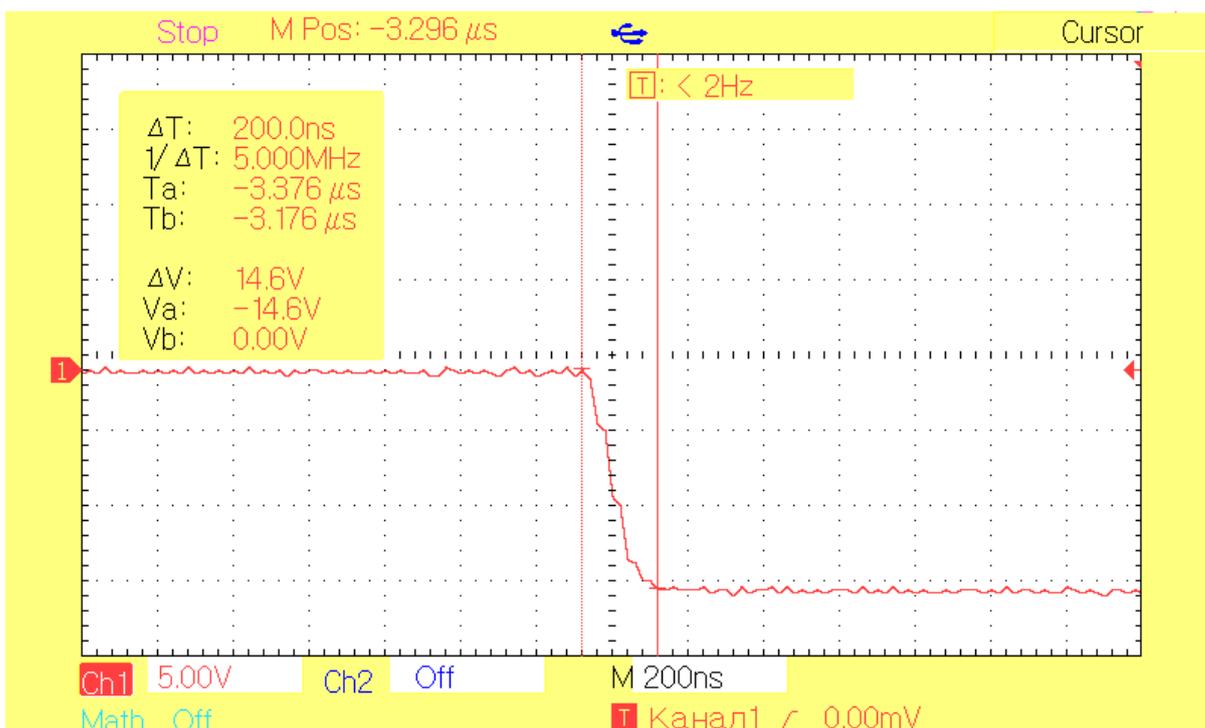


Рисунок 13 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 30$  Ом,  $R_2 = 91$  Ом (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

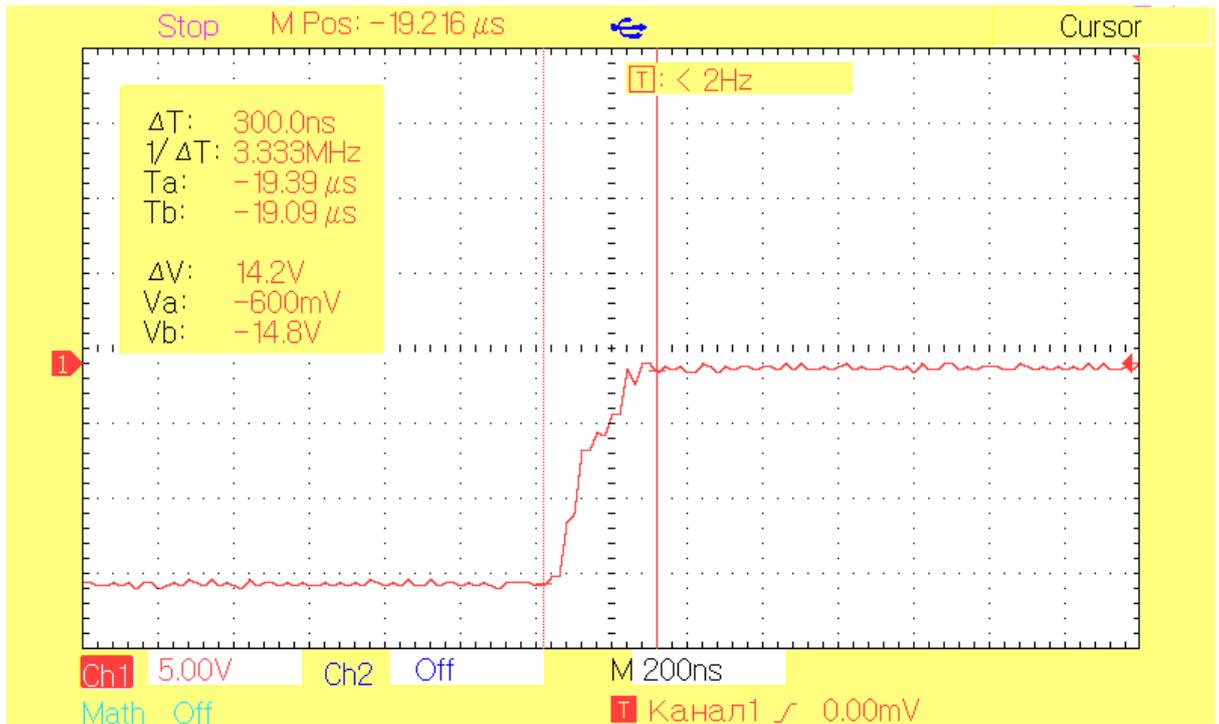


Рисунок 14 – Спад сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 30$  Ом,  $R_2 = 91$  Ом (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

Согласно осциллограммам напряжения на затворе силового ключа в случае когда вспомогательным ключом является IRF640N (Рисунок 7, Рисунок 8), динамические потери составляют:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (328 + 1650) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 3.7 \text{ Вт. (52)}$$

Согласно осциллограммам напряжения на затворе силового ключа в случае когда вспомогательным ключом является IRFZ24N (Рисунок 9, Рисунок 10), динамические потери составляют:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (296 + 428) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 1.4 \text{ Вт. (53)}$$

Согласно осциллограммам напряжения на затворе силового ключа в случае когда вспомогательным ключом является IRL3705N (Рисунок 11, Рисунок 12), динамические потери составляют:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (488 + 324) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 1.5 \text{ Вт. (54)}$$

Согласно осциллограммам напряжения на затворе силового ключа в случае когда вспомогательным ключом является IRLZ24N (Рисунок 13, Рисунок 14), динамические потери составляют:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (300 + 200) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 0.9 \text{ Вт.} \quad (55)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что лучшим вариантом является использование транзистора логического уровня IRLZ24N.

Однако также на практике стало понятно, что резисторы, составляющие делитель напряжения, сильно нагреваются, поэтому был произведен расчет выделяемой ими мощности.

Ток в статическом режиме через резисторы составляет:

$$I = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{40}{91 + 30} = \frac{40}{121} = 0.33 \text{ А.} \quad (56)$$

Мощность, выделяемая на резисторах, составила:

$$\begin{cases} P_4 = I^2 \cdot R_1 = 0.33^2 \cdot 30 = 3.3 \text{ Вт} \\ P_5 = I^2 \cdot R_2 = 0.33^2 \cdot 91 = 9.9 \text{ Вт} \end{cases} \quad (57)$$

Следующим шагом были предприняты попытки снизить выделяемую на резисторах мощность. Увеличение сопротивления в цепи стока вспомогательного транзистора приведет к уменьшению тока, протекающего в статическом режиме. Конечно это также ухудшит переходные характеристики силового ключа. Поэтому необходимо выяснить насколько сильно можно уменьшить потери на резисторах, при этом не сильно увеличив потери на транзисторе.

Проверка производилась для пар сопротивлений  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 300 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 150 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 450 \text{ Ом}$  и  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 600 \text{ Ом}$ . Ток в статическом режиме для первой пары сопротивлений составит:

$$I = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{40}{100 + 300} = \frac{40}{400} = 0.1 \text{ А.} \quad (58)$$

Мощность, выделяемая на резисторах, составит:

$$\begin{cases} P_4 = I^2 \cdot R_1 = 0.1^2 \cdot 100 = 1 \text{ Вт} \\ P_5 = I^2 \cdot R_2 = 0.1^2 \cdot 300 = 3 \text{ Вт} \end{cases} \quad (59)$$

Осциллограммы сигнала на затворе приведены на рисунках (Рисунок 15, Рисунок 16). Динамические потери на транзисторе составят:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (324 + 340) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 1.3 \text{ Вт.} \quad (60)$$

Ток в статическом режиме для второй пары сопротивлений составит:

$$I = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{40}{150 + 450} = \frac{40}{600} \approx 0.07 \text{ А.} \quad (61)$$

Мощность, выделяемая на резисторах, составит:

$$\begin{cases} P_4 = I^2 \cdot R_1 = 0.07^2 \cdot 150 = 0.74 \text{ Вт} \\ P_5 = I^2 \cdot R_2 = 0.07^2 \cdot 450 = 2.2 \text{ Вт} \end{cases} \quad (62)$$

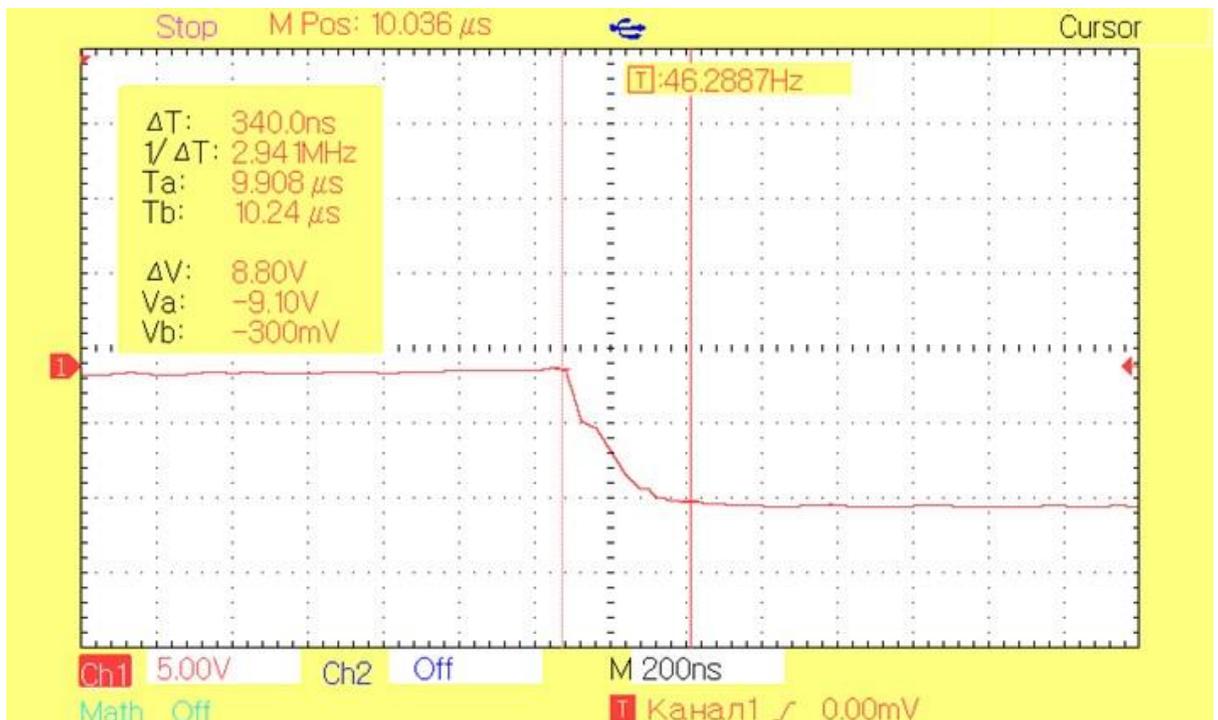


Рисунок 15 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 300 \text{ Ом}$  (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

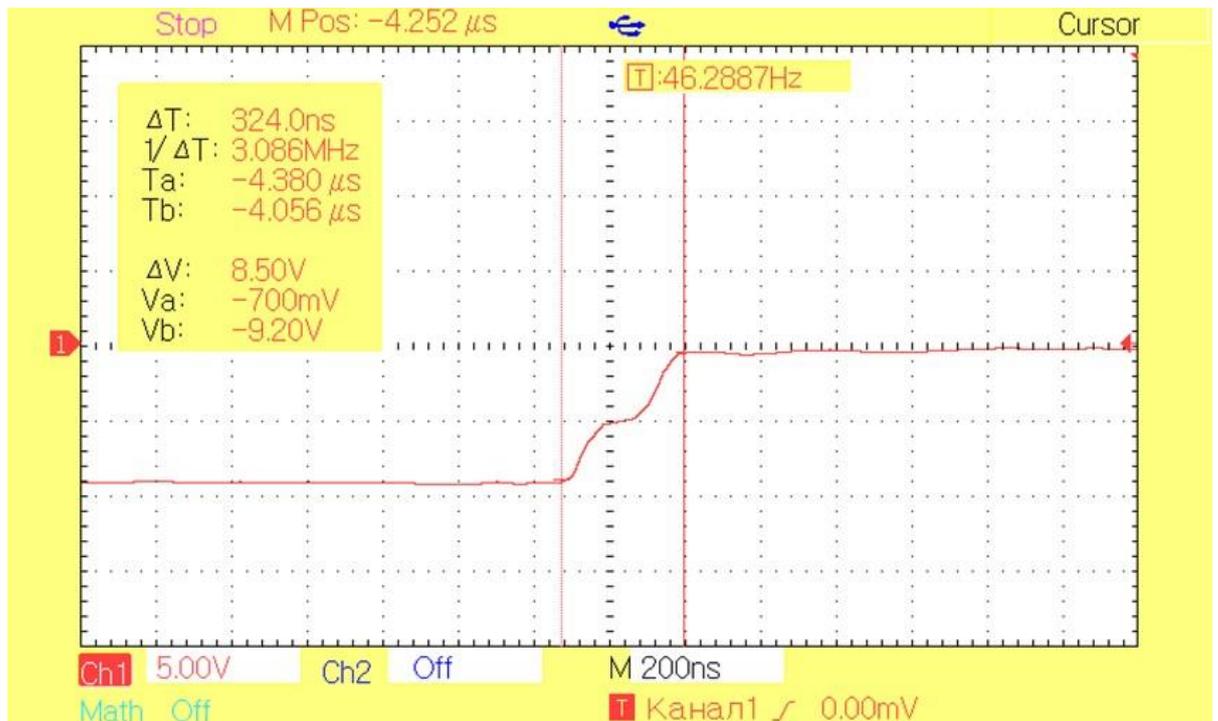


Рисунок 16 – Спад сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 300 \text{ Ом}$  (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)



Рисунок 17 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 150 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 450 \text{ Ом}$  (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

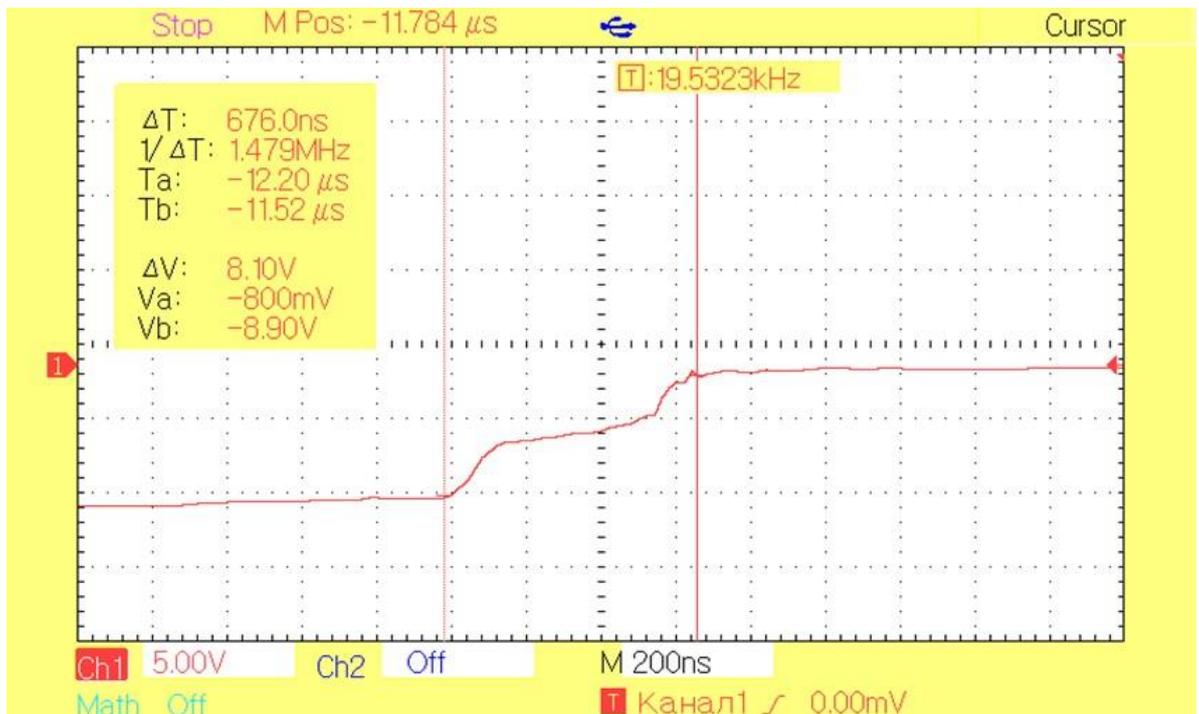


Рисунок 18 – Спад сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 150$  Ом,  $R_2 = 450$  Ом (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

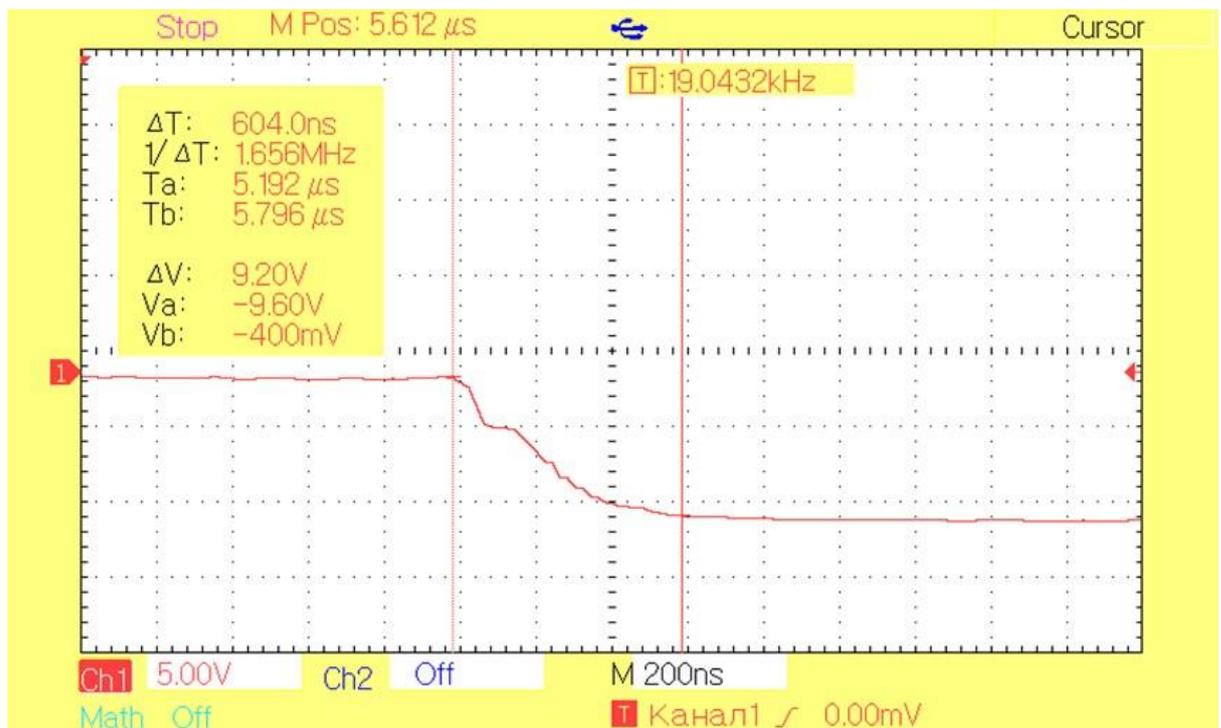


Рисунок 19 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 200$  Ом,  $R_2 = 600$  Ом (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

