

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование кафедры)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему: «Сетевой блок питания с регулируемым постоянным напряжением»

Обучающийся

А. Н. Кузеванов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, М.В. Позднов

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

Тольятти 2025

Аннотация

Тема выпускной работы — «Сетевой блок питания с регулируемым постоянным напряжением».

Работа представлена пояснительной запиской объемом 80 страниц, содержащей 41 иллюстрацию, одну блок-схему, один чертёж, одну схему и список литературы из 25 позиций.

Основной целью работы является разработка регулируемого и контролируемого источника питания, предназначенного для широкого спектра применений — от бытовых приборов до специализированных лабораторных установок и зарядки аккумуляторов. Устройство позволяет плавно изменять напряжение в диапазоне от 0,1 до 25 вольт и регулировать выходной ток в пределах от 0,1 до 10 ампер с функцией стабилизации по току.

Конструкция блока питания основана на схеме, включающей сетевой понижающий трансформатор, диодный мост-выпрямитель, импульсный понижающий преобразователь и управляющий микроконтроллер. В ходе исследования были изучены существующие коммерческие решения, что позволило определить наиболее перспективное техническое решение для дальнейшей реализации.

Содержание

Введение.....	4
1. Состояние вопроса.....	6
1.1. Анализ рынка и существующих решений.....	6
1.2. Анализ схематических решений стабилизаторов источников питания.....	13
1.3 Анализ способов регулирования выходного тока и напряжения с применением микроконтроллера.....	29
2. Разработка схемы источника питания на микроконтроллере.....	33
2.1. Разработка и расчет электрической схемы устройства.....	33
2.2. Расчет понижающего импульсного стабилизатора напряжения.....	38
2.3. Выбор силового транзистора.....	54
2.4. Выбор индуктивности.....	56
2.5. Расчет выходного конденсатора	57
2.6. Расчет усилителя шунта.....	58
2.7. Расчет и выбор остальных элементов.....	59
3. Выполнение управляющей программы микроконтроллера и разработка программного обеспечения для компьютера.....	63
3.1. Разработка управляющей программы.....	63
4. Разработка печатной платы.....	73
5. Разработка и моделирование корпуса устройства.....	74
Заключение.....	80
Список используемой литературы.....	82

Введение

Развитие микроэлектроники и её широкое распространение в разных сферах деятельности подняли вопрос о необходимости универсальных источников питания. Такие источники обязаны не только обеспечивать стабильную и экранированную подачу электроэнергии, но и сохранять высокий уровень КПД при различной нагрузке. Источники поставляют харчування и управляют параметрами выходного сигнала, которая поддерживает работу сложных электроциркуляционных систем с активными и пассивными элементами, обеспечивая стабильное взаимодействие между их составляющими.

Питание может обеспечиваться либо от бытовой сети переменного тока напряжением 220 В, либо от независимых источников, таких как батареи. Если основным источником служит сеть переменного тока, вторичные источники питания выполняют ряд функций:

- Преобразуют сетевое напряжение до необходимого уровня, соответствующего параметрам подключенных устройств.
- При необходимости преобразуют переменное напряжение в постоянное.
- Поддерживают стабильность выходного напряжения независимо от изменений входного напряжения и потребления тока нагрузкой.
- Фильтруют высокочастотные помехи, возникающие в сети, а иногда защищают саму сеть от возможных электромагнитных воздействий самого источника питания.

Для снижения сетевого напряжения до нужного значения используются два типа трансформаторов: традиционные линейные трансформаторы, не нуждающиеся в дополнительных компонентах, и импульсные трансформаторы, применяемые в составе импульсных блоков питания.

В условиях прогресса в области недорогих и мощных транзисторов и интегральных схем активно происходила замена привычных линейных блоков питания на импульсные источники питания – устройства, отличающиеся высоким

коэффициентом полезного действия, компактными размерами и низкой массой. Степень чувствительности их конструкции к колебаниям входного напряжения заметно ниже, что способствует высокому уровню стабильности выходных характеристик.

Особенно заметна разница между этими двумя видами источников питания при создании моделей высокой мощности. Здесь импульсные схемы демонстрируют значительное превосходство над линейными источниками именно за счёт своей конструкции: здесь применяется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяющий управлять мощностью путем изменения длительности управляющих сигналов. Благодаря этому силовые элементы работают в переключаемом состоянии («включено/выключено»), что снижает энергопотери и повышает общую энергоэффективность системы.

Таким образом, снижаются эксплуатационные расходы на электричество, уменьшается нагрев ключевых элементов схемы, исключается необходимость установки громоздких радиаторов и вентиляторов активного охлаждения. Всё это способствует повышению надежности и долговечности изделия.

Использование микропроцессора в управлении такими устройствами открывает новые возможности для разработки гибкого универсального источника питания. Можно запрограммировать дополнительные функции, такие как сохранение заданных настроек напряжения и тока, автоматическое повторение выбранных режимов работы, быстрое восстановление предыдущих значений.

Исходя из сказанного, становится очевидным, что разработка современного регулируемого источника питания с использованием импульсного стабилизатора напряжения и управления посредством микроконтроллера соответствует актуальным техническим и экономическим тенденциям и имеет большие перспективы практического применения.

1. Состояние вопроса

1.1 Анализ рынка и существующих решений

В настоящий момент существует множество различных регулируемых источников питания, ориентированных на использование микроконтроллеров в системах управления. В рамках следующего обзора будет проведён анализ наиболее популярных моделей, проиллюстрирована объективная стоимость, а также выявлены их основные преимущества и ограниченные возможности.

Для образца возьмём лабораторный БП MAISHENG MS3010D. Аппарат имеет защиту от перенапряжения — при повышении напряжения свыше нормы автоматически понижается выходное напряжение. При малых токах и напряжениях этот прибор демонстрирует диапазон регулировки, а точность измерений отличается высокой степенью — ошибки выходят из-за 0.1% в обоих параметрах.

Внешний вид MAISHENG MS3010D представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – MAISHENG MS3010D

Источник питания MAISHENG MS3010D предназначен для обеспечения стабилизированного выходного напряжения с максимальным значением 30 В. Отмечается, что данный прибор соответствует высокоточным требованиям: основным эксплуатационным параметрам, таким как погрешность по напряжению и току, не свойственны отклонения, превосходящие 0,1%; при этом пульсации выходного сигнала фиксируются на минимальном уровне, не превышающем 5 мВ.

Несмотря на все заявленные достоинства, следует выделить целый ряд уязвимых мест данной модели: Первое - плохое качество контента. Сверстать красиво в ровненькую табличку и график не значит доставить глубокий инсайт. Второе - собственная точка зрения, или контекст, у модели отсутствует, а яркий пример — неудачная проработка региональной специфики. Третье - наивысшая профессиональная компетенция и глубокое знание предмета — это база, на основе которой может быть сформулировано уникальное решение. Четвертое - в работе с данными для заключений по конкретному клиенту решили не выкладываться — использовать большие объемы данных — решение не принято или не реализуется. И, наконец, в работе со сложной современной российской экономикой модель не предусмотрена (в силу сложносочинённости продукта).

Погрешность, достигающая 0.1%, хоть и кажется незначительной, в условиях задач, требующих предельной точности, становится существенной. Параметр качества элементной базы, составляющий собой низкий уровень, способен негативно воздействовать на надежность и долговечность приборов. Учитывая рыночную цену в 10000 рублей, блок питания MAISHENG MS3010D, несмотря на высокую стоимость, не представляет собой наиболее оптимальное предложение на рынке, учитывая вышеупомянутые ограничения. Аналогичная продукция с улучшенной элементной базой и большей точностью способна стать более целесообразным решением в указанных рамках бюджета.

Линейный блок питания ELEMENT 305DB, выпущенный в России, представляет собой стабильный источник постоянного тока с регулируемыми параметрами напряжения и тока. Такой блок питания становится ценным инструментом в условиях лабораторий и мастерских, а также при конструировании и тестировании электронных схем.