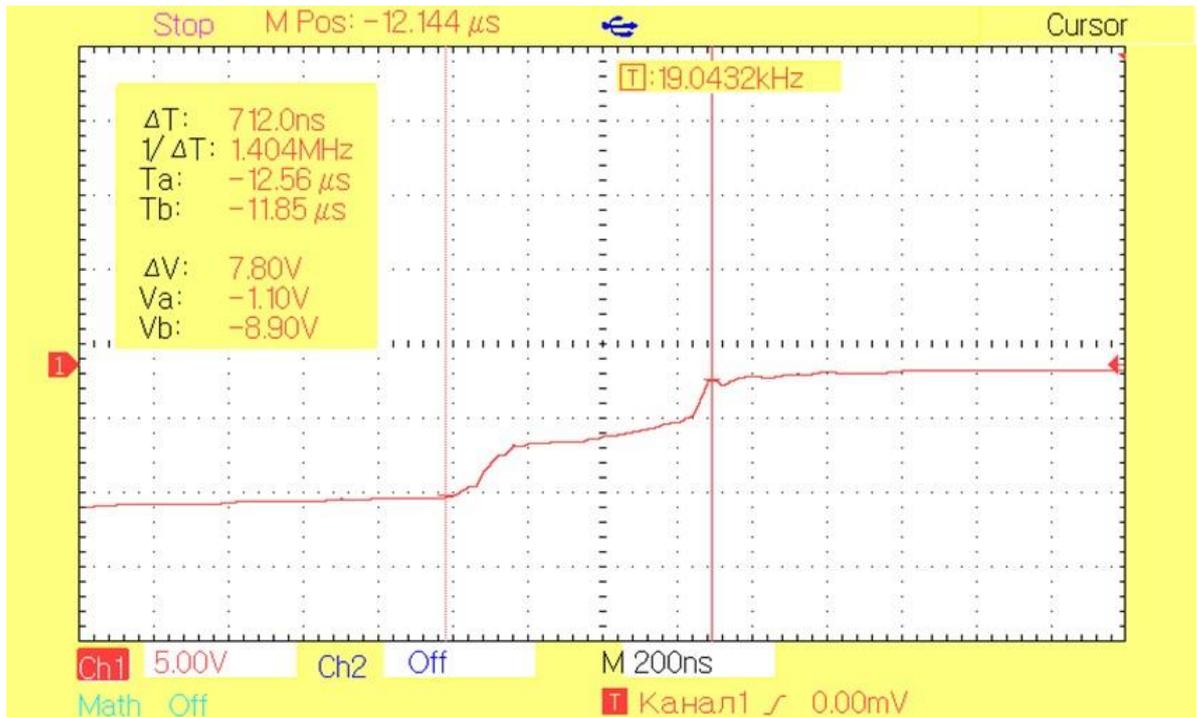


Рисунок 20 – Спад сигнала на затворе силового ключа (вспомогательный – IRLZ24N), сопротивления делителя  $R_1 = 200$  Ом,  $R_2 = 600$  Ом (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

Осциллограммы напряжения на затворе приведены на рисунках (Рисунок 17, Рисунок 18). Динамические потери на транзисторе составят:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (676 + 504) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 2.2 \text{ Вт.} \quad (63)$$

Ток в статическом режиме для третьей пары сопротивлений составит:

$$I = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{40}{200 + 600} = \frac{40}{800} = 0.05 \text{ А.} \quad (64)$$

Мощность, выделяемая на резисторах, составит:

$$\begin{cases} P_4 = I^2 \cdot R_1 = 0.05^2 \cdot 200 = 0.5 \text{ Вт} \\ P_5 = I^2 \cdot R_2 = 0.05^2 \cdot 600 = 1.5 \text{ Вт} \end{cases} \quad (65)$$

Осциллограммы напряжения на затворе приведены на рисунках (Рисунок 19, Рисунок 20). Динамические потери на транзисторе составят:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (712 + 604) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 2.5 \text{ Вт.} \quad (66)$$

По полученным результатам видно, что мощность, рассеиваемую на резисторах применяя сопротивления  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 300$  Ом, удалось снизить в 3 раза, при этом время открытия и закрытия транзистора возросли

незначительно, а динамические потери возросли на 0.4 Вт. Дальнейшее увеличение сопротивлений показывало гораздо худшие результаты, поэтому для данной схемы сопротивления  $R_1 = 100 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 300 \text{ Ом}$  приняты оптимальными.

### 3.2.2 Микросхема-драйвер IR2117

Следующим шагом было решено было проверить работу ключа со специализированной микросхемой драйвера. Был выбран драйвер верхнего уровня IR2117. Особенностью применения n-канального MOSFET транзистора в верхнем плече является необходимость бутстрепного питания, поскольку на затвор необходимо подавать положительное напряжение относительно истока, а в открытом состоянии напряжение на истоке будет равно напряжению питания схемы. Для нашей схемы это напряжение составляет  $V_{in} = 40 \text{ В}$ . В данном случае не имеет смысла использование транзистора логического уровня, поэтому был выбран транзистор IRFZ24N. Для гарантированного открытия данного транзистора, на затвор относительно истока достаточно подать  $V_{GS} = 10 \text{ В}$ . Таким образом относительно потенциала земли необходимо подать напряжение равное 50 В, что потребовало бы отдельного источника питания. Однако посредством применения бутстрепного питания достаточно подать только необходимые для открытия транзистора  $V_{GS} = 10 \text{ В}$ . Схема данного решения приведена ниже (Рисунок 21).

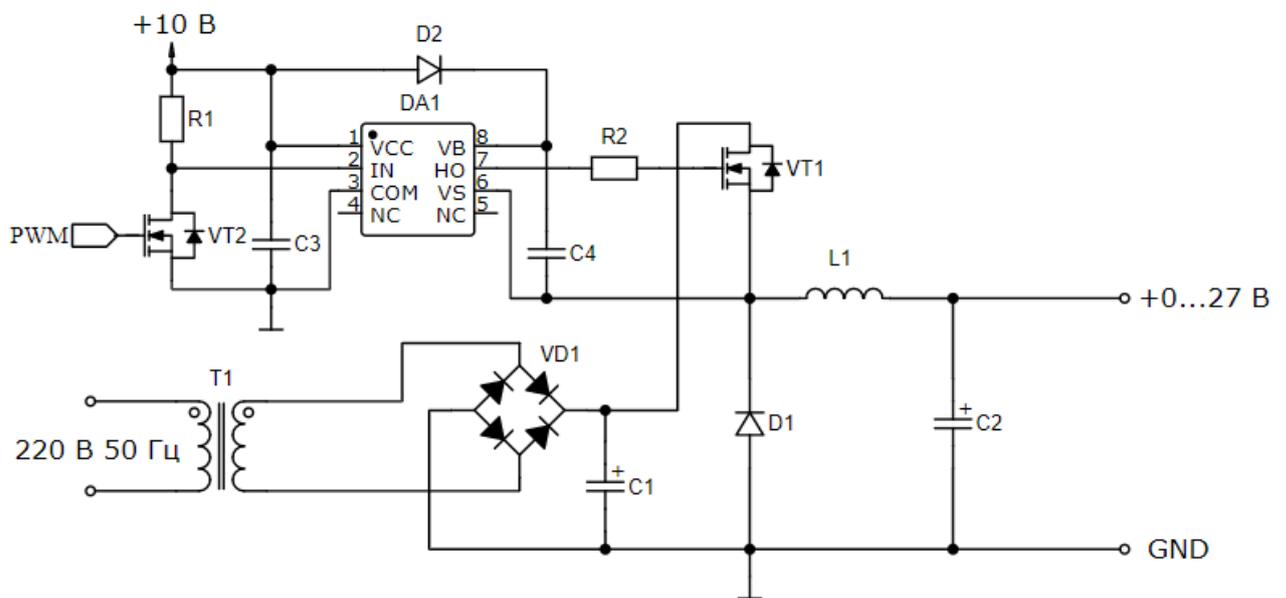


Рисунок 21 – Схема с применением драйвера IR2117

Подавать ШИМ сигнал напрямую на вход драйвера нельзя, так как минимальное напряжение логической единицы для данной микросхемы составляет  $V_{IH} = 9.5 \text{ В}$ , поэтому используем транзистор IRLZ24N в качестве вспомогательного ключа. Это приведет к инверсии сигнала, так как в момент отсутствия управляющего сигнала на затворе ко входу микросхемы будет приложено напряжение питания, а в момент когда транзистор открыт потенциал входа будет подтянут к земле. Для фильтрации напряжения питания микросхемы установлен керамический конденсатор емкостью  $C_{VCC} = 100 \text{ нФ}$ .

Бустрепный диод необходим для того, чтобы можно было блокировать полное напряжение шины источника питания, которое образуется, когда включается транзистор верхнего уровня. Это должен быть диод с быстрым восстановлением для минимизации величины заряда, поступающего обратно из бустрепного конденсатора в источник питания. В документации к микросхемам драйверов производителем International Rectifier указано что время обратного восстановления рекомендуется равным  $t_{tr} = 100 \text{ нс}$ . Исходя из этого параметра был выбран диод MUR4100 имеющий указанное время обратного восстановления.

Значение емкости бутстрепного конденсатора рассчитывается по формуле [10]:

$$C = \frac{2 \cdot (2 \cdot Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(ут.)}}{f})}{V_{CC} - V_f - V_{LS}}, \quad (67)$$

где  $I_{qbs(max)}$  – ток покоя для контура драйвера верхнего уровня,

$Q_{ls}$  – заряд сдвига уровней необходимый для одного цикла,

$I_{cbs(ут.)}$  – ток утечки бутстрепного конденсатора,

$V_{CC}$  – напряжение питания микросхемы,

$V_f$  – падение напряжения на бутстрепном диоде,

$V_{LS}$  – падение напряжения на нагрузке.

При подаче на затвор силового ключа напряжения  $V_{GS} = 10 \text{ В}$ , заряд затвора для IRFZ24N составляет  $Q_g = 13 \text{ нКл}$ . Ток покоя драйвера, согласно

документации, составляет  $I_{qbs(max)} = 240$  мкА, частота преобразований  $f = 31250$  Гц, заряд сдвига уровней для микросхемы IR2117 составляет  $Q_{ls} = 5$  нКл, ток утечки  $I_{cbs(ут.)}$  необходимо учитывать в случае применения электролитического конденсатора, в нашем случае будет применяться керамический конденсатор, поэтому влиянием данного фактора можно пренебречь. Напряжение питания микросхемы  $V_{cc} = 10$  В, падение напряжения на бутстрепном диоде примем равным  $V_f = 0.7$  В. Нагрузкой в данном случае является диод Шоттки, который обеспечивает цепь прохождения тока через нагрузку в момент, когда силовой транзистор закрыт. Примем падение напряжения на этом диоде равным  $V_{LS} = 0.4$  В.

Кроме того значение емкости конденсатора, полученное из уравнения приведенного выше уравнения, является минимально необходимым, однако, из-за принципа работы бутстрепного контура, использование конденсатора с низкими значениями номинала может привести к перезаряду, что в свою очередь может повлечь выход из строя ИС. Поэтому на практике, для того, чтобы свести к минимуму риск перезаряда, значение емкости, полученное из уравнения, следует умножить на 15.

Таким образом емкость конденсатора составит:

$$C = \frac{15 \cdot 2 \cdot (2 \cdot 13 \cdot 10^{-9} + \frac{240 \cdot 10^{-6}}{31250} + 5 \cdot 10^{-9})}{10 - 0.7 - 0.4} = 0.13 \text{ мкФ.} \quad (68)$$

Из имеющихся в наличии был выбран конденсатор емкостью  $C = 10$  мкФ.

Резистор в цепи затвора имеет защитную функцию, чтобы при разряде бутстрепного конденсатора не превысить выходной ток драйвера. Согласно документации, максимальный импульсный ток IR2117  $I_{out} = 250$  мА. Зададим это значение как величину тока затвора, тогда по закону Ома, значение сопротивления затворного резистора составляет:

$$R_g = \frac{V_{cc}}{I_{out}} = \frac{10 \text{ В}}{0.25 \text{ А}} = 40 \text{ Ом.} \quad (69)$$

Из номинального ряда выбираем значение сопротивления  $R_g = 47$  Ом.

Мощность, выделяемая на резисторе, составит:

$$P = \frac{V_{cc}^2}{R_g} = \frac{10^2}{47} = 2.1 \text{ Вт.} \quad (70)$$

Результаты применения данной семы на практике приведены в приложении (Рисунок 22, Рисунок 23).

Динамические потери на транзисторе составляют:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (500 + 292) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 1.5 \text{ Вт.} \quad (71)$$

Данная схема показала средний результат в плане эффективности, по рассеиваемой на транзисторе мощности. Это связано с длительностью времени открытия и закрытия. Не смотря на то что был подобран транзистор с низкими значениями паразитных емкостей, выходного тока  $I_{out} = 250 \text{ мА}$  недостаточно для быстрого переключения. Данную проблему теоретически возможно решить, применяя микросхему-драйвер с большим выходным током.

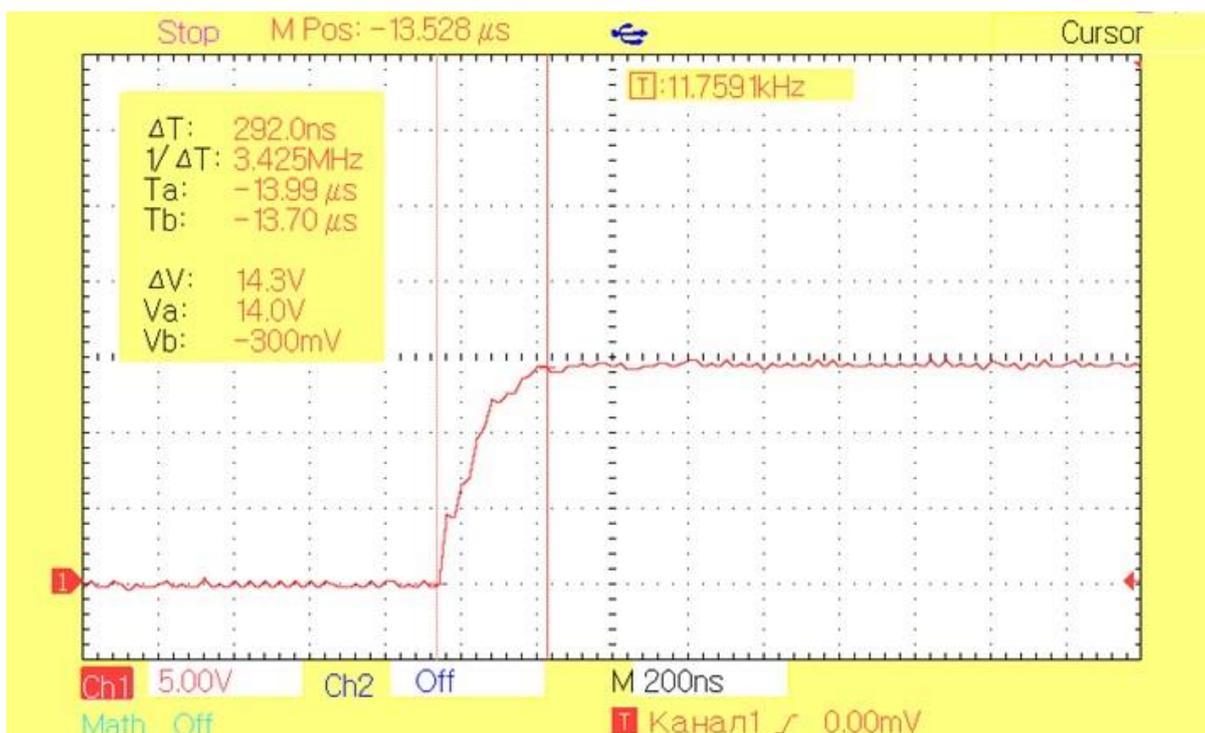


Рисунок 22 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа при использовании IR2117 (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

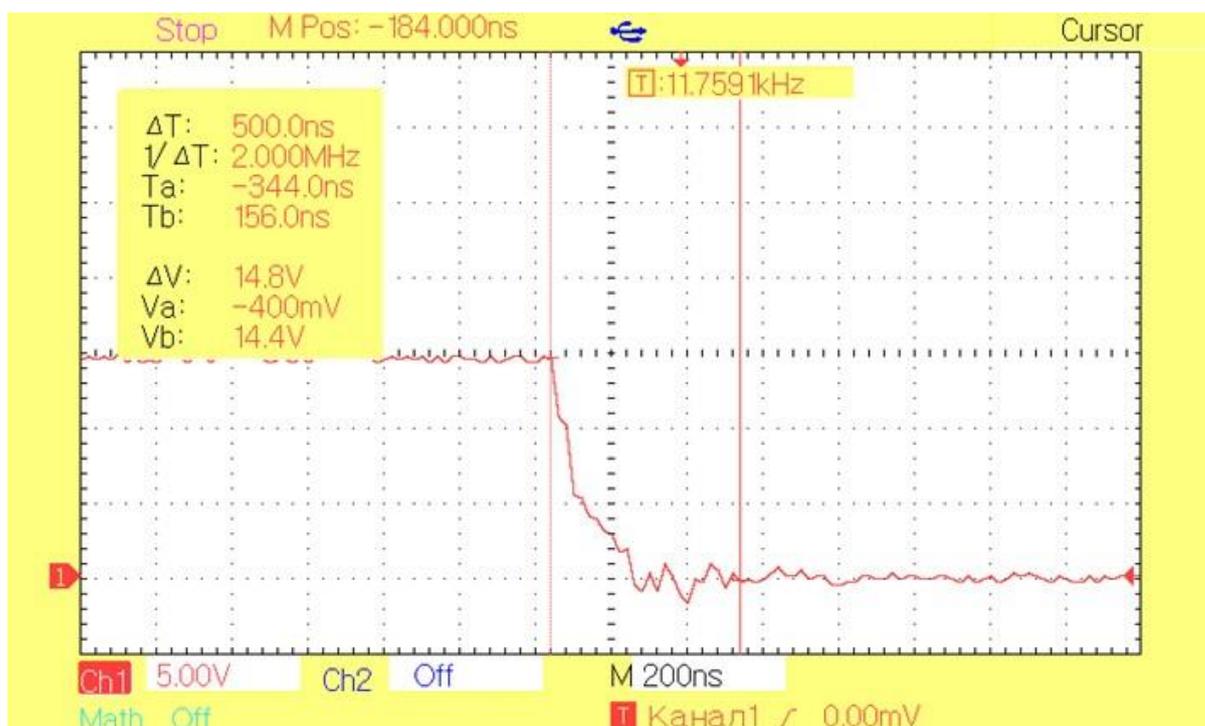


Рисунок 23 – Спад сигнала на затворе силового ключа при использовании IR2117 (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

### 3.2.3 Микросхема-драйвер IR2110

Следующим шагом является проверка работы схемы с микросхемой IR2110. Данный драйвер способен обеспечить выходной ток в размере 2 А.

В данной схеме  $VDD = 5\text{ В}$ , является питанием логики микросхемы. Это позволит подавать сигнал с микроконтроллера напрямую, не используя преобразователь уровня логической «1», как в случае с IR2117. Для фильтрации питания установлены электролитический конденсатор  $C_4$  емкостью 22 мкФ и керамический  $C_5$  емкостью 100 нФ.  $VCC = 10\text{ В}$  – напряжение подаваемое на бутстрепный конденсатор. Бустрепный диод и конденсатор используются такие же, как в варианте с IR2117, но сопротивление резистора затвора необходимо переопределить. Схема приведена ниже (Рисунок 24).