Ключевые особенности ELEMENT 305DB:

- Широкие возможности настройки. Есть возможность отрегулировать выходное напряжение вплоть до 30 В и выходной ток до 5 А, что открывает широкий спектр применения блока питания с разнообразными устройствами.
- Продуманная система безопасности. Блок питания оборудован комплексной защитой, включающей предохранители от перенапряжения, ограничители тока и защиту от перегрева. Это обеспечивает надежную защиту самой аппаратуры и подключенных приборов.
- Высокая точность отображения. Встроенный LED-дисплей с четкой 4-значной шкалой информирует пользователя о текущем напряжении и токе с максимальной информативностью.
- Разнообразие интерфейсов подключения. Порты RS-232 и USB способствуют удаленному управлению и контролю параметров блока питания, а также обеспечивают совместимость с комплексными автоматизированными системами.

На рисунке 2 представлено изображение внешнего вида модели ELEMENT 305DB.



Рисунок 2 – Внешний вид ELEMENT 305DB

Сравнивая устройство с его предшественником, можно констатировать ряд значимых изменений. Главным образом, уменьшение стоимости до 6000 рублей является ключевым фактором, изменившим восприятие продукта. Менее заметно, но согласно указанным сведениям, разработчики расширили набор программных функций, что положительно отразилось на удобстве применения. Касательно технических характеристик, отмечается увеличение массы до 5,5 кг и одновременное снижение потребляемой мощности, что создало субъективно противоположный эффект в восприятии устройства. Вместе с тем, улучшения в цене и функциональной насыщенности способствуют формированию положительного образа, особенно в контексте широкого спектра приложений.

OWON SPE6102 OW111, являясь универсальным прибором, работает в режимах стабилизации тока и напряжения, что позволяет успешно выполнять широкий спектр задач. Источник питания выдает выходное напряжение от 0 до 60 В и ток от 0 до 10 А с разрешением 10 мВ и 1 мА соответственно.

Максимальная мощность достигает 300 Вт. Преимуществом данного устройства является стабильность выходного сигнала с низким уровнем пульсаций и шума, что обеспечивает точность и надежность лабораторных экспериментов.

Экран обратной полярности с диагональю 7,1 см предоставляет полную информацию о параметрах работы, среди которых режимы работы, установленные и реальные значения ампеража тока и напряжения, выходная мощность, время функционирования и параметры ограничений.

Особенностью устройства стало наличие встроенной памяти, способной хранить четыре пользовательских сигнала, каждый из них — с возможностью редактирования до десяти точек. В данных точках редактируют ампераж, напряжение и период работы. Именно возможность конфигурирования таких последовательностей позволяет формировать сложные выходные сигналы).

Встроенные охранные механизмы (включая автоматическое отключение нагрузки, защиту от перенапряжения и перегрузки по току) обеспечивают не только надёжность устройств, но и безопасность сопряжённого оборудования. Продуманная система охлаждения с активной вентиляцией и температурными датчиками позволяет сохранять оптимальные условия работы даже при тяжёлых нагрузках.

Для интеграции в автоматизированные системы предусмотрен USB интерфейс с поддержкой дистанционного управления и программирования по протоколу SCPI. Кроме того, на передней панели расположен USB порт для зарядки устройств с напряжением 5В и током 1А.

OWON SPE6102 OW111 представлен на рисунке 3



Рисунок 3 – Внешний вид OWON SPE6102 OW111

Несмотря на все достоинства, данный источник питания также не лишён определённых недостатков.

Основные недостатки OWON SPE6102 OW111:

- высокая стоимость — порядка 18 000 руб.;
- значительные габариты и масса.

В сравнении с ранее рассмотренными источниками OWON SPE6102 OW111 демонстрирует более широкий функционал, однако его стоимость более чем в два раза превышает цену аналогичных устройств.

На рынке источников питания наблюдается тенденция к высокой цене и преобладанию линейных регуляторов, что часто приводит к большим размерам и

весу устройств. Это создает потребность в более эффективном и доступном решении.

Поэтому целью работы стало создание источника питания, который не только не уступает существующим аналогам по функциональности, но и превосходит их по КПД и цене.

Для достижения этой цели был проведен комплекс работ, включающий:

- Тщательный анализ представленных на рынке моделей.
- Изучение возможностей применения микроконтроллеров для управления источником питания.
- Разработка принципиальной схемы устройства.
- Расчет параметров всех компонентов схемы.
- Подбор оптимальных элементов, соответствующих расчетам.
- Проектирование печатной платы.
- Разработка корпуса устройства.

В результате будет создан регулируемый источник питания, который по своим возможностям не уступает коммерческим аналогам, но при этом будет отличаться более низкой стоимостью, гибкостью настройки выходных параметров и высоким КПД. Кроме того, он будет более удобен в обслуживании и ремонте.

1.2 Анализ схемотехнических решений стабилизаторов источников питания.

После понижения сетевого напряжения посредством трансформатора и преобразования переменного тока в постоянный с помощью диодного моста и фильтрующего конденсатора, полученное напряжение подаётся на блок стабилизации. Этот блок обеспечивает поддержание (стабилизацию) требуемого уровня выходного напряжения и тока блока питания.

В зависимости от способа обеспечения стабильности выходного напряжения классифицируют эти устройства на две основные категории, основываясь на том, как они поддерживают эту стабильность: линейные и импульсные стабилизаторы. Разница между ними кроется в принципах их работы и, как следствие, в их эффективности и областях применения.

Параметрический стабилизатор напряжения — простейший вариант. Простейшая схема стабилизатора (рис. 4) помимо стабилитрона включает в себя гасящий резистор, на котором происходит падение напряжения R_r .

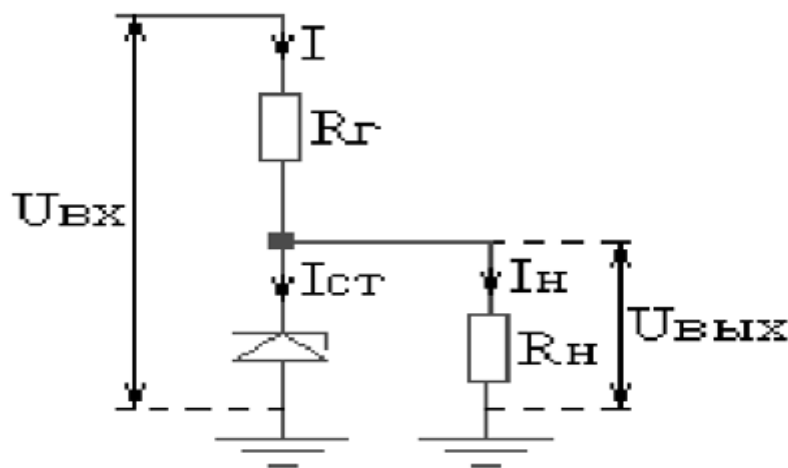


Рис. 4 Параметрический стабилизатор.

Нагрузка R_n подключается параллельно стабилитрону. Напряжение на нагрузке $U_{вых}$ соответствует напряжению на стабилитроне. Резистор R_r

подбирается таким образом, чтобы при любых заданных значениях $R_H, U_{\text{вх}}, I_H$ выполнялось условие: $I_{\text{ст min}} \leq I_{\text{ст}} \leq I_{\text{ст max}}$.

Основное преимущество простейшего линейного стабилизатора заключается в его конструктивной простоте. Однако у такой схемы имеются и значимые недостатки. Первый из них — невысокая стабильность выходного напряжения. Это объясняется тем, что ток через стабилитрон напрямую зависит от тока нагрузки: при увеличении I_H на 1 мА ток стабилитрона $I_{\text{ст}}$ уменьшается на 1 мА, и наоборот. В результате изменяется напряжение стабилизации $U_{\text{вых}}$.

Второй важный недостаток, связанный с первым, — низкий КПД стабилизатора, особенно при малых значениях нагрузки. Этот недостаток становится особенно критичным в тех случаях, когда требуется получить значительный выходной ток. Например, в режиме холостого хода, когда, $I_H = 0$, ток, протекающий через стабилитрон, достигает максимального значения $I_{\text{ст max}}$. Это означает, что даже без нагрузки схема будет потреблять ток, который превышает максимальный ток нагрузки. Поэтому на практике простейшие параметрические стабилизаторы применяются в основном в тех случаях, когда ток нагрузки не превышает нескольких единиц или десятков миллиампер.

Для уменьшения зависимости выходного напряжения от тока нагрузки и повышения КПД стабилизатора, нагрузку подключают к стабилитрону не напрямую, а через усилитель тока (например, транзисторный повторитель напряжения). Простейший вариант такой схемы с использованием NPN-транзистора приведён на рис. 5.

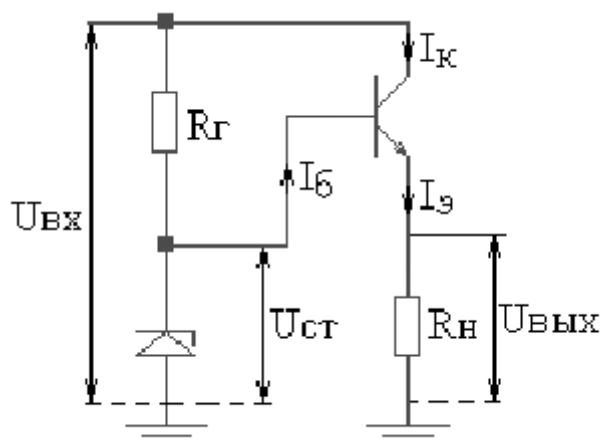


Рис 5 Параметрический стабилизатор с транзистором.

Разность потенциалов между базой $U_{СТ}$ и эмиттером $U_{ВЫХ}$ для открытого кремниевого транзистора составляет приблизительно 0,7 В. Соответственно, на эмиттере транзистора устанавливается напряжение, равное $U_{СТ} - 0,7В$. Ток, протекающий в коллекторной цепи транзистора $I_К$, в $h_{21Э}$ раз превышает базовый ток $I_Б$.

$$I_Э = I_Б + I_К = I_Б + h_{21Э}I_Б = I_Б(1 + h_{21Э}) \quad (1)$$

Благодаря этому несложно обеспечить выполнение условия $I_Б \leq I_{СТ}$, при котором изменение базового тока транзистора оказывает незначительное влияние на ток, протекающий через стабилитрон. Это означает, что при одинаковых значениях тока нагрузки $R_Н$, ток стабилитрона в схеме с транзистором (рис. 5) будет зависеть от нагрузки в меньшей степени, чем в простой схеме (рис. 4), что способствует увеличению коэффициента стабилизации схемы.

Кроме того, использование мощного транзистора с высоким коэффициентом передачи тока $h_{21Э}$ позволяет значительно повысить максимальный допустимый ток нагрузки по сравнению с вариантом простейшего стабилизатора, изображённого на рис. 4.

Реализация линейных стабилизаторов напряжения нередко основана на использовании готовых усилителей постоянного тока, среди которых наиболее популярными являются операционные усилители (ОУ), что видно из рис. 6.

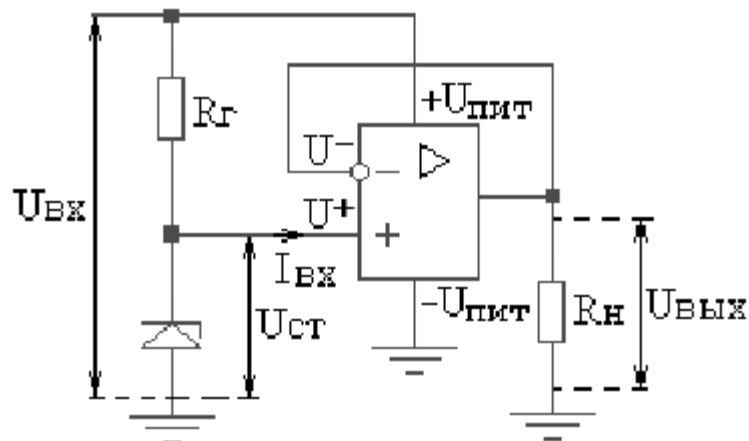


Рис.6 Параметрический стабилизатор на базе ОУ.

Описанные выше разновидности стабилизаторов всё шире производятся в виде интегральных микросхем, сочетающих основной стабилизирующий эффект и ряд дополнительных функций безопасности. В частности, встроенные механизмы защищают от коротких замыканий, чрезмерных нагрузок и перегревов. Активируясь при наступлении таких условий, эти защиты обесточивают устройство, предотвращая поломку стабилизатора и периферии.

Во-вторых, технология предусматривает возможность плавного регулирования выходного напряжения, что облегчает точную адаптацию параметра к требованиям конкретного технического средства. Такой подход оказывается актуальным при необходимости обеспечения нестандартных значений напряжения. В-третьих, предусмотрена возможность дистанционного управления: внешний сигнал запускает или отключает стабилизирующее устройство. Такой функционал оказывается полезным при работе с автоматизированными комплексами или установке аппаратуры в помещениях с ограниченным физическим доступом.

Наконец, он умеет сигнализировать о том, что выходное напряжение находится в пределах нормы. Это позволяет быстро определить, работает ли стабилизатор

правильно, и вовремя заметить возможные проблемы. В общем, это не просто стабилизатор, а умное устройство, которое заботится о безопасности и стабильности вашего электропитания.

На рис. 7 приведены примеры типовых схем подключения микросхем с функцией плавной регулировки выходного напряжения. На схеме используются следующие обозначения выводов:

- VIN, VOUT – входное/выходное напряжение;
- GND – общая точка, «земля»;
- ADJ – регулировка выходного напряжения;
- EN – линия для включения/выключения выходного напряжения;
- PG – Power Good, цепь для индикации нормального значения выходного напряжения.

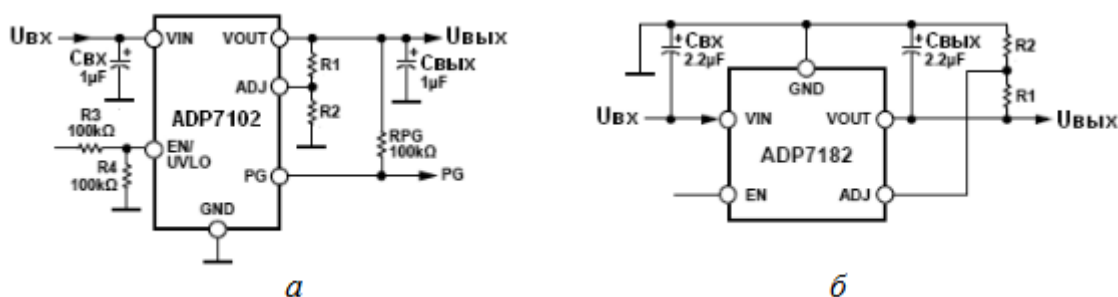


Рис 7. Типовые схемы включения интегральных схем стабилизаторов.

Линейные стабилизаторы обладают рядом достоинств: они недороги, надёжны, просты в применении и универсальны по способам использования. Дополнительно следует отметить, что линейный стабилизатор практически не вносит собственных помех в выходную цепь.

Основной недостаток заключается в сравнительно низком КПД — как правило, он не превышает 50 %. Причём, чем больше разница между входным и выходным напряжением, тем ниже эффективность работы стабилизатора. При питании от сети переменного тока 220 В это ограничение не критично. Однако

при использовании автономных источников энергии важно снижать мощность, рассеиваемую элементами стабилизатора. Для этой цели предпочтение отдают импульсным стабилизаторам напряжения, КПД которых может достигать 85 %.

Помимо высокой эффективности, импульсные преобразователи напряжения обладают ещё одним важным преимуществом — они способны формировать выходное напряжение как ниже, так и выше входного, либо напряжение противоположной полярности.

Широкое распространение импульсные стабилизаторы и источники питания получили начиная с 1990-х годов. Это стало возможным благодаря созданию мощных высокочастотных высоковольтных полевых транзисторов, оптимизированных для работы в ключевом режиме (полностью открыт или полностью закрыт).

Принцип функционирования импульсных источников питания заключается в следующем: энергия, поступающая от первичного источника, за короткий промежуток времени накапливается в реактивном элементе, после чего постепенно передаётся в нагрузку. В роли накопителя энергии могут использоваться как катушки индуктивности, так и конденсаторы. Наибольшее распространение получили конструкции, использующие индуктивные элементы.

Для процесса накопления энергии в реактивном элементе применяется транзистор, который может быть как полевым, так и биполярным.