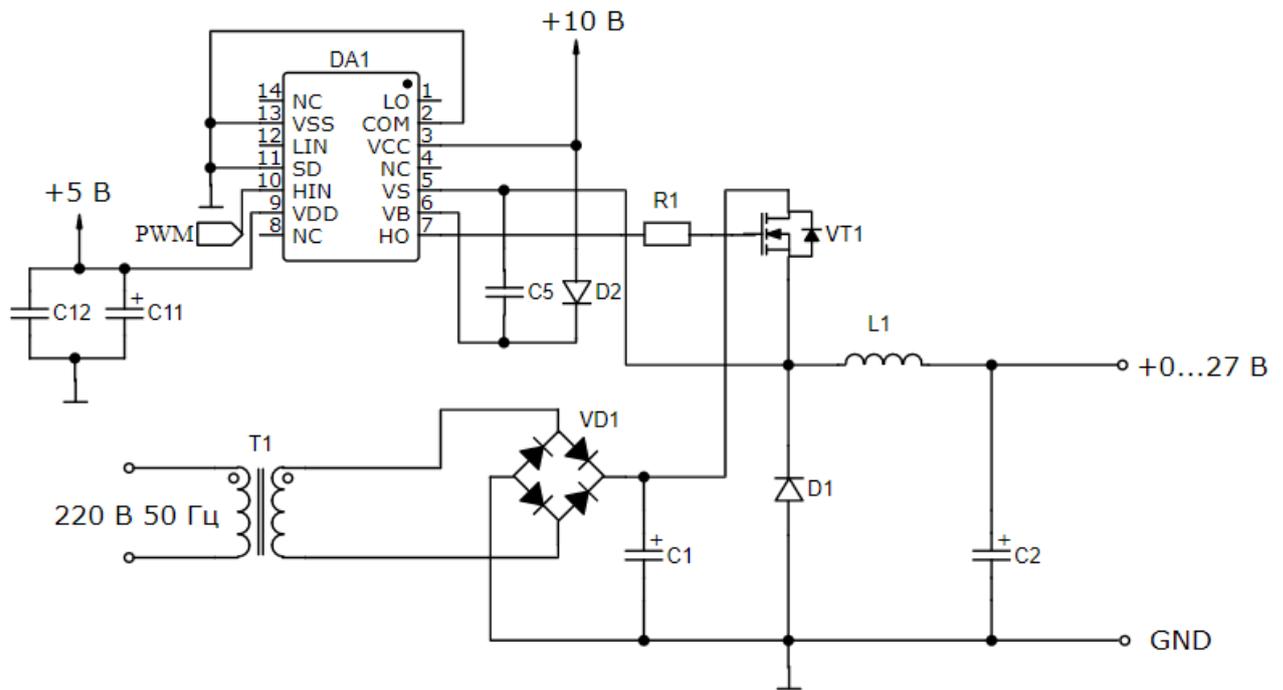


Рисунок 24 – Схема с применением драйвера IR2110

Исходя из максимального выходного тока микросхемы  $I_{out} = 2 \text{ A}$ , значение сопротивления затворного резистора не должно быть меньше:

$$R_g = \frac{V_{cc}}{I_{out}} = \frac{10 \text{ В}}{2 \text{ А}} = 5 \text{ Ом.} \quad (72)$$

Мощность, выделяемая на резисторе такого номинала, составит:

$$P = \frac{V_{cc}^2}{R_g} = \frac{10^2}{5} = 20 \text{ Вт.} \quad (73)$$

Результаты применения данной семы на практике приведены на рисунках ниже (Рисунок 25, Рисунок 26).

Динамические потери на транзисторе составляют:

$$P_{VT\_sw} = \left( \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 40 \cdot (304 + 376) \cdot 10^{-9} + \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot 40^2 \right) \cdot 31250 \approx 1.3 \text{ Вт.} \quad (74)$$

В результате проверки схемы можно сделать вывод, что хоть схема и показала один из лучших показателей по значению динамических потерь на силовом транзисторе, данное решение признано нерациональным, по причине того, что выше было рассмотрено решение с сопоставимыми потерями на силовом элементе, при этом значительно меньшими потерями на

вспомогательных элементах, а также требующим меньше финансовых затрат на компоненты.

Таким образом, наиболее эффективным был признан вариант с вспомогательным MOSFET транзистором IRLZ24N и резистивным делителем с сопротивлениями  $R_1 = 100 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 300 \text{ Ом}$ .

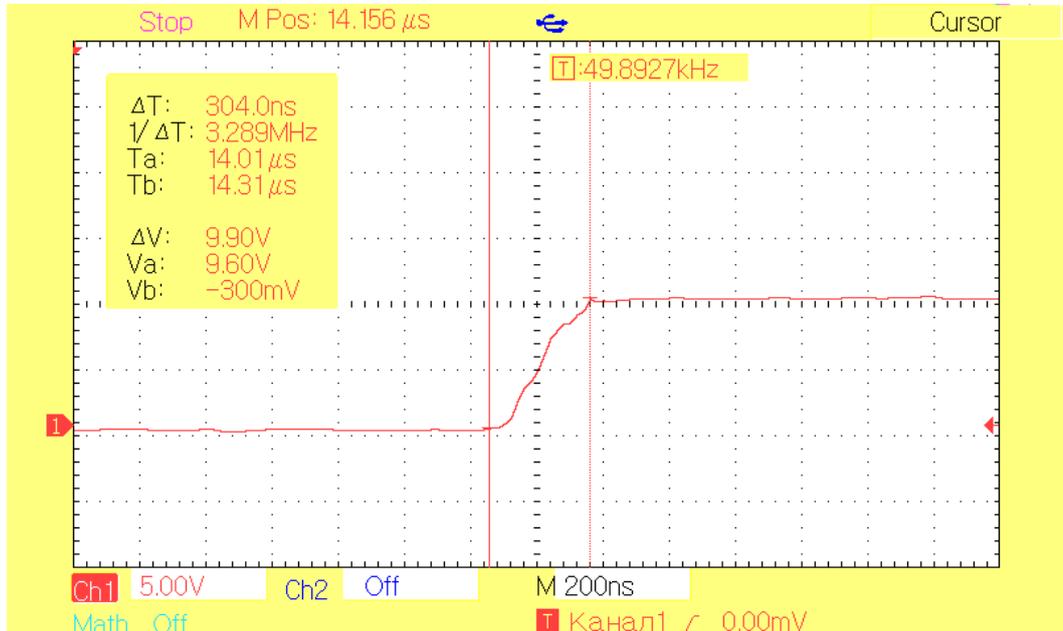


Рисунок 25 – Нарастание сигнала на затворе силового ключа при использовании IR2110 (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)



Рисунок 26 – Спад сигнала на затворе силового ключа при использовании IR2110 (вертикальная ось - напряжение, 5В/дел; горизонтальная - время, 200нс/дел)

### 3.3 Обратная связь по напряжению

Для реализации функции регулировки по напряжению, необходимо ввести обратную связь, чтобы микроконтроллер мог отслеживать действительное напряжение на нагрузке и регулировать скважность импульсов, подаваемых на силовой ключ.

Аналоговый порт микроконтроллера способен обрабатывать входное напряжение от 0 В до опорного напряжения. В нашем случае, опорное напряжение  $V_{ref} = 5$  В. Учитывая, что на нагрузке напряжение должно регулироваться в диапазоне  $V_{out} = 0 \div 27$  В, для обеспечения обратной связи необходимо использовать резистивный делитель напряжения. При этом нужно учитывать что используемый в тестовом образце трансформатор имеет амплитудное напряжение вторичной обмотки  $U_{in} = 40$  В, поэтому ограничение на максимальное выходное напряжение блока питания будет установлено в программе. Однако, для того чтобы однозначно предотвратить попадание на вход АЦП напряжения выше опорного, резистивный делитель необходимо рассчитывать с учетом максимального напряжения питания схемы.

Для того чтобы рассчитать номиналы резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , составляющих делитель, необходимо получить соотношение их величин в зависимости от входного и выходного напряжений. Если  $V_{in(max)} = 40$  В, тогда  $V_{out(max)} = 5$  В. Ток, протекающий через делитель определяется по формуле:

$$I = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2}. \quad (75)$$

Тогда выходное напряжение определяется как:

$$U_{out} = I \cdot R_2 = \frac{U_{in} \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (76)$$

Тогда, учитывая, что:

$$\frac{U_{in(max)}}{U_{out(max)}} = \frac{40}{5} = 8. \quad (77)$$

Данное соотношение справедливо для всех напряжений в диапазоне регулирования, поэтому получаем для  $R_1$  и  $R_2$ :

$$U_{in} = 8 \cdot U_{out} = \frac{8 \cdot U_{in} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_1 + R_2 = 8 \cdot R_2 \Rightarrow R_1 = 7 \cdot R_2. \quad (78)$$

Согласно техническому описанию на микроконтроллер Atmega328p суммарное сопротивление резисторов не должно превышать 10 кОм, для достижения максимальной точности измерения. Таким образом получаем:

$$R_1 + R_2 \leq 10 \text{ кОм} \Rightarrow 8 \cdot R_2 \leq 10 \text{ кОм} \Rightarrow R_2 \leq 1250 \text{ Ом}. \quad (79)$$

Из номинального ряда выбираем ближайший по номиналу  $R_2 = 1.2 \text{ кОм}$ . Сопротивление  $R_1$  в таком случае должно составить:

$$R_1 = 7 \cdot R_2 = 7 \cdot 1200 = 8400 \text{ Ом}. \quad (80)$$

Ближайшими к рассчитанному значению являются номиналы 8.2 кОм и 9.1 кОм. Принимаем  $R_1 = 9.1 \text{ кОм}$ , так как иначе напряжение обратной связи при максимальном входном напряжении превысит значение опорного напряжения АЦП.

### 3.4 Обратная связь по току

В качестве измерительного элемента было решено использовать шунтовой резистор. Датчик на базе трансформатора тока не подходит по причине того, что измерение будет проводиться в цепи постоянного тока. При выборе же между резистивным датчиком и датчиком на эффекте Холла, предпочтение резистивному датчику отдано по причине того, что в силовой цепи присутствует катушка индуктивности, которая является источником электромагнитных помех. Данные помехи могут существенно влиять на чувствительный к магнитному полю датчик на эффекте Холла, что приведет к искажению сигнала, передаваемого по цепи обратной связи.

В качестве средства измерения тока используется резистор номиналом 100 мОм. Использование резистора данного номинала не внесет больших потерь в выходную цепь блока питания.

Однако даже при максимальном выходном токе  $I_{max} = 3 \text{ А}$ , падение напряжения на шунте составит примерно 300 мВ. Очевидно, что считывание столь низких значений с помощью АЦП напрямую не даст высокой точности регулирования. Поэтому для усиления сигнала обратной связи необходимо

использовать дифференциальный усилитель. Схема данного усилителя приведена ниже (Рисунок 27).

Данное решение является одной из базовых схем на базе ОУ. Дифференциальный усилитель предназначен для усиления разности сигналов, поступающих на его входы. Что немаловажно, ОУ в таком включении помимо, собственно, усиления сигнала, дает синфазную помеху.

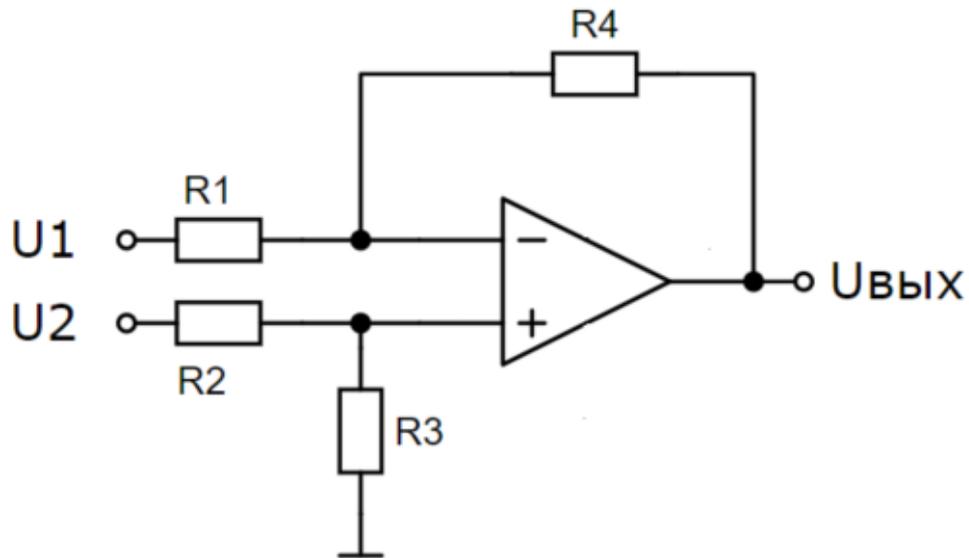


Рисунок 27 – Схема дифференциального усилителя

Исходной, для определения выходного сигнала, является система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{V_{\text{ВЫХ}} - V_-}{R_4} = \frac{V_- - V_1}{R_1} \\ V_+ = V_2 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \\ V_+ = V_- \end{cases} \quad (81)$$

Решая эту систему уравнений, получаем:

$$V_{\text{ВЫХ}} = V_2 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_1 + R_4}{R_1} - V_2 \cdot \frac{R_4}{R_1}. \quad (82)$$

Если примем, что:

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}, \quad (83)$$

То выражение, полученное ранее, можно преобразовать к виду:

$$V_{\text{вых}} = (V_2 - V_1) \cdot \frac{R_3}{R_2}. \quad (84)$$

Таким образом, коэффициент усиления дифференциального сигнала определяется отношением резисторов делителей. После этого необходимо лишь подобрать номиналы резисторов таким образом, чтобы диапазон измерений совпадал с диапазоном считывания АЦП.

АЦП используемого микроконтроллера способен измерять значения в диапазоне  $0 \div 5$  В, и имеет разрядность 8 бит.

При протекающем токе  $I = 1$  А, падение напряжения на шунте, не учитывая погрешность, составит:

$$\Delta U = I \cdot R = 1 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 100 \text{ мВ}. \quad (85)$$

Тогда, хорошим решением будет применение усиления в 10 раз, таким образом значение протекающего тока будет совпадать по значению с напряжением, передаваемым по цепи обратной связи, что упростит вычисления микроконтроллером. Номиналы резистором соответственно принимаем как  $R_3 = 10$  кОм,  $R_2 = 1$  кОм.

Итоговая схема приведена на рисунке ниже (Рисунок 28). На данной схеме кнопка SW1 предусмотрена для включения/выключения блока питания, а кнопка SW2 для переключения режима регулирования – ток или напряжение. Светодиоды LED<sub>1</sub> и LED<sub>2</sub> служат для индикации текущего режима работы, а светодиод LED<sub>3</sub> – при загорании сигнализирует о том, что в режиме стабилизации напряжения выходной ток превысил порог 95 % от максимального. Если ток превысит максимально допустимый, то блок питания автоматически переключится в режим стабилизации тока. Переменные резисторы R<sub>19</sub> и R<sub>20</sub> служат для установки желаемого напряжения или тока на выходе. RC-цепь, состоящая из резистора R<sub>18</sub> и C<sub>3</sub> – аппаратный способ устранения дребезга контакта кнопки, это позволит избежать многократного регистрирования нажатия, а соответственно и переключения между режимами регулирования. Также после входного конденсатора установлен параметрический стабилизатор для питания напряжением 5 В логической части схемы.

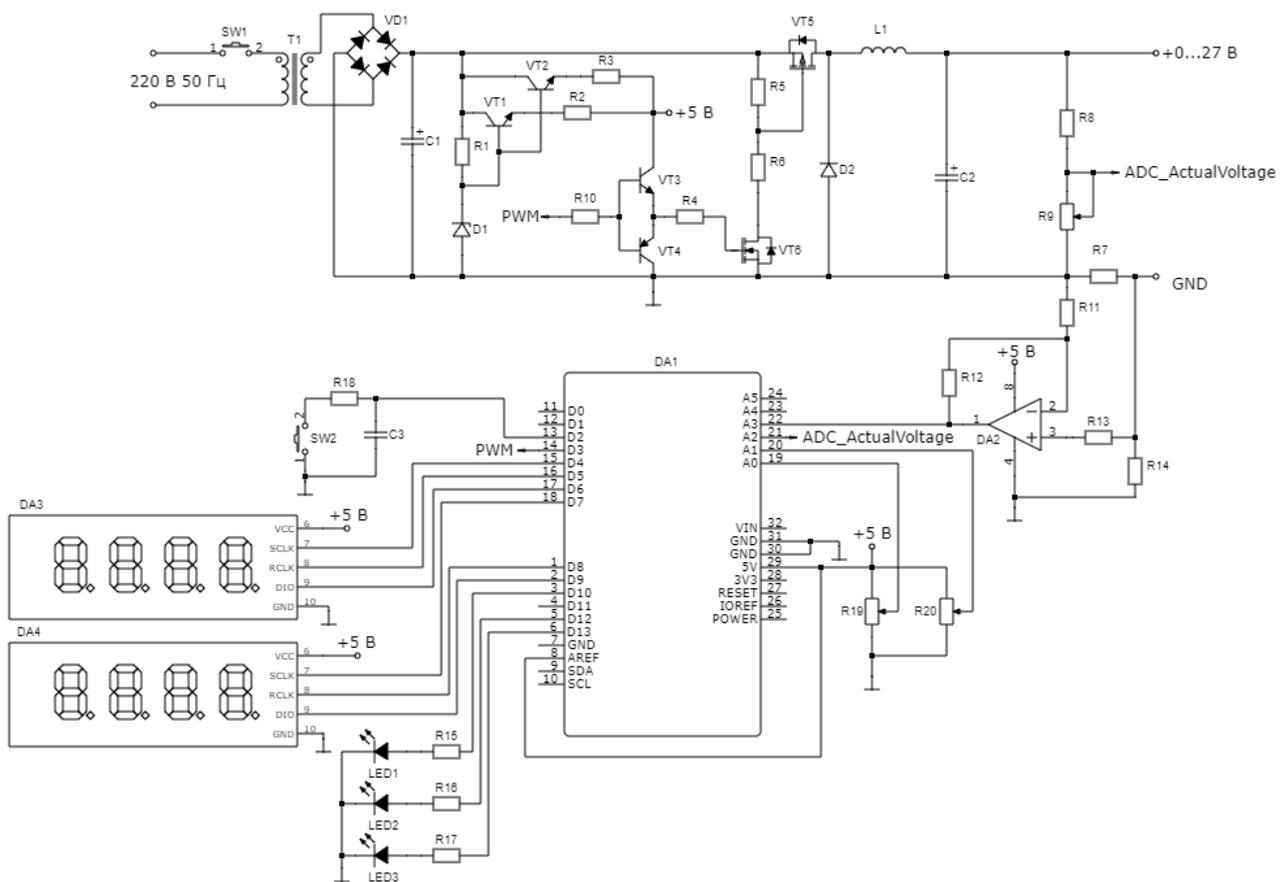


Рисунок 28 – Принципиальная электрическая схема разрабатываемого блока питания

#### 4 Разработка печатной платы

После того как разработана принципиальная электрическая схема, необходимо произвести трассировку печатной платы блока питания. Работа производится в САПР DipTrace.

Главная задача, после расположения всех элементов – рассчитать ширину дорожек цепей таким образом, чтобы они были способны выдержать протекающий по ним ток без вреда для себя. При этом, наиболее опасными являются безусловно силовые линии. Согласно ТЗ максимальный выходной ток составляет  $I_{\max} = 3 \text{ А}$ , однако потребителем является не только нагрузка, но и логическая часть схемы. Несмотря на то, что потребление отдельных частей невелико, стоит положить запас в 1 А, чтобы гарантированно уберечь дорожки от выгорания.

Таким образом, исходными данными для расчета являются:  $I_{\max(\text{power})} = 4 \text{ А}$ ,  $I_{\max(\text{logic})} = 1 \text{ А}$ . Толщина слоя медной фольги на текстолите составляет 35 мкм. Расчет производится по формуле [12]:

$$W = \frac{S}{T}, \quad (86)$$

где  $S$  – площадь сечения дорожки,  $\text{мм}^2$ ;

$T$  – толщина дорожки,  $\text{мм}$ ;

Площадь сечения дорожки определяется по формуле:

$$S = 0.0254^2 \cdot \left( \frac{I}{k \cdot \Delta t^b} \right)^{\frac{1}{c}}, \quad (87)$$

где  $I$  – сила тока,  $\text{А}$ ;

$\Delta t$  – нагрев дорожек в процессе работы,  $^{\circ}\text{C}$ .