Импульсные стабилизаторы напряжения на основе индуктивностей.

Существует несколько видов схем. Повышающая схема представлена на Рис.8.

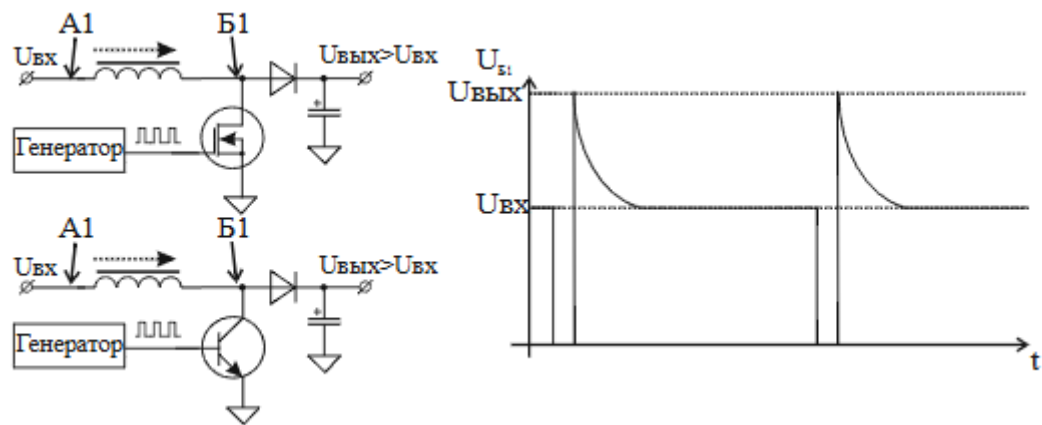


Рис. 8 Схема повышающего импульсного стабилизатора.

На входе этой схемы напряжение выше, чем входное.

Инвертирующая схема представлена на Рис 8.

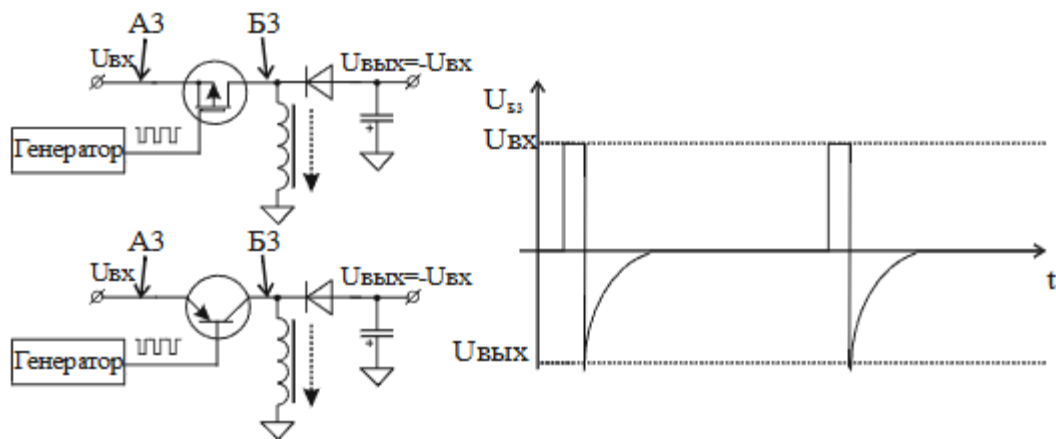


Рис. 9 Схема инвертирующего импульсного стабилизатора.

На выходе этой схемы напряжение имеет обратную полярность.

Понижающая схема представлена на Рис.9

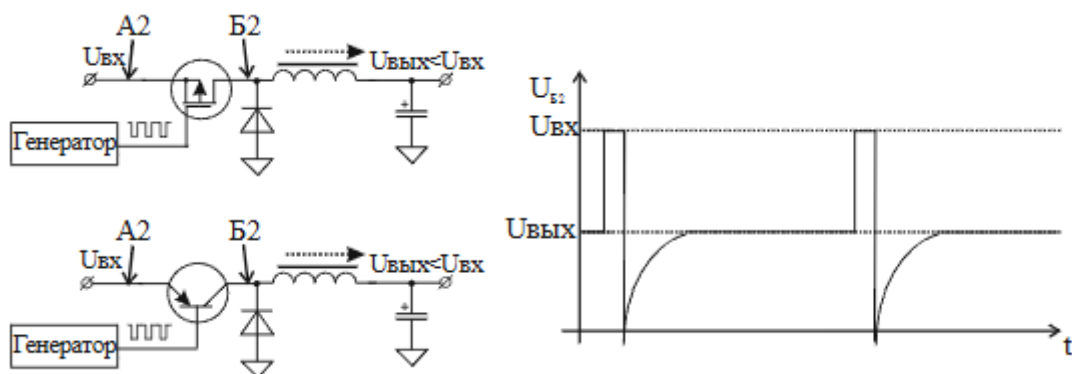


Рис. 10 Схема понижающего импульсного стабилизатора.

Для нашей работы наилучшим образом подходит схема понижающего импульсного стабилизатора. Рассмотрим подробнее принцип её работы. При реализации понижающего импульсного стабилизатора (рис. 10) требуется использовать либо полевой транзистор с р-каналом, либо биполярный р-н-р-транзистор. В момент открытия транзистора напряжение в точке Б2 становится равным напряжению питания. Однако, поскольку ток, протекающий через индуктивность, не может изменяться мгновенно, выходное напряжение при этом изменяется лишь незначительно.

После закрытия транзистора в катушке возникает электродвижущая сила (ЭДС) самоиндукции. При этом выходное напряжение стабилизируется за счёт накопленного заряда на конденсаторе. Под действием ЭДС напряжение на катушке в точке Б2 стремится стать отрицательным. В этот момент диод открывается, и точка Б2 фактически подключается к потенциалу "земли" схемы (0 В). Катушка оказывается соединённой параллельно с конденсатором и передаёт ему накопленную при открытии транзистора энергию $U_{\text{вых}}$

Этапы рабочего цикла стабилизатора

Работа схемы понижающего стабилизатора делится на два чётко выраженных этапа:

- этап потребления энергии продолжительностью t_i
- этап паузы продолжительностью t_p

Каждому из этих этапов соответствует свой рабочий контур:

- контур заряда включает в себя цепь: «источник питания» → «ключевой транзистор» → «дроссель» → «фильтрующий конденсатор» → «нагрузка».

По данному контуру ток протекает в фазе потребления энергии.

- контур разряда образуется цепью: «диод» → «дроссель» → «фильтрующий конденсатор и нагрузка (параллельно)». В этом контуре ток протекает в фазе паузы.

В системах, применяющих импульсный источник тока, нужно устанавливать конденсатор на входе стабилизатора, поскольку он гасит пульсации и повышает надежность функционирования следующих каскадов. Конденсатор на выходе предотвращает колебания выходного напряжения, вызванные изменениями тока в дросселе.

Стабилизатор понижения способен мириться с непрерывной и прерывистой работой, но предпочтение оказывается на стороне непрерывной. Это решение предоставляет множество плюсов: смягчение пиковых токов на ключевом транзисторе, оптимизация параметров регулирования, сокращение ёмкости выходного конденсатора, уменьшение энергозатрат. Вследствие этого, последующий обзор сосредоточится исключительно на характеристиках стабилизатора, функционирующего в непрерывном режиме.

Временные диаграммы, отражающие работу стабилизатора, приведены на рисунке 11.