$k$ ,  $b$  и  $c$  – константы из стандарта IPC-2221. Для внешних слоев  $k = 0.048$ ,  $b = 0.44$ ,  $c = 0.725$ .

Положим, что безопасное изменение температуры для дорожек в процессе работы равно  $10^{\circ}\text{C}$ , тогда для силовых линий:

$$S = 0.0254^2 \cdot \left( \frac{4}{0.048 \cdot 10^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} = 0.07 \text{ мм}^2. \quad (88)$$

Таким образом, для дорожки с толщиной  $T = 35$  мкм, получаем:

$$W = \frac{0.07 \text{ мм}^2}{0.035 \text{ мм}} = 2 \text{ мм.} \quad (89)$$

Для дорожек логической части:

$$S = 0.0254^2 \cdot \left( \frac{1}{0.048 \cdot 10^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} = 0.01 \text{ мм}^2. \quad (90)$$

$$W = \frac{0.01 \text{ мм}^2}{0.035 \text{ мм}} = 0.3 \text{ мм.} \quad (91)$$

С учетом рассчитанных значений была произведена трассировка печатной платы (Рисунок 29, Рисунок 30). Необходимо отметить, что не все компоненты могут быть размещены на плате. Это замечание справедливо для таких компонентов как кнопка переключения режима работы, и кнопка включения/выключения блока питания, а также семисегментные индикаторы, поэтому на плате предусмотрены коннекторы для подключения данных элементов, которые должны находиться на корпусе. Кроме того, на плате размещены клеммы, для подключения проводов, приходящих с сетевого трансформатора, а также для подключения к клеммам выхода, которые также должны располагаться на корпусе.

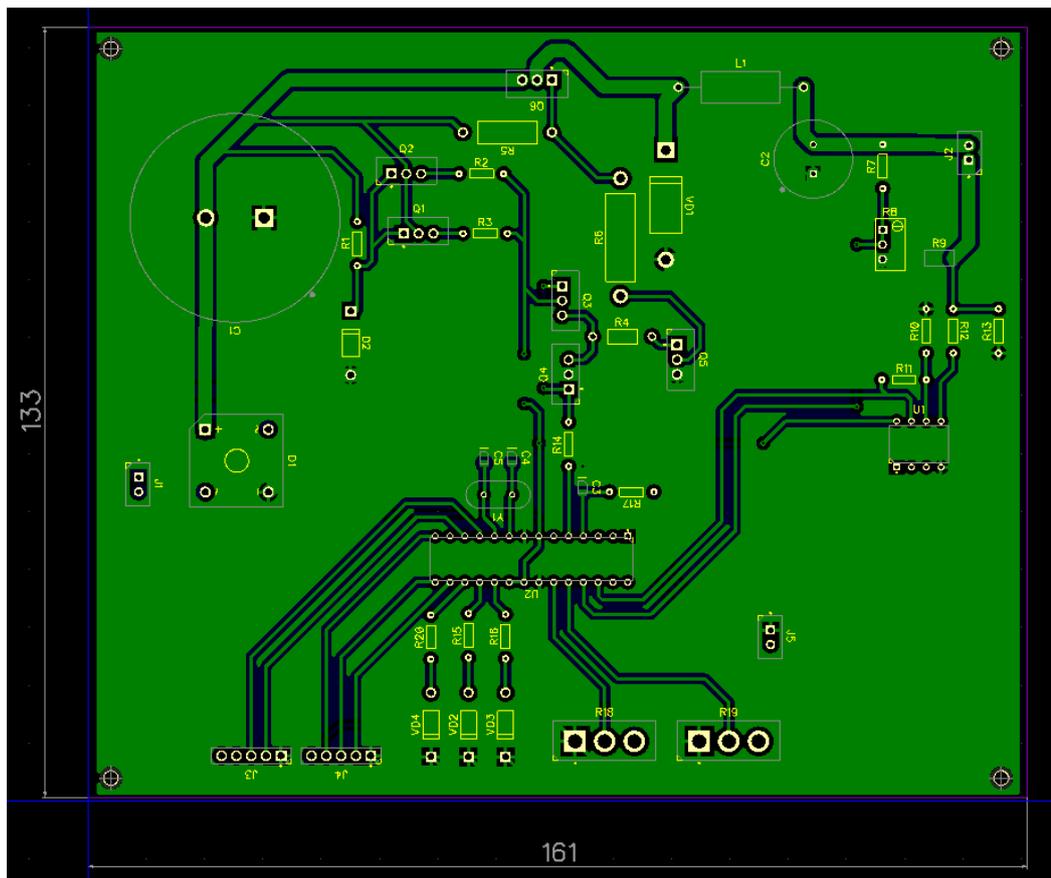


Рисунок 29 – Верхний слой печатной платы разрабатываемого блока питания

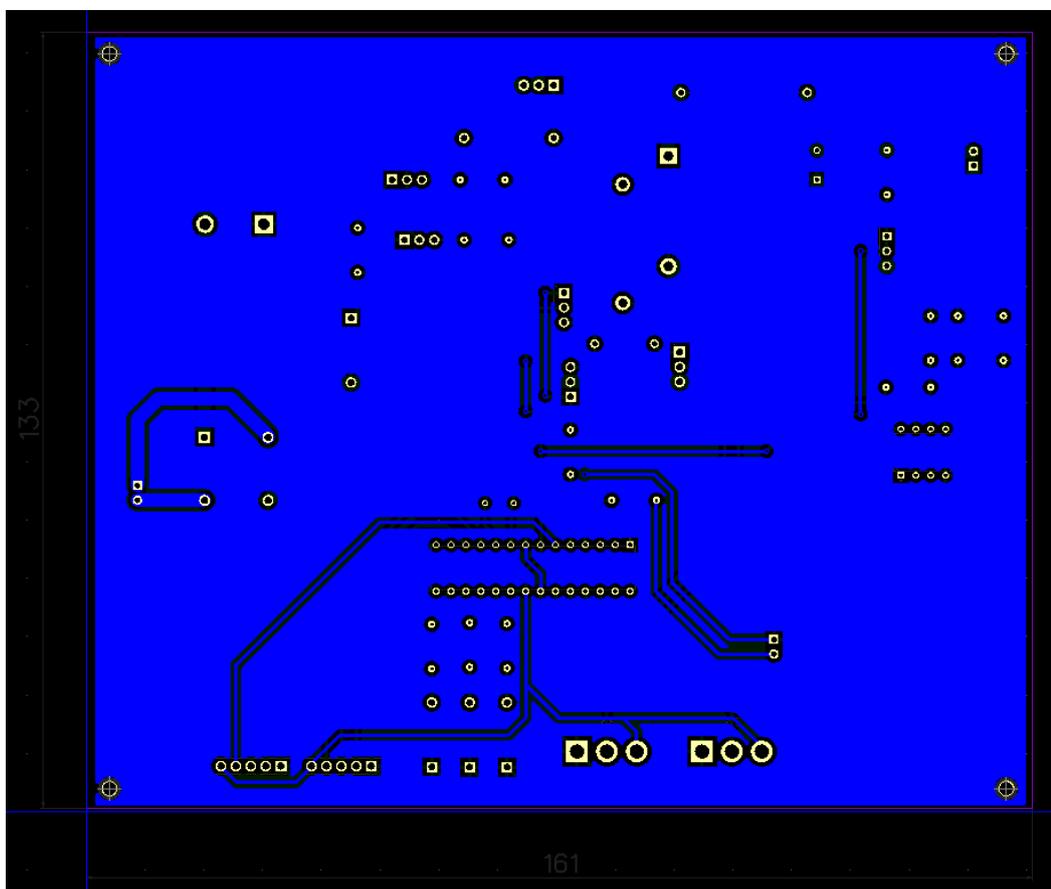


Рисунок 30 – Нижний слой печатной платы разрабатываемого блока питания

## 5 Разработка алгоритма работы микроконтроллера

### 5.1 Конфигурация портов ввода-вывода

Для реализации регуляторов тока и напряжения, возможности переключения между режимами, а также индикации текущего режима работы, потребуется определить четыре аналоговых порта и один цифровой как входы, и четыре цифровых как выходы. При этом цифровой порт, к которому подключается кнопка необходимо с помощью внутреннего резистора подтянуть к шине питания, для того что бы, когда кнопка разомкнута, на входе не появились помехи.

Так же в функции `setup`, в которой и указывается конфигурация необходимо вызвать функцию инициализации АЦП, которая будет рассмотрена позднее. Для формирования ШИМ-сигнала управления силовым ключом используется сторонняя библиотека `GyverPWM`. Помимо генерации ШИМ-сигнала, в конфигурации также необходимо указать другой таймер, который будет управлять динамической индикацией дисплеев, а также разрешить прерывания и определить их период.

Листинг функции `setup()` приведен в приложении А (Таблица А.1).

### 5.2 Инициализация АЦП

Работу АЦП можно настроить, используя регистры `ADMUX` и `ADCSRA`.

Данные регистры приведены на рисунках ниже (Рисунок 31, Рисунок 32):

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x7C)	<b>REFS1</b>	<b>REFS0</b>	<b>ADLAR</b>	–	<b>MUX3</b>	<b>MUX2</b>	<b>MUX1</b>	<b>MUX0</b>	<b>ADMUX</b>
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рисунок 31 – Биты регистра `ADMUX`

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x7A)	<b>ADEN</b>	<b>ADSC</b>	<b>ADATE</b>	<b>ADIF</b>	<b>ADIE</b>	<b>ADPS2</b>	<b>ADPS1</b>	<b>ADPS0</b>	<b>ADCSRA</b>
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рисунок 32 – Биты регистра `ADCSRA`

Для инициализации в регистре ADMUX нас интересует 3 старших бита – REFS1, REFS0 и ADLAR. Биты REFS отвечают за выбор опорного напряжения АЦП. Для того чтобы опорным считалось напряжение с порта AREF, необходимо установить бит REFS1 = 0, и бит REFS0 = 0. Бит ADLAR отвечает за метод формирования результата, в зависимости от значения бита результат формируется как показано на рисунке (Рисунок 33):

### 23.9.3.1 ADLAR = 0

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
(0x79)	–	–	–	–	–	–	ADC9	ADC8	ADCH
(0x78)	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	ADC0	ADCL
	7	6	5	4	3	2	1	0	
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

### 23.9.3.2 ADLAR = 1

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
(0x79)	ADC9	ADC8	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADCH
(0x78)	ADC1	ADC0	–	–	–	–	–	–	ADCL
	7	6	5	4	3	2	1	0	
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рисунок 33 – Формирование результата измерений АЦП

Предпочтительным является вариант, когда ADLAR = 1. Это дает возможность использовать как результат измерений 8 бит ADCH, и не использовать наиболее зашумленные биты ADC1 и ADC0.

Биты MUX остаются по умолчанию, работа с ними будет описана в функции чтения данных.

В регистре ADCSRA нас интересуют биты ADEN и ADPS. ADEN непосредственно разрешает работу АЦП, пока бит установлен как 0 – не происходит никаких измерений. Биты ADPS0, ADPS1, ADPS2 отвечают за предделитель частоты работы АЦП. По умолчанию частота работы Atmega328 на плате Arduino Uno составляет 16 МГц, при этом наибольшую точность измерений АЦП достигает при использовании частоты в пределах от 50 кГц до

200 кГц. Соответственно, при использовании предделителя на 128, частота тактирования АЦП составит 125 кГц. Таким образом все биты ADPS необходимо установить равными 1. Алгоритм функции инициализация АЦП приведен на рисунке ниже (Рисунок 34):



Рисунок 34 – Алгоритм функции инициализации АЦП  
Листинг функции приведен в приложении Б (Таблица Б.1).

### 5.3 Чтение данных с АЦП

Главная проблема со считыванием данных является необходимость измерения на нескольких каналах АЦП, при том, что одновременно значения можно получать только с одного. Для обхода этого ограничения была определена функция.

Идея состоит в том, чтобы последовательно опрашивать все каналы измерений. Канал, на котором в данный момент происходит измерение определяется битами MUX, о которых говорилось ранее. Алгоритм функции приведен на рисунке ниже (Рисунок 35):



Рисунок 35 – Алгоритм функции чтения данных с АЦП

Данная функция, принимая номер канала из основной функции программы, перенастраивает АЦП, и возвращает результат измерений. Листинг функции приведен в приложении В (Таблица В.1).

#### 5.4 Определение переменных

Целочисленные 8 битные переменные TargetVoltageADC, ActualVoltageADC, TargetCurrentADC и ActualCurrentADC служат для записи значений измерений АЦП, в то время, как переменные с плавающей точкой TargetVoltage, ActualVoltage, TargetCurrent и ActualCurrent используются для вывода результата работы регуляторов. Целочисленная переменная PWM\_Duty является значением коэффициента заполнения ШИМ-сигнала передаваемого на силовой транзистор. Логическая переменная flag служит для запоминания состояния кнопки, а mode\_flag для определения режима работы блока питания – регулятор тока или напряжения. Целочисленная константа NUM\_READ

используется в фильтре скользящего среднего для измеряемых значений тока и напряжения. Переменные disp1 и disp2 отвечают соответственно за индикаторы напряжения и тока. Номера портов, к которым подключены выходы модулей, а также период прерываний для динамической индикации, для удобства также объявляются отдельно. Листинг используемых переменных приведен в приложении Г (Таблица Г.1).

### 5.5 Основная функция

В цикле основной функции происходит чтение значений АЦП, переключение режима регулирования и вызов функции регулирования соответствующей текущему режиму работы. Алгоритм основной функции приведен на рисунке ниже (Рисунок 36):

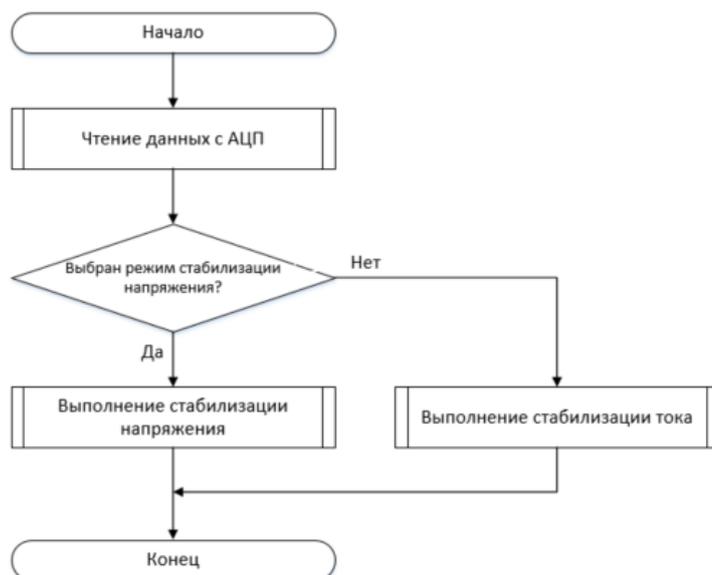


Рисунок 36 – Алгоритм основной функции программы  
Листинг функции приведен в приложении Д (Таблица Д.1).

### 5.6 Индикация

Для отображения информации о действующих значениях тока и напряжения без необходимости подключения к ПК в разрабатываемом блоке питания используются семисегментные индикаторы. Поскольку количество портов ввода-вывода МК ограничено, и соответственно нет возможности подключать каждый сегмент отдельно, то были использованы два модуля на базе микросхемы ТМ74НС595. Данный модуль позволяет выводить четырехзначные

числа с десятичной точкой. Кроме того, на данный модуль существуют отработанные библиотеки, позволяющие быстро производить настройку для вывода необходимой информации в требуемом виде.

В функциях регуляторов уже включены функции для вывода значений на индикаторы, однако из-за того, что на выходе присутствуют высокочастотные пульсации, для того чтобы на индикаторы не меняли свое значение при каждой пульсации был применен фильтр бегущего среднего. Также, для работы динамической индикации необходимо определить функцию прерывания таймера. Листинги данных функций приведены в приложении Е (Таблица Е.1, Таблица Е.2).

### **5.7 Функции стабилизаторов**

Работа стабилизаторов достаточно проста – при несоответствии заданного и фактического напряжения на делителе (в случае стабилизации напряжения) или на выходе дифференциального усилителя (в случае стабилизации тока), изменяется коэффициент заполнения ШИМ-сигнала.

При этом, в программе установлены некоторые ограничения, а именно: нижним порогом коэффициента заполнения установлено значение в 2 %, это обусловлено тем чтобы силовой транзистор успевал полностью открыться, а не находился в линейном режиме. Верхние границы коэффициента заполнения подобраны таким образом, чтобы напряжение на выходе не превышало заявленное в соответствии с ТЗ  $U_{\max} = 27$  В. Кроме того в функции стабилизатора напряжения прописано условие о включении предупреждения о превышении порога в 95 % от максимально допустимого тока, а также защита от превышения тока – В случае превышения максимального тока, блок автоматически переключается в режим стабилизации тока. Ниже приведены алгоритмы работы стабилизаторов (Рисунок 37, Рисунок 38):



Листинг функций стабилизаторов приведен в приложении Ж (Таблица Ж.1, Таблица Ж.2).

Ниже приведены временные диаграммы, полученные с помощью Arduino IDE, отражающие работу блока питания (Рисунок 39 – Рисунок 42).