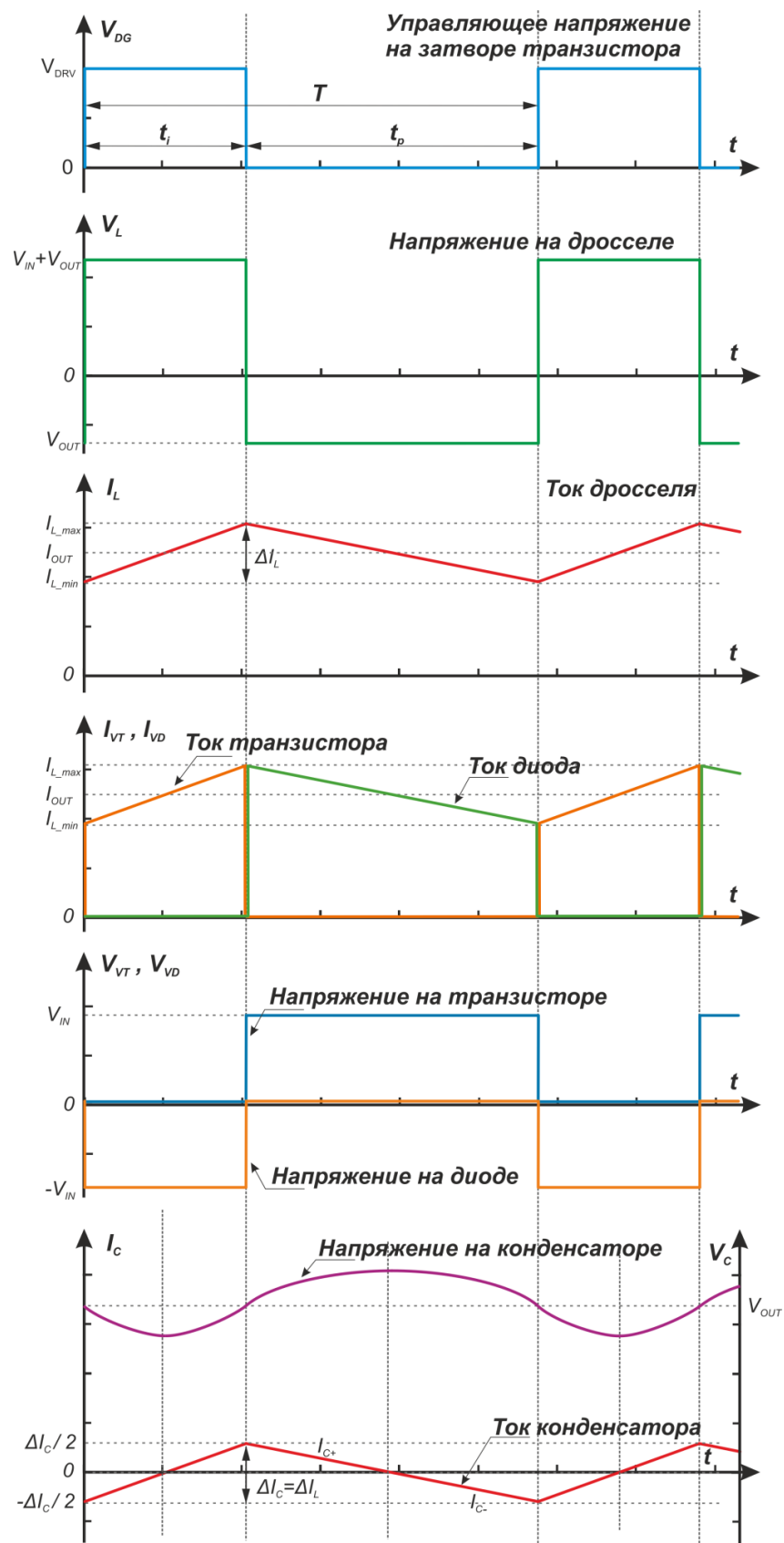


Рисунок 11 - Временные диаграммы работы импульсного понижающего стабилизатора

Период потребления энергии

Когда ШИМ-контроллер подает сигнал, и ключевой транзистор VT открывается, начинается этап потребления энергии. В этот момент энергия от источника питания начинает поступать в схему. Ток течет по пути: от ключевого транзистора, через дроссель, и далее к фильтрующему конденсатору и нагрузке.

Важно отметить, что на дроссель подается разница между входным напряжением (V_{in}) и выходным напряжением (V_{out}). Эта разница потенциалов заставляет ток, проходящий через дроссель, постепенно увеличиваться.

Величина этого увеличения тока, обозначаемая как $[\Delta I] (L+)$, является ключевым параметром на этом этапе. Далее мы рассмотрим, как именно рассчитывается это изменение тока.

$$=, \Delta I_{L+} \frac{t_i V_{IN} V_{OUT}(-)}{L} \quad (2)$$

где:

t_i – длительности периода включенного ключа;

L – индуктивность дросселя;

V_{IN} – напряжение на входе;

V_{OUT} – напряжение на выходе.

До тех пор пока дроссель, заряжает конденсатор, и этот конденсатор питает какую-то нагрузку. Пока ток, который дроссель "закачивает" в конденсатор, меньше, чем ток, который нагрузка "высасывает" из него, напряжение на конденсаторе будет падать. То есть, конденсатор разряжается быстрее, чем заряжается.

Но вот наступает момент, примерно в середине какого-то временного интервала (назовём его t_i), когда дроссель начинает "пересиливать" нагрузку. Ток, поступающий в конденсатор, становится больше тока, который из него уходит. И тогда напряжение на конденсаторе начинает расти.

Важно помнить, что в течение всего этого времени, пока нагрузка потребляет энергию, на диод VD действует обратное напряжение, равное напряжению источника питания. Это значит, что диод "закрыт" и не пропускает ток в обратном направлении.

Период паузы

После того, как транзистор выключается, наступает период паузы. В этот момент диод VD мгновенно открывается, и энергия, накопленная в дросселе, начинает высвобождаться. Ток, который до этого "накапливался" в дросселе, теперь течет по следующему пути: через диод, сам дроссель, и далее разделяется между фильтрующим конденсатором и подключенной нагрузкой.

Максимальное значение тока свидетельствует о готовности силового дросселя к переключению. В данной фазе происходит передача аккумулированной энергии из дросселя на конденсатор, поддерживающий напряжение U_{out} . При этом ток постепенно снижается, подобно процессу разряда аккумулятора.

Изменение тока дросселя (обозначим его как $[\Delta I]_{-(L)}$) во время этой паузы можно рассчитать по определенной формуле, которая учитывает параметры цепи и длительность паузы. Эта формула позволяет понять, насколько сильно уменьшится ток дросселя за время паузы.

$$\Delta I_{L-} = -\frac{t_p U_{OUT}}{L} \quad (3)$$

где:

t_p – длительности периода выключенного ключа;

L – индуктивность дросселя;

U_{OUT} – выходное напряжение.

В работе импульсного источника питания, пока ток в дросселе превышает ток нагрузки, происходит заряд конденсатора, что приводит к росту напряжения на нём. Как только ток дросселя опускается ниже уровня потребления, конденсатор начинает разряжаться, и напряжение на нём падает. Этот момент, когда напряжение на конденсаторе начинает снижаться, приходится примерно на середину временного интервала t_p .

Ток в дросселе продолжает снижаться до начала следующего цикла работы. В период паузы, когда дроссель не получает энергию, нагрузка питается за счёт энергии, запасённой ранее в дросселе и конденсаторе.

Для управления силовыми ключами используются ШИМ-сигналы, генерируемые специализированными контроллерами. В данной работе управление осуществляется микроконтроллером, поэтому необходимо выбрать подходящую модель, оценив доступные варианты.

Среди часто используемых универсальных микроконтроллеров выделяются STM32F103C8T6 и ATmega328P. STM32F103C8T6 характеризуется 32-разрядной архитектурой ARM и сочетает в себе оперативную (RAM) и флэш-память (Flash). Соединительная схема с назначением выводов STM32F103C8T6 изображена на рисунке 12.