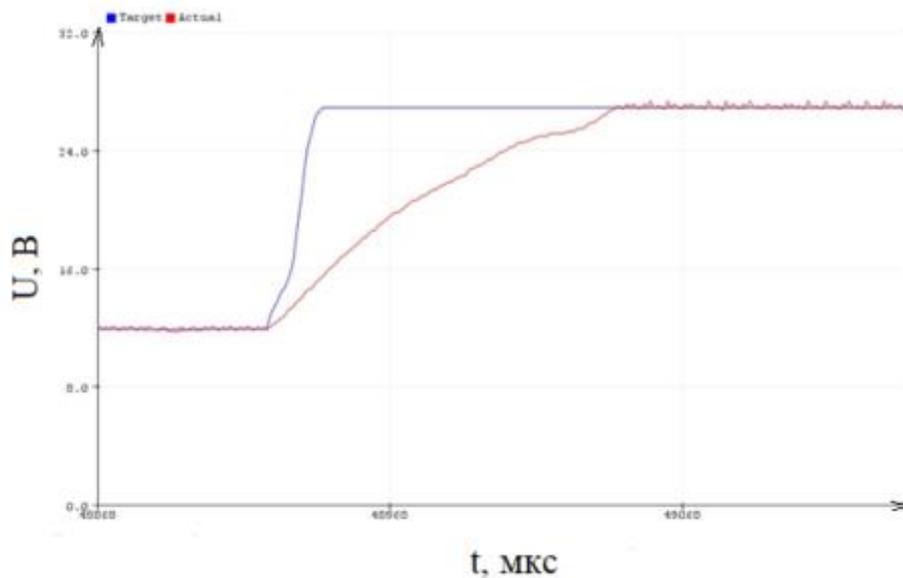


Рисунок 39 – Работа стабилизатора напряжения при изменении заданного значения

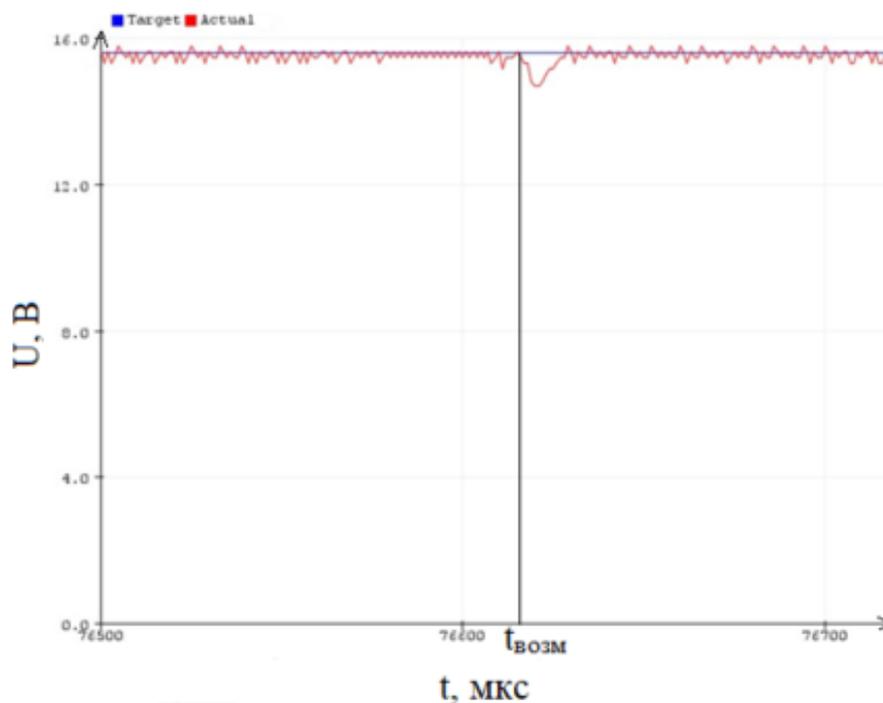


Рисунок 40 – Работа стабилизатора напряжения при возмущающем воздействии (уменьшение сопротивления нагрузки)

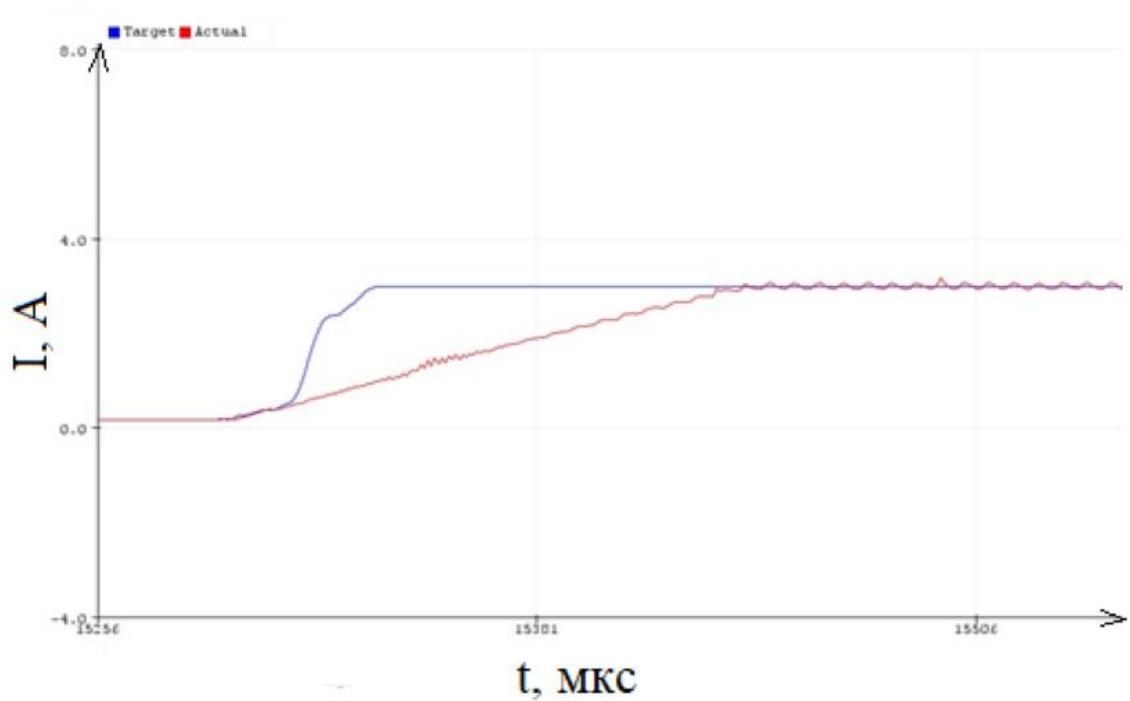


Рисунок 41 – Работа стабилизатора тока при изменении заданного значения

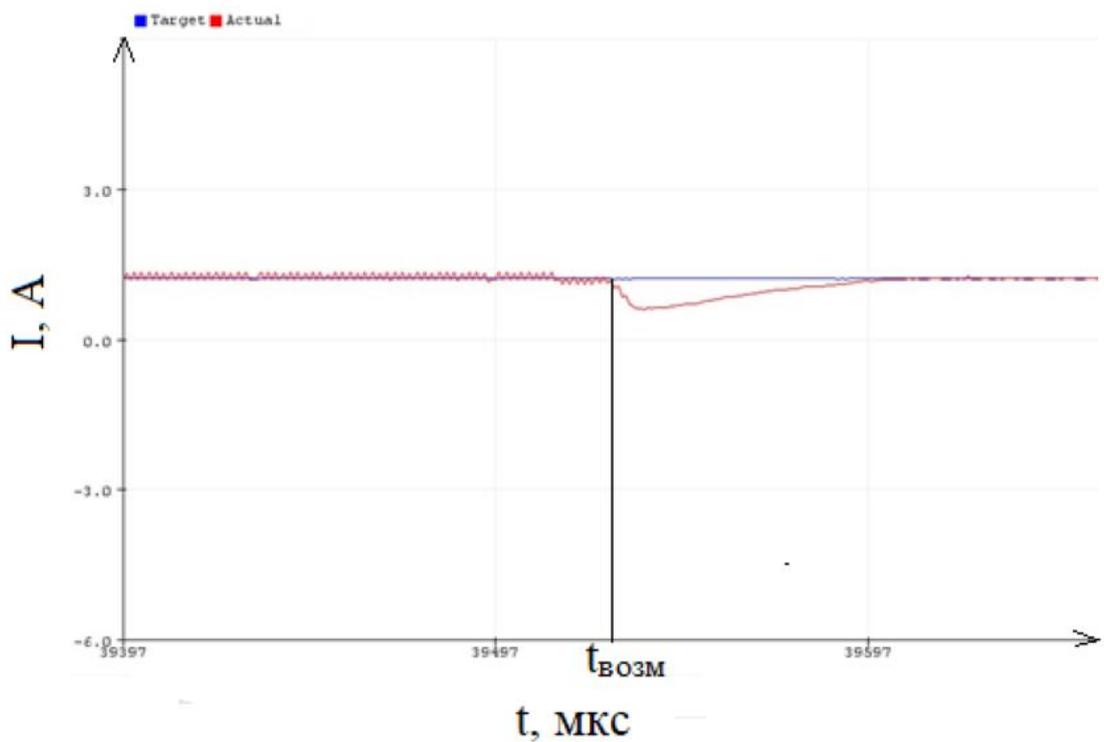


Рисунок 42 – Работа стабилизатора тока при возмущающем воздействии (увеличение сопротивления нагрузки)

Из полученных диаграмм видно, что регуляторы справляются со своей задачей. Действующие значения на выходе схемы колеблются возле заданных значений на всем диапазоне регулируемых величин. Заданные границы также

держатся верно. При минимальной скважности напряжение на выходе составляет примерно 0.8 В. В приложении 3 приведены нагрузочные характеристики напряжения от коэффициента заполнения для нескольких токов (Рисунок 3.1 – Рисунок 3.3), а также нагрузочная характеристика тока (Рисунок 3.4). Также в приложении И приведены графики отклонений регулируемых величин от заданных (Рисунок И.1 – Рисунок И.4).

Таблица 1 – Результат работы стабилизатора напряжения

К-т заполнения	Напряжение								
	1 А			2 А			3 А		
%	U <sub>зад</sub> , В	U <sub>р</sub> , В	δ, %	U <sub>зад</sub> , В	U <sub>р</sub> , В	δ, %	U <sub>зад</sub> , В	U <sub>р</sub> , В	δ, %
10	2,7	2,8	0,4	2,7	2,7	0	2,7	2,9	0,74
20	5,4	5,5	0,4	5,4	5,6	0,74	5,4	5,6	0,74
30	8,1	8,4	1,1	8,1	8,2	0,37	8,1	8,3	0,74
40	10,8	11,0	0,7	10,8	10,7	0,37	10,8	10,6	0,74
50	13,5	13,8	1,1	13,5	13,8	1,11	13,5	13,6	0,37
60	16,2	16,5	1,1	16,2	16,3	0,37	16,2	16,6	1,48
70	18,9	19,0	0,4	18,9	18,7	0,74	18,9	19,5	2,22
80	21,6	22,0	1,5	21,6	22	1,48	21,6	22,2	2,22
90	24,3	24,8	1,9	24,3	24,6	1,11	24,3	25	2,59
100	27	27,1	0,4	27	27	0	27	26,5	1,85

Выше приведена таблица с измерениями фактического напряжения и заданного напряжения. Для каждого измерения рассчитана погрешность. Как видно из таблицы, наибольшая погрешность составила 2,6 %, что полностью удовлетворяет требованиям ТЗ.

Таблица 2 – Результат работы стабилизатора тока

Коэффициент заполнения, %	Ток		
	I <sub>зад</sub> , А	I <sub>р</sub> , А	δ, %
10	0,3	0,31	0,3
20	0,6	0,6	0
30	0,9	0,94	1,3
40	1,2	1,25	1,7

Продолжение таблицы 2 – Результат работы стабилизатора тока

Коэффициент заполнения, %	Ток		
	$I_{\text{зад}}, \text{A}$	$I_{\text{р}}, \text{A}$	$I_{\text{зад}}, \text{A}$
50	1,5	1,56	2,0
60	1,8	1,82	0,7
70	2,1	2,1	0,3
80	2,4	2,43	1,0
90	2,7	2,74	1,3
100	3	3,05	1,7

Также выше приведена таблица с измерениями фактического тока и заданного тока. Для каждого измерения рассчитана погрешность. Как видно из таблицы, наибольшая погрешность по току составила 2 %, что также удовлетворяет требованиям ТЗ.

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ  
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8Е91	Садиков Роман Евгеньевич

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.06 Мехатроника и робототехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Среднерыночные цены РФ для определения стоимости материальных ресурсов. Нормативные документы НИ ТПУ, ФЗ «О минимальном размере оплаты труда» для определения оплаты труда исполнителей проекта.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	коэффициент накладных расходов – 0,16 коэффициент дополнительной заработной платы – 0,15. районный коэффициент – 1,3 (для Томска); коэффициент доплат и надбавок – 0,2.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления в социальные внебюджетные фонды 30 %.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценить потенциальных потребителей исследования, проанализировать конкурентных решений, представить SWOT – анализ. Предложить возможные альтернативы проведения НИ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Представить план этапов работ, определить трудоёмкость и построить календарный график, сформировать бюджет НИ.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определить интегральные показатели финансовой эффективности, ресурсоэффективности разработки. Рассчитать сравнительную эффективность проекта.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений. 2. Матрица SWOT-анализа 3. Морфологическая матрица 4. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей 5. Временные показатели проведения НИ 6. Бюджет НИ 7. Оценка характеристик вариантов исполнения 8. Сравнительная эффективность разработки.
--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>10.04.2023</b>
---	-------------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент ОСГН, ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	К.Э.Н.		10.04.2023

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8Е91	Садиков Роман Евгеньевич		10.04.2023

## **6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

В процессе разработки предполагается создание лабораторного блока питания (ЛБП) с двумя режимами регулирования: тока и напряжения. ЛБП представляет собой автономный источник вторичного электропитания, предназначенный для питания стабильным напряжением различных макетируемых устройств.

#### **6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Данный вид устройств имеется на любом предприятии, которое занимается разработкой, изготовлением или ремонтом и/или ремонтом радиоэлектронной аппаратуры. Используют их во время проверки и/или калибровки различных приборов. Кроме того, они необходимы в тех случаях, когда нужно с высокой точностью подать питающее напряжение и ток на радиотехническое устройство. Как правило, лабораторные блоки питания оснащаются всевозможными устройствами защиты (перегрузка, защита от короткого замыкания и пр.) и органами регулировки выходных параметров (напряжение и ток).

С учетом задач, возлагаемых на ЛБП потенциальными потребителями можно считать научно исследовательские институты, работающие в области электротехники, робототехники и радиотехники, компании-производители аналогичной продукции, а также компании-сервисы по ремонту и обслуживанию радио и электротехники.

#### **6.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Рынок ЛБП достаточно обширен, и имеет представителей в любом ценовом сегменте, от бюджетных моделей до устройств премиум класса. Различия в стоимости в основном зависят от набора предлагаемых функций, однако лабораторным блокам питания свойственна такая характеристика как

«Достаточная необходимость». Исходя из данной характеристики, можно выделить показатели, согласно которым предстоит сравнивать аналоги. Для сравнения были выбраны достаточно популярные модели в нижнем ценовом диапазоне. Они имеют достаточно близкие параметры, поэтому их сравнение справедливо.

Таблица 3 – Сравнительный анализ конкурентных решений

Модель	Масса, кг	Цена, руб.	Диапазон регулирования напряжения, В	Диапазон регулирования тока, А	Погрешность регулирования, %
UNI-T UTP3303	11.2	25110	0 ÷ 32	0 ÷ 5	Напряжение: < 0.01 Ток: < 0.1
Korad KA6003p	5	14330	0 ÷ 60	0 ÷ 3	Напряжение: < 0.05 Ток: < 0.1
Разрабатываемое устройство	3	4200	0 ÷ 27	0 ÷ 3	Напряжение: <3 Ток: < 3

### 6.1.3 SWOT – анализ

Таблица 4 – Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) цена;</li> <li>2) гальваническая развязка, соответствующая требованиям техники безопасности;</li> <li>3) удобное и интуитивно понятное управление;</li> <li>4) доступность на рынке всех электронных компонентов для замены.</li> </ol>	<p><b>Слабые стороны проекта:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) наличие тяжелого сетевого трансформатора;</li> <li>2) невозможность работы с чувствительной к электрическим помехам радиоэлектронной аппаратурой.</li> </ol>
--	--	--

## Продолжение таблицы 4 – Матрица SWOT

<p><b>Возможности:</b></p> <p>1) рост потребности производств в отечественных аналогах источников вторичного электропитания;</p> <p>2) усиление научно-технической базы страны</p> <p>Открытие новых материалов, пригодных к использованию в данной отрасли.</p>	<p>1) Применение более совершенных материалов при производстве комплектующих.</p>	<p>1) Применение трансформаторов импульсного типа, что улучшит массогабаритные характеристики;</p> <p>2) Применение фильтров с лучшими характеристиками для уменьшения электрических помех.</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>1) развитие отрасли в мире, что приведет к устареванию проекта;</p> <p>2) рост цен на комплектующие устройства.</p> <p>Запрет на ввоз заграничных комплектующих.</p>	<p>1) Разработка более совершенного ЛБП с иной архитектурой.</p>	<p>1) Отказ от использования сетевых трансформаторов, ввиду их низкой эффективности и высокой стоимости.</p>

## 6.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В данном разделе используется морфологический подход, для определения возможных альтернатив проведения научных исследований. Этот подход основан на систематическом исследовании теоретически возможных вариантов, вытекающих из закономерностей строения объекта исследования. В рамках подхода составлена морфологическая матрица, представленная таблицей 5.

Исполнение 1 – выбранный в ходе разработки вариант электронный схемы. Исполнения 2 и 3 – альтернативные варианты.

Таблица 5 – Морфологическая матрица схемы лабораторного блока питания

Исполнение	1	2	3
Расположение силового транзистора	Вверху	Внизу	Вверху

Продолжение таблицы 5 – Морфологическая матрица схемы лабораторного блока питания

<b>Исполнение</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Силовой транзистор	P-канальный IRF9Z24N	N-канальный IRFZ24N	N-канальный IRFZ24N
Драйвер силового транзистора	Вспомогательный MOSFET + резистивный делитель	Комплементарная пара KT817B и KT816B	IR2110
Обратная связь по току	Шунт + усилитель lm358	Датчик тока на эффекте Холла ACS712	Шунт + усилитель lm358
Обратная связь по напряжению	Резистивный делитель	Резистивный делитель + усилитель lm358	Резистивный делитель

### 6.3 Планирование научно-исследовательских работ

Составим перечень этапов и работ в рамках проведения разработки и проведем распределение исполнителей по видам работ. Разработку выполняли научный руководитель и студент.

Таблица 6 – Перечень этапов, работ и распределение обязанностей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Утверждение темы бакалаврской работы	Научный руководитель, студент
Выбор направления исследования	2	Составление плана и разбиение работы на этапы	Научный руководитель, студент
	3	Анализ существующих решений	Студент
	4	Поиск и разбор материалов, связанных с тематикой бакалаврской работы	Студент
Проектирование	5	Разработка принципиальной электрической схемы	Студент
	6	Расчет и подбор необходимых компонентов для силовой части схемы ЛБП	Студент
	7	Расчет и подбор необходимых компонентов для цепи системы управления силовой частью	Студент
	8	Расчет и подбор необходимых компонентов цепей обратной связи и индикации	Студент
	9	Сборка тестового образца	Студент
	10	Проверка работоспособности тестового образца на соответствие заявленным по ТЗ параметрам	Студент
Оформление отчета	11	Подведение итогов с научным руководителем	Научный руководитель, студент
	12	Разбор проекта и проведение расчетов с точки зрения финансовой эффективности и социальной ответственности	Студент
	13	Составление отчета	Студент

Для определения трудоемкости проекта, брались ряд следующих показателей: ожидаемое значение трудоемкости, продолжительность каждой

работы, продолжительной выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях, коэффициент календарности.

Формула расчета ожидаемого значения продолжительности работ  $t_{ож}$ :

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (92)$$

где  $t_{min}$  – минимально возможная трудоемкость  $i$ -той работы, чел.-дни

$t_{max}$  – максимально возможная трудоемкость  $i$ -той работы, чел.-дни

Формула расчета продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (93)$$

где  $t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дни

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел

Формула перевода длительности каждого из этапов работ из рабочих дней в календарные:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (94)$$

где  $k_{кал}$  – коэффициент календарности

Формула коэффициента календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (95)$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году

$T_{вых}$  – количество выходных дней в году

$T_{пр}$  – количество праздничных дней в году

Беря во внимание тот факт, что в производственном календаре 2023 году 365 календарных дней, из которых 118 выходных или праздничных, соответственно,  $k_{кал} = 1.477$ .