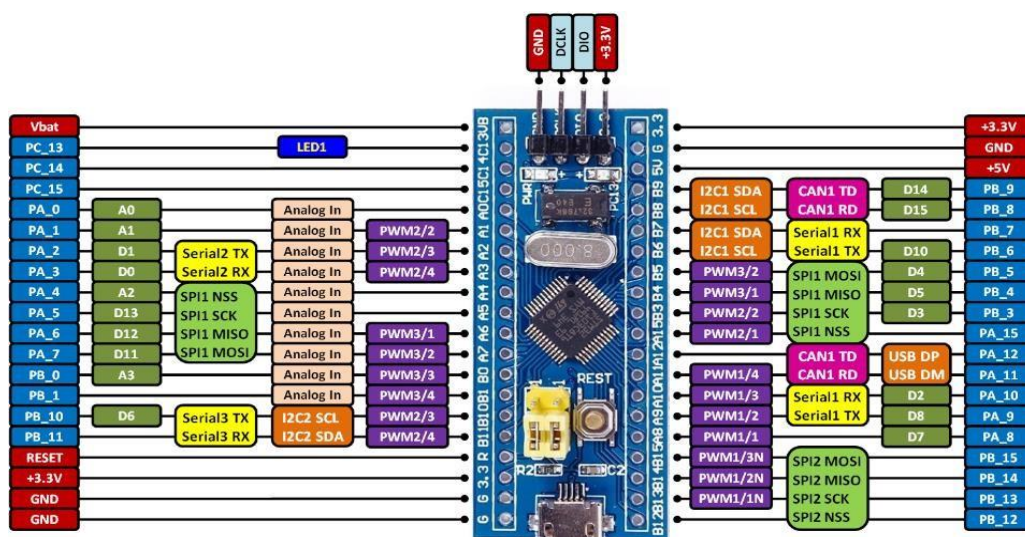


Рисунок 12 - STM32F103C8T6 внешний вид и назначение выводов

Микроконтроллер STM32F103C8T6 предлагает широкий спектр возможностей, включая выходы с широтно-импульсной модуляцией и несколько аналоговых входов, однако его производительность оказывается избыточной для нужд текущего проекта. Программатор, необходимый для настройки данного устройства, является строго специфическим, в то время как распространённость указанной платформы весьма ограничена, что затрудняет доступ к программным библиотекам и примерам. Поэтому мы приняли решение обратиться к ATmega328P — восьмибитному контроллеру на архитектуре AVR с сопоставимыми характеристиками: 32 КБ флеш-памяти, 2 КБ оперативной памяти и 1 КБ энергонезависимой памяти EEPROM. Чтобы упростить процесс работы, будет использована плата Arduino Nano с интегрированным контроллером. Внешний вид платы, а также распределение входов и выходов можно рассмотреть на рисунке 13.

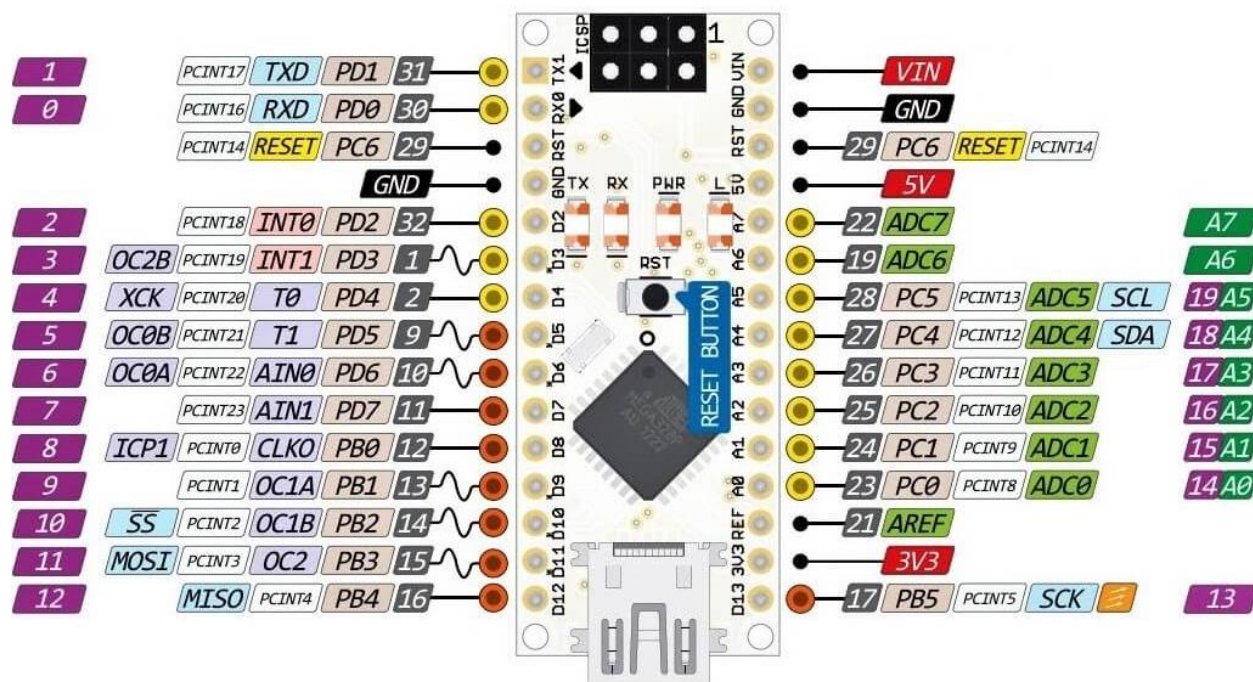


Рисунок 13 – Внешний вид и назначение выводов Arduino Nano

Arduino Nano на базе микроконтроллера ATmega328P – это компактная и удобная платформа для реализации различных электронных проектов. Она предлагает 8 аналоговых входов для считывания данных с датчиков и 2 выхода ШИМ (широтно-импульсной модуляции) для управления, например, яркостью светодиодов или скоростью вращения моторов.

Одно из главных преимуществ Arduino Nano 328P – это простота программирования. Вам не потребуется покупать и подключать отдельный программатор, так как на плате уже встроен интерфейс USB – UART. Это позволяет напрямую подключать плату к компьютеру через USB-кабель и загружать программы, что значительно упрощает процесс разработки и отладки.

Для более детального сравнения характеристик микроконтроллера ATmega328P, лежащего в основе Arduino Nano, обратитесь к таблице 1. Там вы найдете подробную информацию о его памяти, тактовой частоте, количестве портов ввода/вывода и других важных параметрах.

Таблица 1 – ATmega328P и STM32F103C8T6

	ATmega328P	STM32F103C8T6
Flash память, КБ	32	64
RAM память, КБ	2	20
Максимальная частота, МГц	20	72
Скорость АЦП, kSPS	15	2 ¹⁰⁰⁰

В процессе осуществления работы предпочтение при выборе микроконтроллера было отдано не STM32F103C8T6, несмотря на её отличные технические характеристики, а ATmega328P, что вызвано практичностью: она со своей менее высокой производительностью, но более доступной ценой и проще в освоении.

Проектирование и конфигурирование микроконтроллера ATmega328P отличается очень высокой экономией ресурсов и соблюдением быстроты, что ведёт к уменьшению временных расходов и финансовой нагрузки. На основе анализа соотношения стоимости разработки и сложности имплементации сформировалось решение об исключении STM32F103C8T6 из рамок данной работы.

1.3 Анализ способов регулирования выходного тока и напряжения с применением микроконтроллера

Данные устройства функционируют на основании принципа постоянной проверки и регулирования. Микропроцессор непрерывно измеряет параметры, такие как напряжение или ток, и сопоставляет их с установленными нормами. При дефектах или несоответствиях микроконтроллер реагирует соответствующими действиями, чтобы устранить отклонение.

Его задача - изменить скважность управляющих импульсов, то есть, соотношение между временем, когда импульс включен, и временем, когда он выключен. Увеличивая скважность, мы, как правило, увеличиваем выходную мощность, а уменьшая - уменьшаем. Таким образом, микроконтроллер, играя с длительностью импульсов, подстраивает работу устройства, чтобы выходные параметры соответствовали заданным.

Схематическое изображение работы устройства можно увидеть на блок-схеме (см. рис. 14). Она демонстрирует последовательные этапы — контроль выходных параметров, сравнение их с установленными значениями и коррекцию для обеспечения стабильной работы блока питания.