Таблица 7 – Временные показатели осуществления разработки

№	Наименование работы	Исполнители работы	Трудоемкость работ, чел-дни			Длительность работ, дни	
			$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	$T_p$	$T_k$
1	Утверждение темы бакалаврской работы	Студент	5	8	6.2	3.1	5
		Научный руководитель	3	6	4.2	2.1	3
2	Составление плана и разбиение работы на этапы	Студент	3	5	3.8	1.9	3
		Научный руководитель	3	5	3.8	1.9	3
3	Анализ существующих решений	Студент	7	15	10.2	10.2	15
4	Поиск и разбор материалов, связанных с тематикой бакалаврской работы	Студент	7	12	9	9	13
5	Разработка принципиальной электрической схемы	Студент	10	15	12	12	18
6	Расчет и подбор необходимых компонентов для силовой части схемы ЛБП	Студент	7	12	9	9	13
7	Расчет и подбор необходимых компонентов для цепи системы управления силовой частью	Студент	7	12	9	9	13
8	Расчет и подбор необходимых компонентов цепей обратной связи и индикации	Студент	7	12	9	9	13
9	Сборка тестового образца	Студент	1	3	1.8	1.8	3
10	Проверка работоспособности тестового образца на соответствие заявленным по ТЗ параметрам	Студент	1	3	1.8	1.8	3
11	Подведение итогов с научным руководителем	Студент	1	3	1.8	0.9	1
		Научный руководитель	1	3	1.8	0.9	1
12	Разбор проекта и проведение расчетов с точки зрения финансовой эффективности и социальной ответственности	Студент	5	7	5.8	5.8	8
13	Составление отчета	Студент	3	4	3.4	3.4	5

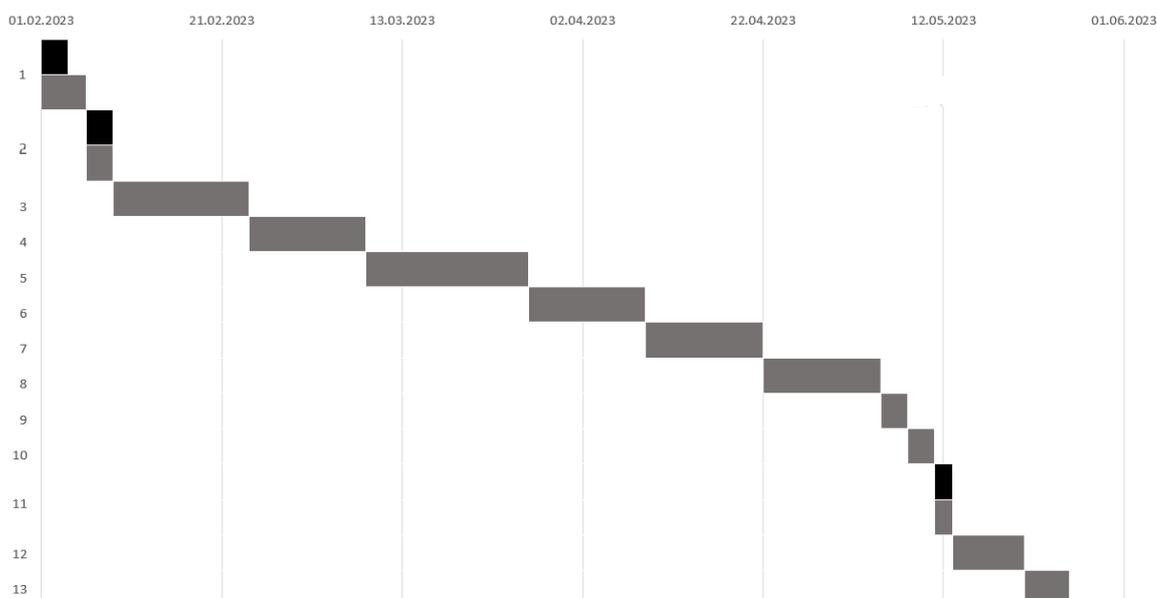


Рисунок 43 – Диаграмма Ганта

## 6.4 Бюджет научно-технического исследования

В состав бюджета входит стоимость всех расходов, необходимых для выполнения работ по проекту. При формировании бюджета используется группировка затрат по следующим статьям:

- 1) материальные затраты
- 2) затраты на специальное оборудование
- 3) основная заработная плата исполнителей
- 4) отчисления во внебюджетные фонды
- 5) накладные расходы.

### 6.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Таблица 8 – Материальные затраты

Наименование	Ед. измерения	Кол-во	Цена за ед.,руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Интернет	Шт/месяц	1	650	650
Электроэнергия	кВт*ч	139	3,16	439,3
Набор электронных компонентов, общий для всех вариантов исполнения	Шт.	1	3500	4200
<b>Итого, руб.</b>				<b>5289,3</b>

### 6.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование

Таблица 9 – Расчёт затрат по статье спецоборудование для научных работ

Наименование	Ед. изм.	Количество			Цена за ед., руб.			Стоимость оборудования и ПО руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
MOSFET IRF9Z24N	Шт.	1	0	0	53	0	0	60,95	0	0
MOSFET IRFZ24N	Шт.	0	1	1	0	98	98	0	112,7	112,7
MOSFET IRLZ24N	Шт.	1	0	0	98	0	0	112,7	0	0
Транзистор NPN КТ817В	Шт.	0	1	0	0	56	0	0	64.4	0
Транзистор PNP КТ816В	Шт.	0	1	0	0	37	0	0	42.55	0
IR2110	Шт.	0	0	1	0	0	410	0	0	471,5
Шунт	Шт.	1	0	1	300	0	300	345	0	345
Усилитель lm358	Шт.	1	1	1	48	48	48	55,2	55,2	55,2
Датчик ACS712	Шт.	0	1	0	0	310	0	0	356,5	0
Ноутбук	Шт.	1	1	1	50000	50000	50000	57500	57500	57500
Итого								58073,85	58131,35	58484,4

### 6.4.3 Расчет затрат на основную заработную плату исполнителей и отчисления во внебюджетные фонды

Основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, которые непосредственно участвуют в проекте и рассчитываются по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} * T_{\text{р}}, \quad (96)$$

где  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднеквадратичная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{М}} * M}{F_{\text{Д}}}, \quad (97)$$

где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течении года

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. Дн

Таблица 10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарные число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	66	118
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	56	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{ТС} \cdot k_p, \quad (98)$$

где  $Z_{ТС}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1.3 (Томск)

Таблица 11 – Основная заработная плата и отчисления в социальные внебюджетные фонды

Исполнитель	$Z_{ТС}$	$k_p$	$Z_M$	$Z_{дн}$	$T_p$	$Z_{осн}$	$Z_{внеб}, руб.$
Руководитель	39300	1,3	51090	2187	7	15306	4591,793
Студент	16242	1,3	21115	985	113	111273	33381,9
Итого						42717	37973,69

#### 6.4.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

После определения всех статей расходов, можно приступить к оформлению общего бюджета затрат проекта. Итоговый бюджет представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Бюджет затрат на НИП

№	Наименование	Сумма, руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Материальные затраты	5289,3	5289,3	5289,3
2	Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	58073,85	58131,35	58484,4
3	Затраты на основную заработную плату	42717	42717	42717
4	Затраты на отчисление во внебюджетные фонды	37973,69	37973,69	37973,69
5	Накладные расходы (16 % от суммы ст. 1-4)	23048.61	23.057.84	23114.3
Итого:		167102.45	167169.154	167578.69

### 6.5 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности разработки.

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования.

Интегральный финансовый показатель можно найти по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (99)$$

где  $\Phi_{pi}$  – стоимость i-го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость научно-исследовательского проекта

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{167102.45}{167578.69} = 0.9971. \quad (100)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{167169.154}{167578.69} = 0.9975. \quad (101)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{167578.69}{167578.69} = 1. \quad (102)$$

Составим оценочную карту для сравнения эффективности. Сравнение будет проводить с двумя наиболее популярными аналогами.

Таблица 13 – Оценочная карта для сравнения эффективности

Объект исследования	Весовой коэффициент	Исп. 1	Исп.2	Исп.3
Время переходных процессов	0.5	5	3	4
Точность измерений	0.3	5	5	5
Стоимость	0.2	5	4	3
Итого:	1			

$$I_{\text{исп1}} = 0.5 \cdot 5 + 0.3 \cdot 5 + 0.2 \cdot 5 = 5. \quad (103)$$

$$I_{\text{исп2}} = 0.5 \cdot 3 + 0.3 \cdot 5 + 0.2 \cdot 4 = 3.8. \quad (104)$$

$$I_{\text{исп3}} = 0.5 \cdot 4 + 0.3 \cdot 5 + 0.2 \cdot 3 = 4.1. \quad (105)$$

Далее рассчитаем интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки по формуле:

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{I_{p\text{-исп1}}}{I_{\text{финр}}}. \quad (106)$$

Проведем расчеты:

$$I_{\text{исп1}} = \frac{I_{p\text{-исп1}}}{I_{\text{финр}}} = \frac{5}{0.9971} = 5.014. \quad (107)$$

$$I_{\text{исп2}} = \frac{I_{p\text{-исп2}}}{I_{\text{финр}}} = \frac{3.8}{0.9975} = 3.809. \quad (108)$$

$$I_{\text{исп3}} = \frac{I_{p\text{-исп3}}}{I_{\text{финр}}} = \frac{4.1}{1} = 4.1. \quad (109)$$

Далее проведем сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки по следующей формуле.

$$\mathcal{E} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}} \quad \mathcal{E} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.3}}}. \quad (110)$$

Таблица 14 – Сводная таблица показателей

№	Критерий	Исп. 1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель	0.9971	0.9975	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5	3.8	4.1
3	Интегральный показатель эффективности	5.014	3.809	4.1
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1.3	1.22

### 6.6 Вывод по главе

Итак, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, эффективности технического исследования, можно сделать вывод о превосходстве текущего проекта над аналогами и его экономической целесообразности. Сравнение значений показателей эффективности показало, что эффективность разработки в первом варианте исполнения выше, чем у исполнения 2 и 3 на 30 % и 22 %.

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
8Е91		Садиков Роман Евгеньевич	
<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	15.03.06 Мехатроника и робототехника: Мобильные робототехнические комплексы и системы

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p>Объект исследования: Лабораторный блок питания с режимами регулирования тока и напряжения.</p> <p>Область применения: Электротехника, робототехника.</p> <p>Рабочая зона: аудитория 101г Корпуса №10 ТПУ.</p> <p>Размер помещения: 5*6 м.</p> <p>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: Осциллограф, ПК, электрический паяльник, мультиметр.</p> <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: Разработка и моделирование работы принципиальной электрической схемы устройства, сборка тестового образца, проверка работы в реальных условиях с целью оценки соответствия заявленным в ТЗ параметрам.</p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>«Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 19.12.2022)</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 21889-76 Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора</p> <p>ГОСТ 22269-76 Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места</p>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> </ul>	<p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения</li> <li>2. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения</li> <li>3. Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума</li> <li>4. Статические физические перегрузки</li> <li>5. Отклонения показателей микроклимата</li> </ol> <p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Поражение электрическим током</li> </ol>

	<p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Средства нормализации воздушной среды рабочего места устройства для кондиционирования воздуха, отопления</li> <li>2. Средства защиты от повышенных или пониженных температур воздуха, температурных перепадов: устройства для обогрева и охлаждения;</li> <li>3. Средства нормализации освещения рабочего места: осветительные приборы, источники света</li> <li>4. Средства защиты от поражения электрическим током: предохранительные устройства, устройства автоматического контроля и сигнализации, устройства автоматического отключения.</li> </ol>
<b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b>	<p><b>Воздействие на селитебную зону:</b> -  <b>Воздействие на литосферу:</b> проблемы с утилизацией вышедших из эксплуатации оборудования рабочей зоны  <b>Воздействие на гидросферу:</b> -  <b>Воздействие на атмосферу:</b> -</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения:</b>	<p>Возможные ЧС:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Антропогенные: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Терроризм</li> </ul> </li> <li>2. Биологические: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Эпидемия</li> </ul> </li> <li>3. Техногенные: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Пожар</li> <li>- Взрыв</li> <li>- Обрушение здания</li> </ul> </li> </ol> <p>Наиболее типичная ЧС:  - Пожар</p>

<b>Дата выдачи задания к разделу в соответствии с календарным учебным графиком</b>	10.04.2023
--	------------

**Задание выдал консультант по разделу «Социальная ответственность»:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Мезенцева Ирина Леонидовна			10.04.2023

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е91	Садиков Роман Евгеньевич		10.04.2023

## **7 Социальная ответственность**

### **7.1 Введение**

Основной задачей данной ВКР является разработка лабораторного блока питания с режимами регулирования тока и напряжения. Радиоэлектронная аппаратура и приборы автоматики предъявляют весьма жесткие требования к качеству потребляемой ими электрической энергии, а в ряде случаев требуют обязательного преобразования энергии первичного источника. Поэтому одновременно с прогрессом в автоматике и радиоэлектронике происходит бурное развитие преобразовательной техники и статических средств вторичного электропитания, которые осуществляют необходимые преобразования электрической энергии. Потенциальными пользователями могут выступать научно исследовательские институты, работающие в области электротехники, робототехники и радиотехники, компании-производители аналогичной продукции, а также компании-сервисы по ремонту и обслуживанию радио и электротехники.

Рабочий процесс происходит в основном в аудитории 101г корпуса №10 Томского политехнического университета с размерами помещения 5\*6 м. На этапе проектирования работа по разработке принципиальной электрической схемы и моделирования её функционирования осуществляется на персональном компьютере. На втором этапе производится создание тестового образца платы, осуществляется лужение и пайка электронных компонентов с помощью электрического паяльника. Заключительным этапом является проверка работоспособности тестового образца с использованием осциллографа и мультиметра. На данном этапе отслеживается поведение образца в условиях работы предусмотренными техническим заданием.

### **7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **7.2.1 Правовые нормы трудового законодательства**

Трудовые отношения между работодателем и работником регулируются с помощью законодательного акта «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 19.12.2022) [13]. В нём регламентируются права и

обязанности работодателя и работника, вопросы организации труда, режим труда и отдыха, оплата и нормирование труда, компенсации работникам, защита персональных данных работника, урегулирование трудовых споров. Ниже приведены несколько наиболее важных положений:

1) нормальная продолжительность рабочего времени не должна превышать 40 часов в неделю;

2) в течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Правилами внутреннего трудового распорядка или трудовым договором может быть предусмотрено, что указанный перерыв может не предоставляться работнику, если установленная для него продолжительность ежедневной работы (смены) не превышает четырех часов (в ред. Федерального закона от 18.06.2017 N 125-ФЗ);

3) всем работникам предоставляются выходные дни (еженедельный непрерывный отдых).

### **7.2.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны**

Разработка принципиальной электрической схемы устройства планируется на персональном компьютере в аудитории. В связи с этим, рабочее место должно соответствовать требованиям безопасности, санитарных норм и эргономики для обеспечения безопасной и комфортной работы.

Рабочее место организуется в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ [14]. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования». Согласно этому документу, площадь на одно рабочее место пользователя с ПК должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup>, высота помещения не менее 4 м, объем – не менее 20 м<sup>3</sup>. ПК и, соответственно, рабочее место должно располагаться так, чтобы свет падал сбоку, лучше слева. Конструкция рабочей мебели должна обеспечивать возможность индивидуальной регулировки соответственно росту пользователя и создавать удобную позу для работы. Окна в помещениях с ПК должны быть оборудованы регулируемыми устройствами –

жалюзи, занавески, внешние козырьки; монитор, клавиатура и корпус компьютера должны находиться прямо перед работником. Высота рабочего стола с клавиатурой должна составлять (680-800) мм над уровнем пола. Высота экрана над полом – (900-1280) мм, монитор должен находиться на расстоянии (600-700) мм от работника на  $20^\circ$  ниже уровня глаз. Положение тела пользователя относительно монитора должно соответствовать направлению просмотра под прямым углом  $90^\circ$  или под углом  $75^\circ$ .

Кресло оператора может быть с профилированными и не профилированными элементами согласно ГОСТ 21889-76 «Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора» [15]. Поверхность сиденья может быть плоской с наклоном  $0-5^\circ$ , или профилированной с углами наклона сиденья. Опорная плоскость сиденья может быть плоской или профилированной с радиусом кривизны поясничной опоры, равным 460 мм, радиусом изгиба для грудного отдела позвоночника, равным 620 мм и другими точками изгиба.

При размещении рабочих мест необходимо исключить возможность прямой засветки экрана источником естественного освещения.

Осциллограф и мультиметр, являющиеся средствами отображения информации, необходимо размещать на рабочем месте согласно ГОСТ 22269-76 [16] «Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места». Требования к расположению данной группы технических средств:

1) средства отображения информации необходимо группировать и располагать группы относительно друг друга в соответствии с последовательностью их использования или с функциональными связями элементов систем, которые они представляют. При этом средства отображения информации необходимо размещать в пределах групп так, чтобы последовательность их использования осуществлялась слева направо или сверху вниз;

2) лицевые поверхности индикаторов следует располагать в оптимальной зоне информационного поля в плоскости, перпендикулярной нормальной линии взора оператора, находящегося в рабочей позе. Допускаемое отклонение от этой

плоскости - не более 45°; допускаемый угол отклонения линии взгляда от нормальной - не более 25° для стрелочных индикаторов и 30° для индикаторов с плоским изображением.

### 7.3 Производственная безопасность

Во время работы над проектом, на человека воздействует ряд вредных и опасных факторов. Они приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте учебной лаборатории ТПУ

Вредные факторы:	Нормативные документы:
1. Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
2. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
3. Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума	ГОСТ 12.1.003-2014. Шум. Общие требования безопасности. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (С изменением №1).
4. Статические физические перегрузки	ТК РФ гл.18 ст. 108. Перерывы для отдыха и питания
5. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания
Опасные факторы:	Нормативные документы:
1. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

#### 7.3.1 Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат – внутренний климат помещения, где проходит работа. Соблюдение требований к микроклимату рабочего помещения позволяет поддерживать на рабочем месте здоровую, благоприятную для организма обстановку.

Микроклимат оказывает существенное воздействие на человека. При повышении температуры воздуха, исследователями доказано, что работоспособность работника снижается. Микроклимат напрямую воздействует на состояние здоровья, а оно предопределяется условиями, в которых работает человек. Если работа происходит в условиях повышенной температуры, то у человека могут возникнуть следующие симптомы: тошнота, покраснение лица, повышение уровня давления, слабость, нарушение координации движений.

Так как работа является малоподвижной и низкоинтенсивной, такой вид деятельности, как работа за ЭВМ или пайка электронных компонентов будет относиться к категории Ia. Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах в помещении регулируется СанПиН 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», пункт 29 [20]. Требования к микроклимату для категории Ia приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Требования к микроклимату помещения

Период года	Температура воздуха, С		Температура поверхностей, С	Относительная влажность воздуха %	Скорость движения воздуха м/с
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			
Холодный	20 – 21,9	24,1 – 25	19 – 26	15 – 75	0,1
Теплый	21 – 22,9	25,1 – 28	20 – 29	15 – 75	0,1

Помещение оснащено системой отопления и кондиционером, ввиду чего параметры микроклимат в рабочем помещении возможно держать в норме.

Соблюдение данных требований позволит поддерживать работоспособность человека, состояние здоровья, а также избежать гипертермию и гипотермию. Следует добавить, что проведение ежедневных влажных уборок в местах постоянной работы ЭВМ будет положительно сказываться на микроклимат.

### 7.3.2 Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума

Производственный шум – совокупность звуков различной интенсивности и частоты, беспорядочно изменяющихся во времени и вызывающих у работников неприятные ощущения.

Одним из источников шума является компьютерное оборудование само по себе. Вентиляторы в системном блоке, жесткие диски, принтеры и другие компоненты могут создавать шум при работе. Если шумное оборудование расположено близко к пользователю, оно может стать раздражающим и отвлекающим. Другим источником шума может быть окружающая среда. Если рабочее место находится рядом с местами с повышенной активностью, такими как принтерные устройства, факс-аппараты, это может привести к значительному уровню шума.

Высокий шум на рабочем месте, помимо того, что вызывает звон в ушах, головокружение, головную боль и повышенную усталость, может негативно сказываться на слух в долгосрочной перспективе. Производственный шум также приводит к ослаблению внимания и снижению реакции.

Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука приведены в таблице 17, на основании пункта 6 свода правил СП 51.13330.2011 [19].

Таблица 17 - Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука

Вид трудовой деятельности	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука дБ А
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Инженер-электротехник	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Шум в аудитории 101г корпуса №10 Томского политехнического университета не превышает установленной нормы, а также не имеет по соседству производственных зданий с высоким уровнем шума, в соответствии с этим, использование индивидуальных средств защиты не требуется.

### **7.3.3 Статические физические перегрузки**

Монотонная работа – постоянное выполнение одинаковых действий на протяжении рабочего дня. Работа за ЭВМ является монотонной, требует высокой концентрации и вызывает утомление. Также, человек, что работает за ЭВМ, совершает умственную работу, что может негативно сказываться на его здоровье, а именно на нервной системе, слухе и психическом здоровье. Чтобы избежать перегрузок рекомендуется менять положение, выполнять физическую активность во время перерывов и соблюдать их.

Необходимость перерыва регламентирована ст. 108, гл. 18 Трудового кодекса РФ [13].

Согласно данному документу в течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Правилами внутреннего трудового распорядка или трудовым договором может быть предусмотрено, что указанный перерыв может не предоставляться работнику, если установленная для него продолжительность ежедневной работы (смены) не превышает четырех часов.

### **7.3.4 Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения**

Нехватка естественного освещения или его полное отсутствие в течение рабочего дня может повлечь болезни психологического характера, невротические расстройства, снизить работоспособность и концентрацию сотрудника.

Источником естественного освещения является солнечный свет, основными причинами его недостатка являются географическое положение здания, а также планировка его внутренних помещений, расположение рабочих

мест. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток. При этом столы следует располагать так, чтобы свет от окон падал на рабочую поверхность стола слева.

Разработка и моделирование принципиальной электрической схемы устройства при работе на ЭВМ, а также пайка и лужение электронных компонентов с использованием паяльника относятся к работам высокой точности (наименьший или эквивалентный объект различения 0,30 – 0,50 мм), разряд Б, подразряд 1, относительная продолжительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность не менее 70 %. Требования к естественному освещению рабочего помещения согласно СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение», представлены в таблице 18 [17].