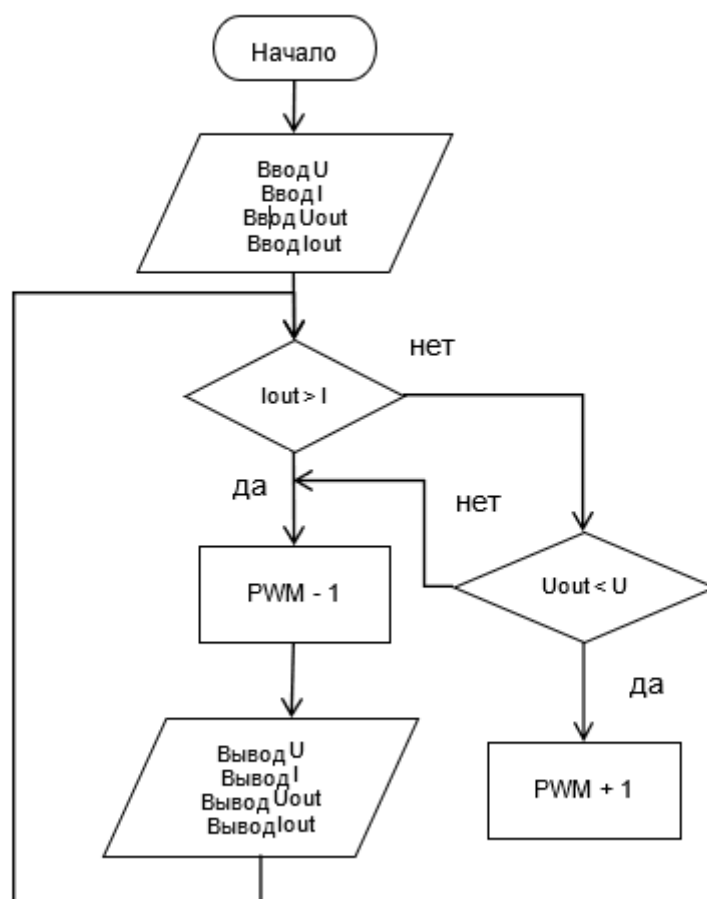


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма регулирования напряжения и тока микроконтроллером

Иллюстрация демонстрирует непрерывное наблюдение контроллера за выходными параметрами блока питания. В момент установления последовательности превышения допустимого значения тока, программа управления изменяет длительность импульсов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что способствует уменьшению выходного тока. Далее проходит повторная проверка выходных токов и напряжений, позволяющая контроллеру быстро и незаметно адаптировать выходные параметры под изменяющиеся условия нагрузки.

Аналогичный принцип регулирования описан в литературных источниках [22]. Для того, чтобы минимизировать любые нежелательные колебания, которые могут возникать в процессе работы, часто используют специальный выходной

фильтр. Он как бы "сглаживает" сигнал, делая его более стабильным и ровным.

На изображении 15 представлена схема контроля выходных параметров посредством микроконтроллера.

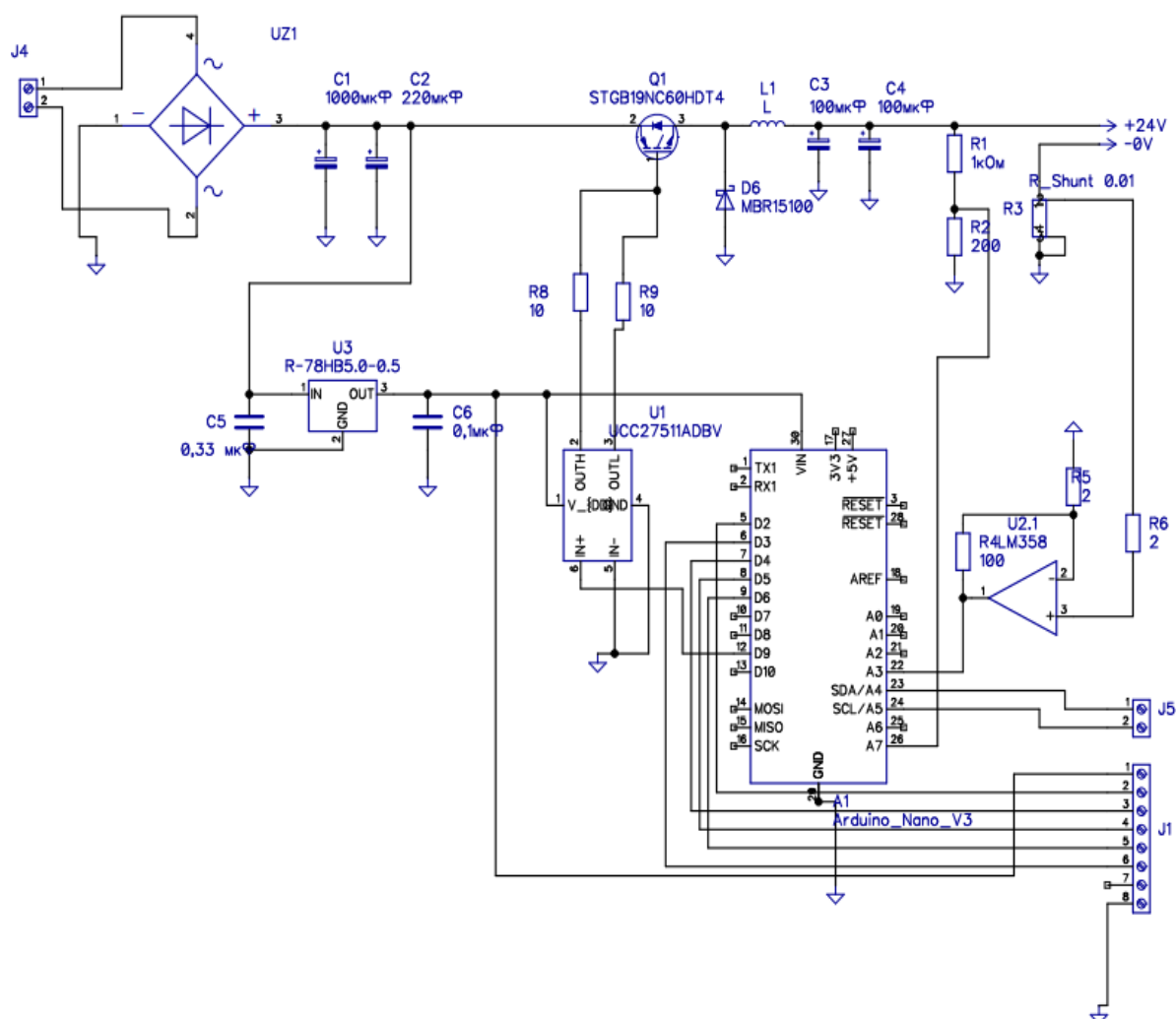


Рисунок 15 – Контроль выходных параметров при помощи микроконтроллера.

На деле напряжение измеряется иначе. В тех случаях, когда напряжение становится слишком великим для прямых измерений, микроконтроллер применяет резистивный делитель, состоящий из резисторов R1 и R2, который понижает напряжение до уровня, приемлемого для измерений. Для защиты

микроконтроллера, корректный расчёт резистивного делителя имеет решающее значение.

Данная схема, в конечном итоге, даёт микроконтроллеру шанс произвести вычисление тока и напряжения, преобразовать сведения в цифровой вид и выполнить с ними самые разные операции: от отображения информации на дисплее до передачи по сетевому каналу. Связка простоты и точности создаёт удобство этой схемы для решения различных задач.

Ток измеряется с помощью токового шунта $R3$ поскольку напряжение, вырабатываемое токоизмерительным шунтом, оказывается низким и недостаточным для вход микроконтроллера его усиливаем с помощью операционного усилителя $U2.1$ коэффициент усиления которого рассчитываем и регулируем с помощью резисторов $R4$ и $R6$.

2. Разработка и расчет схемы источника питания на микроконтроллере

2.1 Разработка и расчет электрической схемы устройства

В процессе работы были разработаны обе концептуальные схемы, содействующие восприятию и воплощению идеи. Первая схема представляет собой электрическую принципиальную схему (см. рис. 17), вторая схематично демонстрирует структурные взаимосвязи (см. рис. 16). Обе схемы наглядно иллюстрируют устройство и функциональные принципы системы, позволяя глубже понять принципиальную конфигурацию и детализировать план реализации идеи.