Таблица 18 – Требования к естественному освещению рабочего помещения

Коэффициент естественной освещенности, %, при	
верхнем или комбинированном освещении	боковом освещении
3,0	1,0

При недостаточной освещенности помещения может помочь расширение оконных проемов и установка качественных источников искусственного освещения.

### **7.3.5 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения**

Недостаточная освещенность рабочей зоны является вредным производственным фактором, приводящим к быстрому утомлению и снижению работоспособности человека на предприятии. При недостаточной освещенности помещения человек быстрее устает, снижается внимание и концентрация. Продолжительная работа в условиях низкой освещенности приводит к ухудшению зрения.

Нормы естественного, искусственного и совместного освещения регламентируются СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [17]. Разработка и моделирование принципиальной электрической

схемы устройства при работе на ЭВМ, а также пайка и лужение электронных компонентов с использованием паяльника относятся к работам высокой точности (наименьший или эквивалентный объект различения 0,30 – 0,50 мм), разряд Б, подразряд 1, относительная продолжительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность не менее 70 %.

В таблице 19 представлены требования к искусственному освещению рабочего помещения.

Таблица 19 – Требования к искусственному освещению рабочего помещения

Искусственное освещение			
Освещенность на рабочей поверхности от системы общего освещения, лк	Цилиндрическая освещенность, лк	Объединенный показатель UGR, не более	Коэффициент пульсации освещенности, Кп, %, не более
300	100	21	15

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения).

Яркий свет в зоне периферийного зрения заметно увеличивает напряжение глаз. Для снижения влияния вредного фактора недостаточной освещенности необходимо, чтобы уровень освещения рабочего пространства приблизительно совпадал с яркостью дисплея. Проблему недостаточной освещенности помещения можно решить при помощи установки дополнительных осветительных приборов.

### 7.3.6 Опасность поражения электрическим током

Работа по проектированию и моделированию принципиальной электрической схемы устройства происходит в непосредственной близости от электрических сетей и приборов, а при пайке и лужении электронных

компонентов работа производится с помощью электрического паяльника, поэтому работник должен с осторожностью обращаться с электропроводкой и компьютером, а также помнить об опасности поражения электрическим током.

Покрытие полов следует делать из однослойного линолеума, что снизит величины зарядов статического электричества. Несмотря на то, что эти величины безопасны для здоровья человека, вычислительная техника подвергается опасности при воздействии зарядов такого рода.

Поражение электрическим током является опасным производственным фактором. Вероятность поражения повышается при:

- 1) повышенной влажности воздуха в помещении (более 75 %);
- 2) высокой температуре воздуха и поверхностей (более 35 °С);
- 3) наличии токопроводящей пыли;
- 4) неверной проектировке рабочего места;
- 5) отсутствии защитных конструкций для проводов;
- 6) наличии посторонних предметов на электроприборах.

Мерами защиты от воздействия электрического тока при неисправности изоляции являются защитное заземление, зануление и использование устройств защитного отключения (УЗО).

#### **7.4 Экологическая безопасность**

Большое количество процессов, операций и материалов, используемых при изготовлении электронных средств, являются источниками огромного количества веществ, имеющих неблагоприятное воздействие на человека и биосферу. При изготовлении элементной базы, электронных изделий, при обработке, выращивании полупроводниковых кристаллов, при изготовлении интегральных схем, в процессе гальванического производства утилизация исходных материалов часто происходит с низким коэффициентом использования, огромное количество их идет в отходы, попадая в атмосферу, гидросферу, загрязняя почву. Таким образом, наряду с истощением природных запасов дефицитных материалов происходит загрязнение окружающей среды,

что ведет к губительным последствиям для отдельных экосистем и биосферы в целом.

На данном рабочем месте выявлен предполагаемый источник загрязнения окружающей среды, а именно воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке предметов вычислительной техники и оргтехники.

Согласно ГОСТ Р 53692—2009, вышедшее из строя ПЭВМ, сопутствующая оргтехника, а также вышедшие из строя отдельные электронные компоненты относятся к IV классу опасности и подлежат специальной утилизации [21].

Первым этапом является утилизация обезвреженных (инертных) отходов. Во время утилизации может быть произведена переработка бракованных или вышедших из употребления видов продукции, изделий, их составных частей и отходов от них путем разборки (разукрупнения), переплавки, использования других технологий с обеспечением рециркуляции (восстановления) органической и неорганической составляющих.

Вторым этапом является безопасное размещение отходов I—IV классов опасности на соответствующих полигонах или уничтожение.

### **7.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Возможные ЧС подразделяются на:

– техногенные:

- 1) пожар;
- 2) взрыв;
- 3) обрушение здания.

– биологические:

- 1) эпидемия.

– антропогенные:

- 1) терроризм.

При работе с вычислительной техникой, а также при пайке и лужении электрическим паяльником наиболее типичной чрезвычайной ситуацией является пожар, так как в современных ЭВМ очень высокая плотность размещения элементов электронных схем, а работа паяльником сопряжена с повышенным нагревом поверхностей. К причинам электрического характера можно отнести короткое замыкание, искрение, статическое электричество. Для предотвращения возникновения пожара необходимо:

- 1) регулярно проводить инструктажи по пожарной безопасности;
- 2) разместить в помещении план эвакуации и плакаты с краткой информацией о действиях, предпринимаемых при возникновении пожара;
- 3) соблюдать правила и нормы при монтаже электрических приборов и электрической проводки;
- 4) оборудовать помещение пожарной сигнализацией, а также средствами тушения пожара;

В случае возникновения пожара каждый сотрудник должен:

- 1) незамедлительно сообщить об этом в пожарную охрану;
- 2) принять меры по эвакуации людей, материальных ценностей согласно плану эвакуации;
- 3) отключить электроэнергию, приступить к тушению пожара первичными средствами пожаротушения.

Возможный пожар на рабочем месте относится к классам А1, А2, Е. Первичные средства пожаротушения являются: огнетушители порошковые переносные с порошками типа АВСЕ, огнетушители углекислотные.

## **7.6 Выводы по главе**

В результате работы по главе «Социальная ответственность» были выявлены основные нормативные акты для обеспечения безопасности жизнедеятельности на рабочем месте, рассмотрены наиболее значимые опасные и вредные факторы, возникающие при проектировании и разработке лабораторного блока питания, описано влияние процесса разработки на окружающую среду и меры, необходимые для уменьшения влияния вредных и

опасных факторов на организм человека и для сокращения негативного влияния процесса разработки программного обеспечения на окружающую среду. Согласно пункту 1.1.13 ПУЭ-7 рабочая зона является помещением без повышенной опасности.

Согласно «Правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок» персонал должен иметь первую группу по электробезопасности.

Согласно «Правилам по охране труда для работников, занятых пайкой и лужением изделий паяльником» персонал должен иметь вторую группу по электробезопасности.

Работа в учебной лаборатории относится к категории тяжести труда Ia – работы выполняются при оптимальных условиях внешней производственной среды и при оптимальной величине физической, умственной и нервно-эмоциональной нагрузки.

Рабочая зона относится к категории В по взрывопожарной и пожарной опасности.

Все необходимые требования и нормы безопасности были соблюдены, нарушений по организации рабочего процесса при выполнении ВКР выявлено не было.

## **Заключение**

По приведенным результатам, цель данной работы, заключающаяся в исследовании и разработке лабораторного блока питания с двумя режимами регулирования: тока и напряжения, была достигнута. Поставленные задачи были выполнены в полном объеме, поскольку устройство, описанное в работе, отвечает всем требованиям, заявленных в техническом задании.

В полной мере изучена конструкция устройства, выполнен расчет номиналов и параметров используемых электронных компонентов. Разработана принципиальная электрическая схема блока питания, а также печатная плата, для размещения требуемых компонентов.

Разработанная программа управления, на базе микроконтроллера Atmega328p обеспечила полноценное управление силовой частью схемы блока питания, а также интуитивно понятную и достоверную индикацию о состоянии выходных параметров.

Проведенные испытания макета устройства в лабораторных условиях показали удовлетворительное качество регулирования и стабилизации выходных параметров.

## Список использованных источников

1. Ромаш Э.М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.
2. Вторичный источник электропитания [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вторичный\\_источник\\_электропитания](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вторичный_источник_электропитания)
3. Источники вторичного электропитания/С.С. Букреев, В.А. Головацкий, Г.Н. Гулякович и др.; Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
4. Моин В.С, Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: Издательство БИНОМ, 2016. – 704 с.
6. Шустов М.А. Основы силовой электроники. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Наука и техника, 2019 – 336 с.
7. Штерн М.И. Силовая электроника. Расчеты и схемотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Наука и техника, 2019. – 400 с.
8. Понижающий импульсный стабилизатор напряжения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://power-electronics.info/buck-converter.html#25> – свободный (дата обращения 05.10.2022)
9. Когда трансформатор имеет максимальное значение КПД? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://otransformatore.ru/raznoe/kogda-transformator-imeet-maksimalnoe-znachenie-kpd/> - свободный (дата обращения 12.11.2022)
10. Выбор бутстрепных компонентов для управляющих ИС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/ir/dt98-2.htm> - свободный (дата обращения 02.02.2023)
11. Данилов А. Современные промышленные датчики тока [Текст] / Данилов А. // Современная электроника. – 2004. № 1. С 26 – 35

12. Расчет ширины дорожки печатной платы в зависимости от силы тока [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://radioprogram.ru/calculator/1> - свободный (дата обращения 12.05.2023)

13. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197 – ФЗ (ред. От 19.12.2022)

14. ГОСТ 12.2.032 – 78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

15. ГОСТ 21889 – 76 Система «Человек - машина». Кресло человека оператора.

16. ГОСТ 22269 – 76 Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места.

17. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*.

18. ГОСТ 12.1.003 – 2014 Шум. Общие требования безопасности.

19. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (С изменением №1).

20. СанПиН 1.2.3685 – 21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

21. ГОСТ Р 53692 – 2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов.

22. ГОСТ 12.1.038 – 82 Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

23. Распоряжение правительства РФ от 15 декабря 2012 года №2396-р об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013 – 2025 годы» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/3345/> - свободный (дата обращения 24.05.2023)

24. Анализ рынка электрических статических преобразователей в России в 2016-2020 гг, оценка влияния коронавируса и прогноз на 2021 – 2025 гг

[Электронный ресурс]. Режим доступа:  
[https://businessstat.ru/images/demo/electrical\\_static\\_converters\\_russia\\_demo\\_businessstat.pdf](https://businessstat.ru/images/demo/electrical_static_converters_russia_demo_businessstat.pdf) - свободный (дата обращения 26.05.2023)

**Приложение А**  
**(Обязательное)**  
**Листинг функции setup**

Таблица А.1 – Листинг функции setup()

```
1. void setup() {  
2.   pinMode(A0, INPUT);  
3.   pinMode(A1, INPUT);  
4.   pinMode(A2, INPUT);  
5.   pinMode(A3, INPUT);  
6.   pinMode(10, OUTPUT);  
7.   pinMode(12, OUTPUT);  
8.   pinMode(13, OUTPUT);  
9.   pinMode(2, INPUT_PULLUP);  
10.  pinMode(3, OUTPUT);  
11.  adc_init();  
12.  Timer1.setPeriod(DISP_PERIOD);  
13.  Timer1.enableISR();  
14.  PWM_frequency(3, 31250, FAST_PWM);  
15. }
```

**Приложение Б  
(Обязательное)**

**Листинг инициализации АЦП**

Таблица Б.1 – Листинг функции инициализации АЦП

```
1. void adc_init()
2. {
3.     ADMUX |= (1<<ADLAR);
4.     ADCSRA |= (1 << ADEN);
5.     ADCSRA |= (1 << ADPS0);
6.     ADCSRA |= (1 << ADPS1);
7.     ADCSRA |= (1 << ADPS2);
8. }
```

**Приложение В**  
**(Обязательное)**

**Листинг функции чтения данных с АЦП**

Таблица В.1 – Листинг функции чтения данных с АЦП

```
1.  uint8_t adc_read(uint8_t channel)
2.  {
3.    ADMUX &= 0b11110000;
4.    ADMUX |= channel;
5.    ADCSRA |= (1 << ADSC);
6.    while((ADCSRA&(1<<ADSC)));
7.    return ADCH;
8.  }
```

**Приложение Г  
(Обязательное)**

**Листинг используемых переменных**

Таблица Г.1 – Листинг используемых переменных

```
1.  uint8_t TargetVoltageADC;
2.  float TargetVoltage;
3.  uint8_t ActualVoltageADC;
4.  float ActualVoltage;
5.  uint8_t TargetCurrentADC;
6.  float TargetCurrent;
7.  uint8_t ActualCurrentADC;
8.  float ActualCurrent;
9.  int PWM_Duty;
10. bool flag = false;
11. bool mode_flag = false;
12. const int NUM_READ = 20;
13. #define SCLK_PIN1  4
14. #define RCLK_PIN1  5
15. #define DATA_PIN1 6
16. #define SCLK_PIN2  7
17. #define RCLK_PIN2  8
18. #define DATA_PIN2 9
19. #define DISP_PERIOD 1000
20. Disp595 disp1(DATA_PIN1, SCLK_PIN1, RCLK_PIN1);
21. Disp595 disp2(DATA_PIN2, SCLK_PIN2, RCLK_PIN2);
```

**Приложение Д  
(Обязательное)**

**Листинг основной функции**

Таблица Д.1 – Листинг основной функции

```
1. void loop() {
2.   TargetVoltageADC = adc_read(0);
3.   ActualVoltageADC = adc_read(1);
4.   TargetCurrentADC = adc_read(2);
5.   ActualCurrentADC = adc_read(3);
6.   bool btnState = !digitalRead(2);
7.   if (btnState && !flag) {
8.     flag = true;
9.     if(mode_flag == false) {
10.      mode_flag = true;
11.    }
12.    else {
13.      mode_flag = false;
14.    }
15.  }
16.  if (!btnState && flag) {
17.    flag = false;
18.  }
19.  if (mode_flag){
20.    Voltage_control();
21.    digitalWrite(12, HIGH);
22.    digitalWrite(13, LOW);
23.  }
24.  else {
25.    Current_control();
26.    digitalWrite(13, HIGH);
27.    digitalWrite(12, LOW);
28.  }
29. }
```

**Приложение Е**  
**(Обязательное)**

**Листинг функций индикации**

Таблица Е.1 – Листинг функций фильтров бегущего среднего

```
1. float runMiddleArifmVoltage(float newVal) {
2.     static byte idx = 0;
3.     static float valArray[NUM_READ];
4.     valArray[idx] = newVal;
5.     if (++idx >= NUM_READ) idx = 0;
6.     float average = 0;
7.     for (int i = 0; i < NUM_READ; i++) {
8.         average += valArray[i];
9.     }
10.    return (float)average / NUM_READ;
11. }
12. float runMiddleArifmCurrent(float newVal) {
13.     static byte idx = 0;
14.     static float valArray[NUM_READ];
15.     valArray[idx] = newVal;
16.     if (++idx >= NUM_READ) idx = 0;
17.     float average = 0;
18.     for (int i = 0; i < NUM_READ; i++) {
19.         average += valArray[i];
20.     }
21.    return (float)average / NUM_READ;
22. }
```

Таблица Е.2 – Листинг функции прерывания таймера

```
1. ISR(TIMER1_A) {
2.     disp1.tickManual();
3.     disp2.tickManual();
4. }
```

**Приложение Ж  
(Обязательное)**

**Листинг функций стабилизаторов**

Таблица Ж.1 – Листинг функции стабилизации напряжения

```
1. void Voltage_control()
2. {
3.     ActualCurrent = (ActualCurrentADC*5.0)/256;
4.     if (ActualCurrent > 2.8) digitalWrite(10, HIGH);
5.     else digitalWrite(10, LOW);
6.     if (ActualCurrent > 3.2)
7.     {
8.         mode_flag = false;
9.         return;
10.    }
11.    else
12.    {
13.        TargetVoltage = (TargetVoltageADC*27.0)/256;
14.        ActualVoltage = (ActualVoltageADC*40.0)/256;
15.        if(((TargetVoltage - ActualVoltage) > 0) & (PWM_Duty < 220))
16.        {
17.            PWM_Duty++;
18.        }
19.        else if(((ActualVoltage - TargetVoltage) > 0) & (PWM_Duty >= 6 ))
20.        {
21.            PWM_Duty--;
22.        }
23.        disp1.displayFloatAuto(runMiddleArifmVoltage(ActualVoltage));
24.        disp2.displayFloatAuto(runMiddleArifmCurrent(ActualCurrent));
25.        PWM_set(3, PWM_Duty);
26.    }
27. }
```

Таблица Ж.2 – Листинг функции стабилизации тока

```
1. void Current_control()
2. {
3.     TargetCurrent = (TargetCurrentADC*3.0)/256;
4.     ActualCurrent = (ActualCurrentADC*5.0)/256;
5.     ActualVoltage = (ActualVoltageADC*40.0)/256;
6.     if(((TargetCurrent - ActualCurrent) > 0) & (PWM_Duty < 185))
7.     {
8.         PWM_Duty++;
9.     }
10.    else if(((ActualCurrent - TargetCurrent) > 0) & (PWM_Duty >= 6))
11.    {
12.        PWM_Duty--;
13.    }
14.    disp1.displayFloatAuto(runMiddleArifmVoltage(ActualVoltage));
15.    disp2.displayFloatAuto(runMiddleArifmCurrent(ActualCurrent));
16.    PWM_set(3, PWM_Duty);
17. }
```

**Приложение 3  
(Обязательное)  
Нагрузочные характеристики**

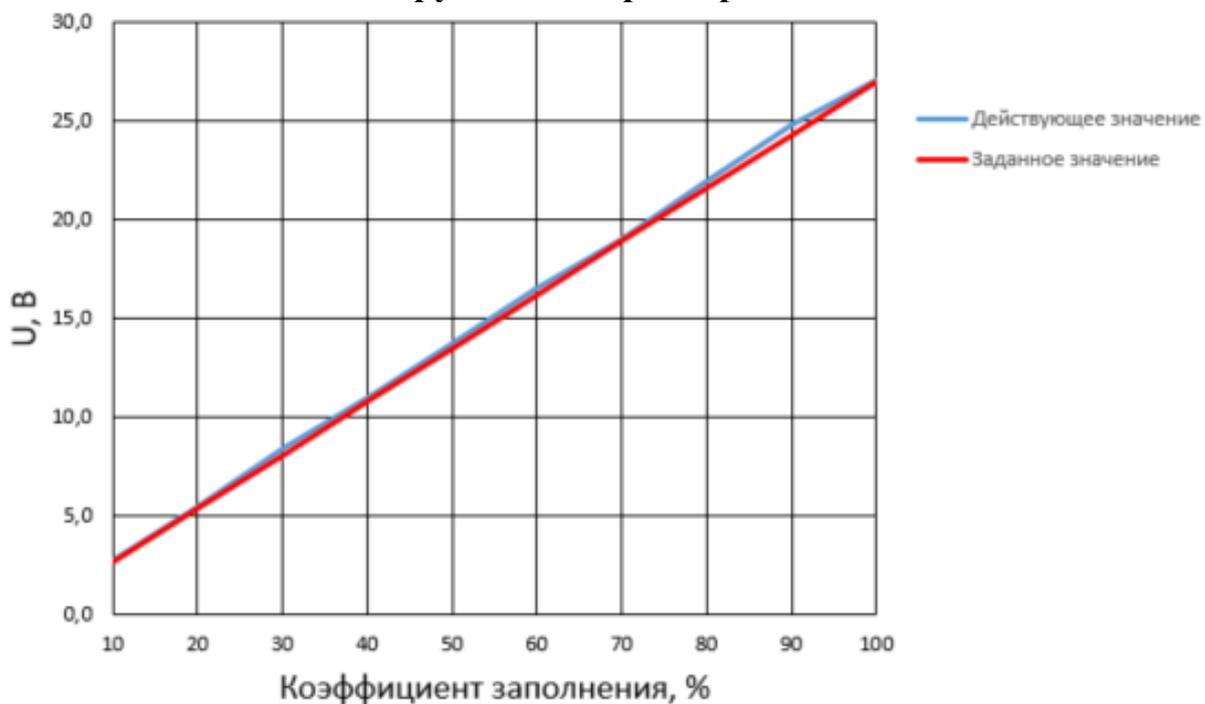


Рисунок 3.1 – Нагрузочная характеристика напряжения от коэффициента заполнения при токе 1 А

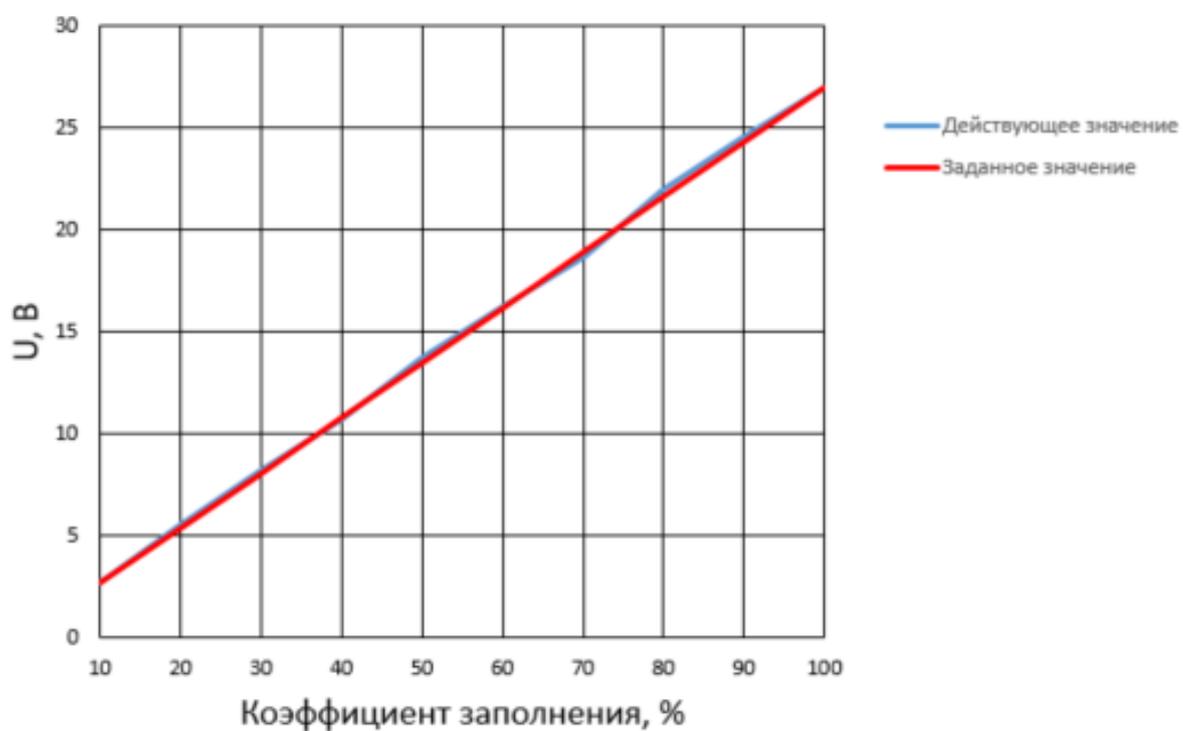


Рисунок 3.2 – Нагрузочная характеристика напряжения от коэффициента заполнения при токе 2 А

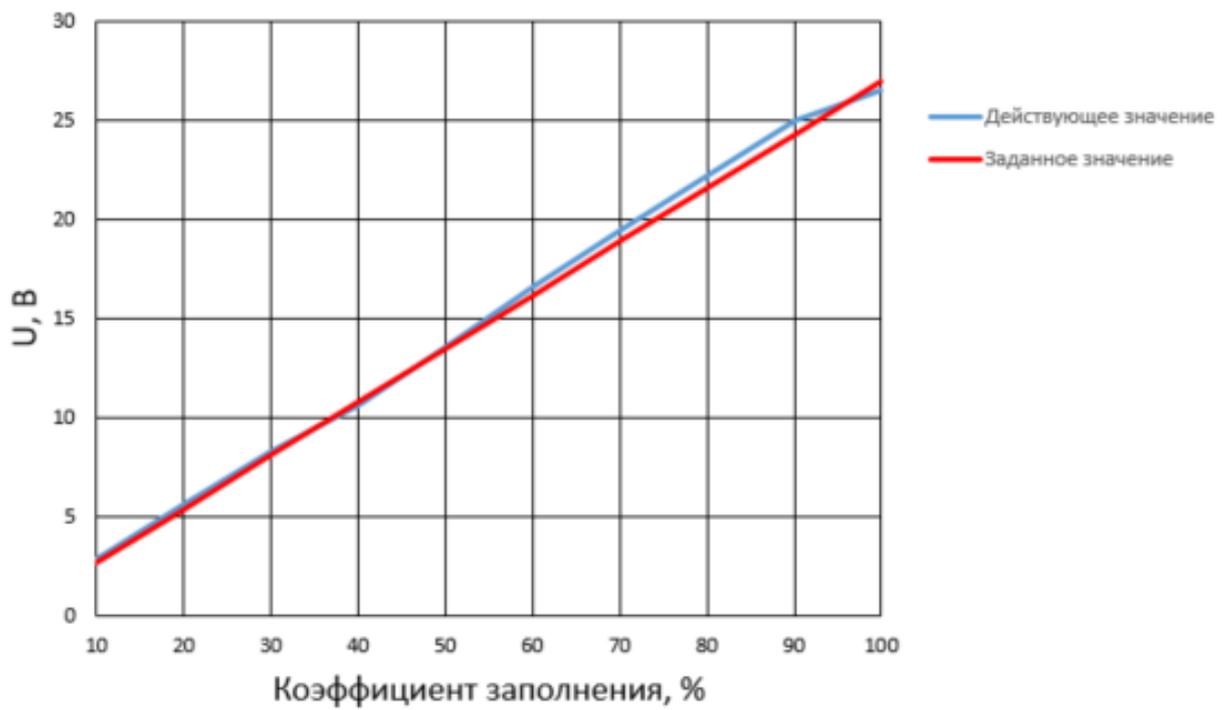


Рисунок 3.3– Нагрузочная характеристика напряжения от коэффициента заполнения при токе 3 А

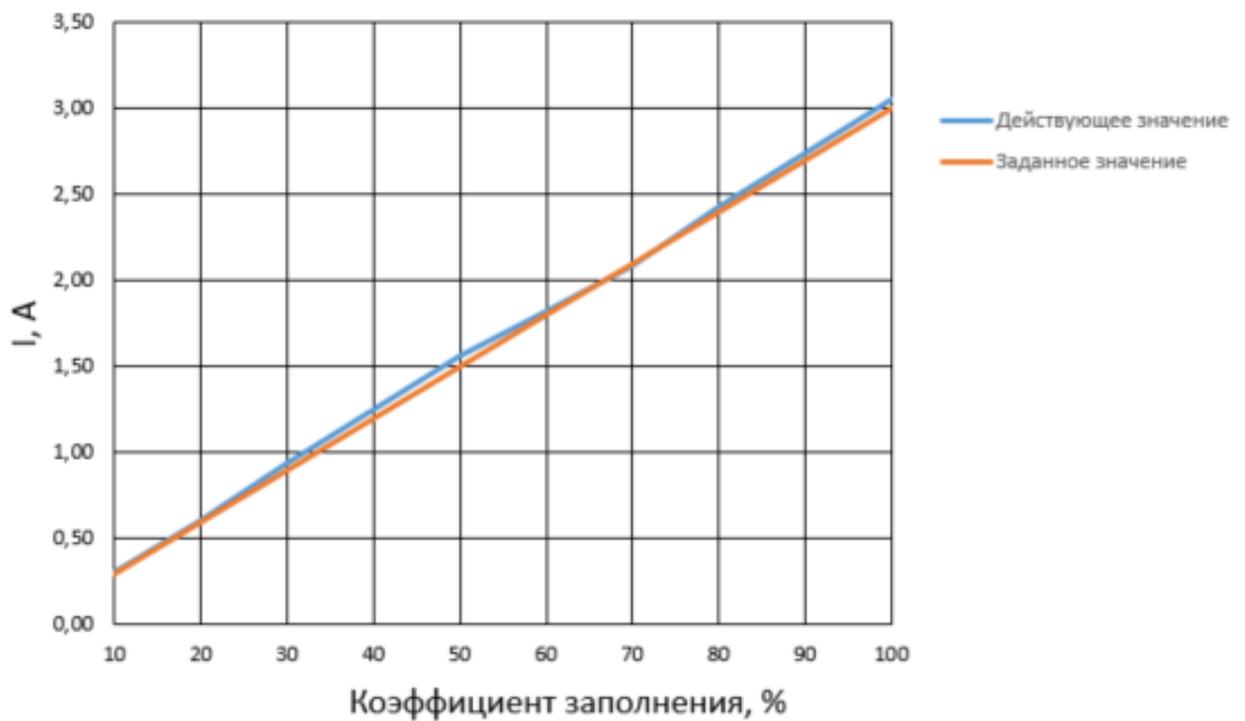


Рисунок 3.4 – Нагрузочная характеристика тока от коэффициента заполнения

**Приложение И  
(Обязательное)**

**Отклонение регулируемых величин от заданных**

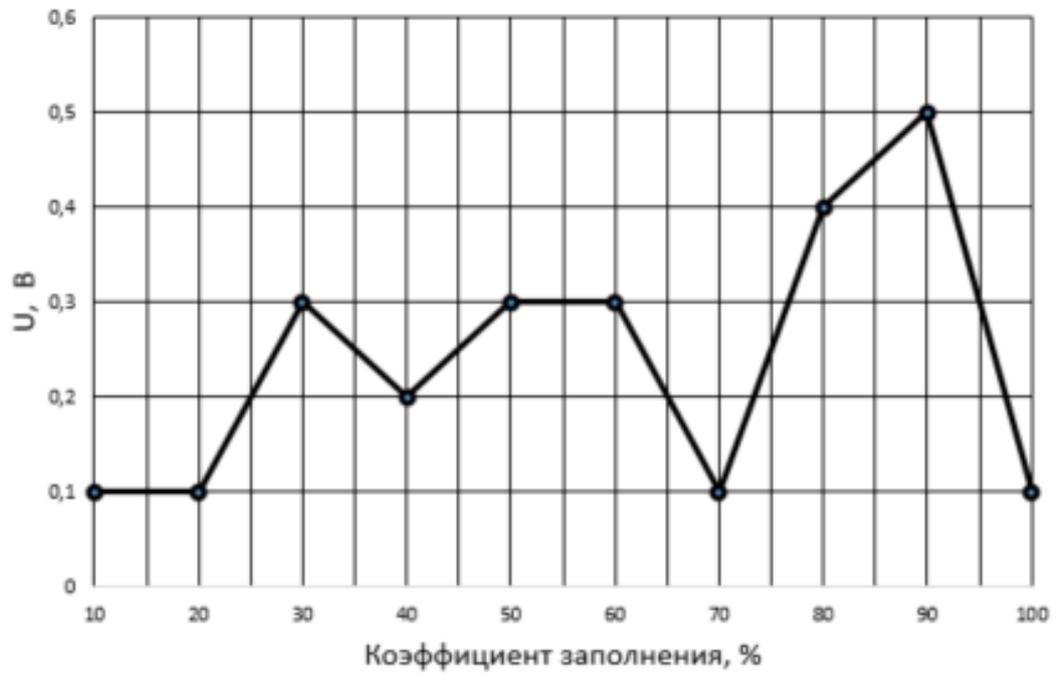


Рисунок И.1 – Отклонение значений напряжения от заданного при токе 1 А

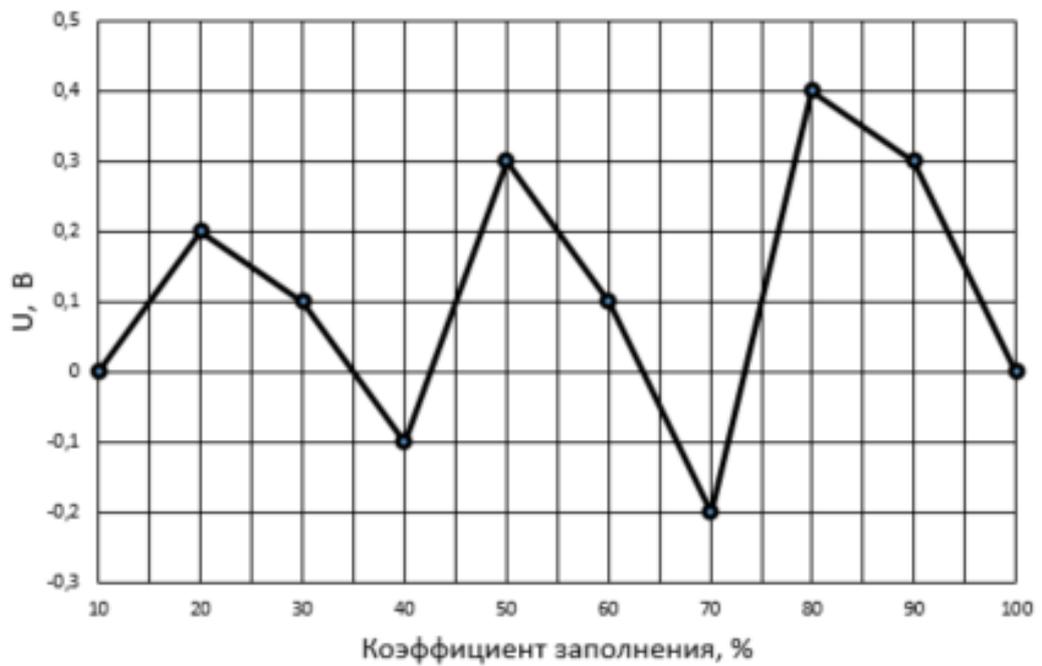


Рисунок И.2 – Отклонение значений напряжения от заданного при токе 2 А

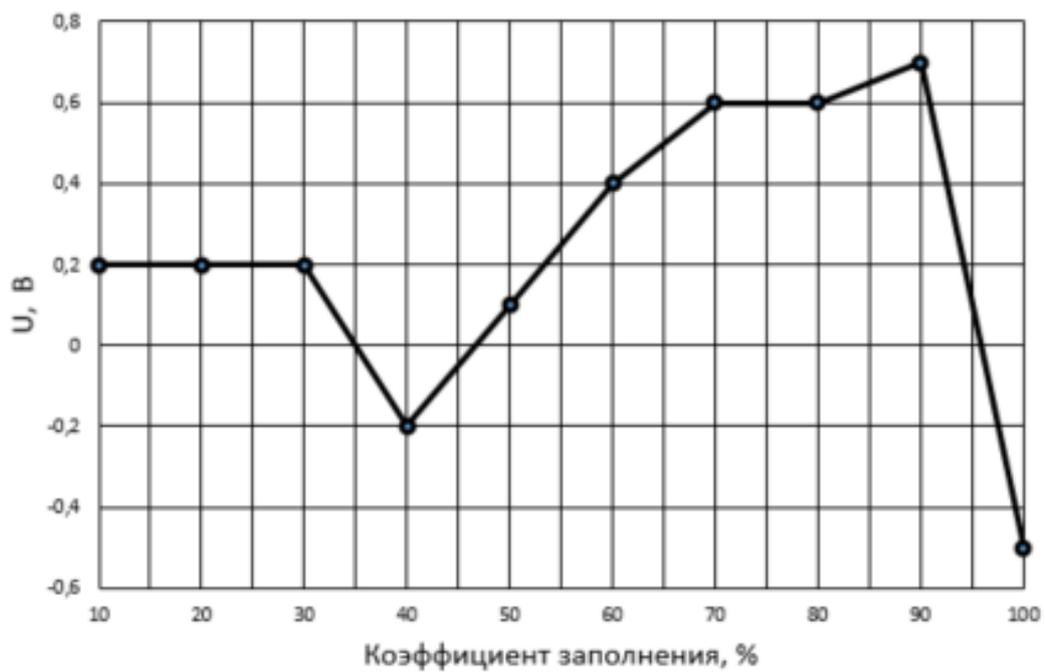


Рисунок И.3 – Отклонение значений напряжения от заданного при токе 3 А

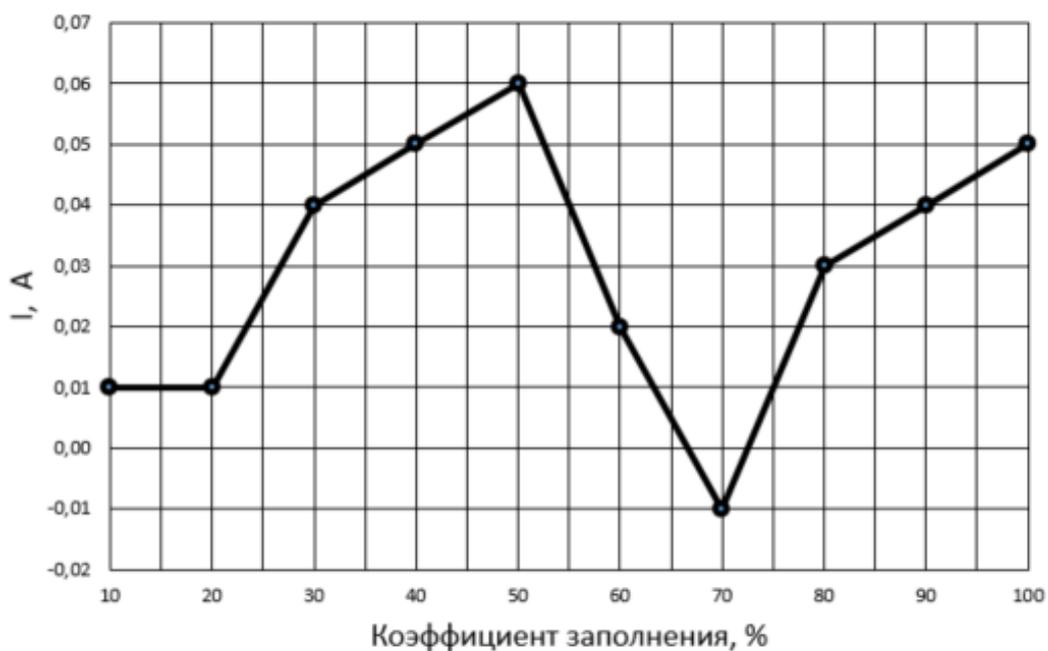


Рисунок И.4 – Отклонение значений тока от заданного

**Приложение К**  
**(Обязательное)**  
**Спецификация к принципиальной электрической схеме**

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	<i>Конденсаторы</i>		
C1	ЕСАР К50-35-10000 мкФ	1	
C2	ЕСАР К50-35-1000 мкФ	1	
C3	К50-17Б-0,1 мкФ	1	
	<i>Резисторы</i>		
R1	CF-25 (C1-4) – 1 кОм	1	
R2, R3	CF-25 (C1-4) – 5 Ом	2	
R4	CF-50 (C1-4) – 47 Ом	1	
R5	KNP-200 – 100 Ом	1	
R6	SQP-5 – 300 Ом	1	
R7	SMD 2512 – 0,1 Ом	1	
R8	CF-25 (C1-4) – 1,2 кОм	1	
R9	СП5-2ВБ – 10 кОм	1	
R10	CF-25 (C1-4) – 200 Ом	1	
R11, R13	CF-25 (C1-4) – 1 кОм	2	
R12, R14	CF-25 (C1-4) – 10 кОм	2	
R15, R16	CF-25 (C1-4) – 300 Ом	3	
R17			
R18	CF-25 (C1-4) – 1 кОм	1	
R19, R20	16К1-10С10К – 10 кОм	2	
	<i>Кнопки</i>		
SW1	Выключатель клавишный 36-2110	1	
SW2	Кнопка тактовая КАН1211-1201В	1	

<b>ФЮРА.436234.001 ПЭЗ</b>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Садиков Р.Е.		
Пров.		Тутов ИА.		
Н.контр.				
Утв.				
<b>Лабораторный блок питания</b>			Лит.	Лист
<b>Перечень элементов</b>				1
			Листов 2	
			ТПУИШИТР Группа 8Е91	