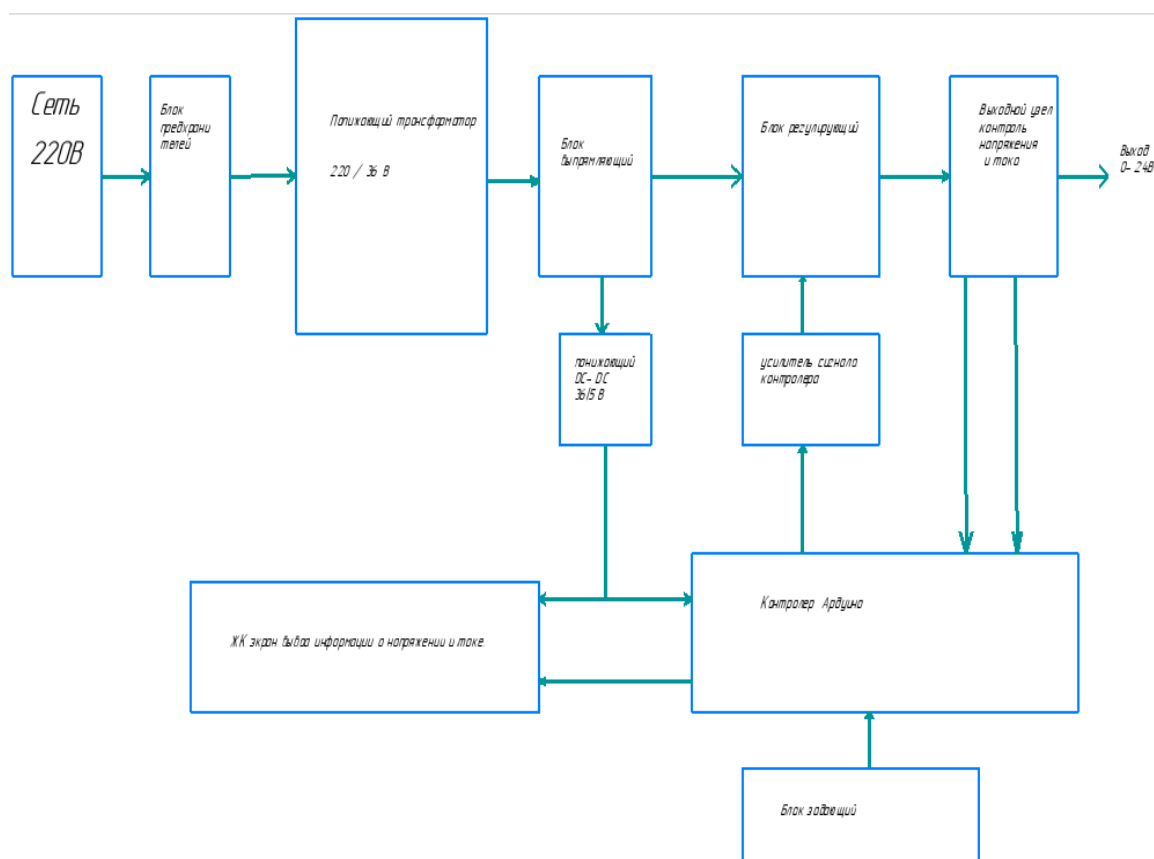


Рисунок 16 – Структурная схема источника питания на микроконтроллере

В качестве основного элемента устройства выступает микроконтроллер ATmega328p, который координирует функционирование всех остальных компонентов, контролируя выводы и обрабатывая сигналы от сенсоров. Предоставленная информация отображается на жидкокристаллическом дисплее, способном отображать данные в двумерном формате чисел, равном 16. Внедренный интерфейс I2C упрощает подключение сенсоров и способствует оптимизации пространств на плате устройства.

Совокупность двух кнопок и поворотного энкодера обеспечивает навигацию по меню и изменение параметров устройства. Кнопки переключают пункты меню, в то время как энкодер обеспечивает плавную настройку параметров с высокой точностью. Сочетание этих элементов управления значительно упрощает работу с устройством.

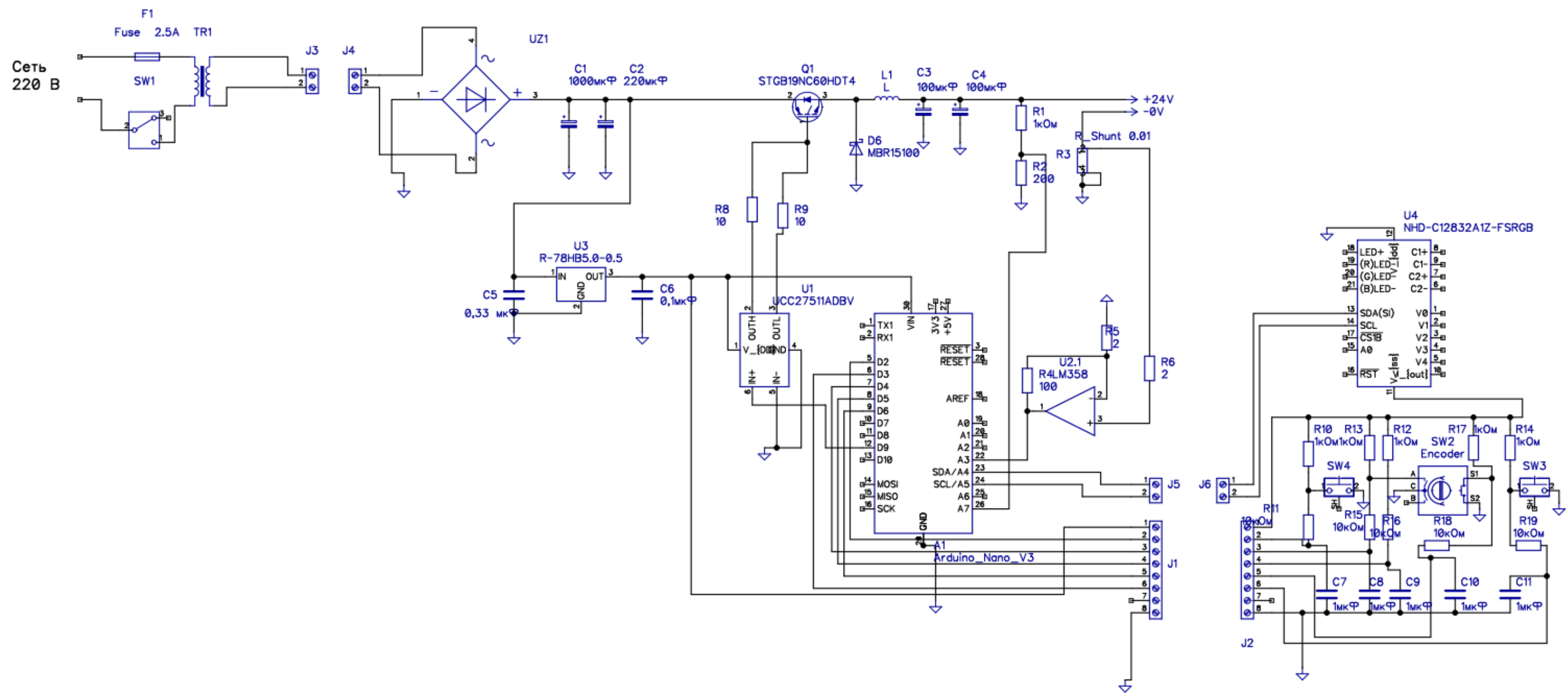


Рисунок 17. Схема электрическая принципиальная.

Работа устройства начинается с подачи переменного напряжения из электросети на трансформатор TR1 через предохранитель F1. Трансформатор понижает уровень напряжения до 30 В, после чего сигнал поступает на диодный мост VD для выпрямления. Следует подчеркнуть, что трансформатор обеспечивает необходимую изоляцию электрической схемы от сети, поскольку преобразователь сам по себе не обладает этой способностью.

Затем, проходя через конденсаторы C1 и C2, выпрямленная постоянная напряжение поступает на IGBT-транзистор Q1. При подаче питания на микроконтроллер начинает работать программа, генерирующая ШИМ-сигнал; данный сигнал формируется в соответствии с анализом выходных параметров.

ШИМ-сигнал воздействует на контроллерный драйвер U1, отвечающий за управление функционированием IGBT-транзистора. Данный драйвер обеспечивает быструю смену состояний IGBT на частоте 62,5 кГц, что дает возможность эффективно регулировать мощностные параметры путём корректировки ширины импульсов.

Драйвер необходим, поскольку микроконтроллер не может напрямую и достаточно быстро управлять затвором IGBT транзистора из-за его ёмкости. Без драйвера транзистор не будет полностью открываться, что приведет к перегреву и потерям мощности.

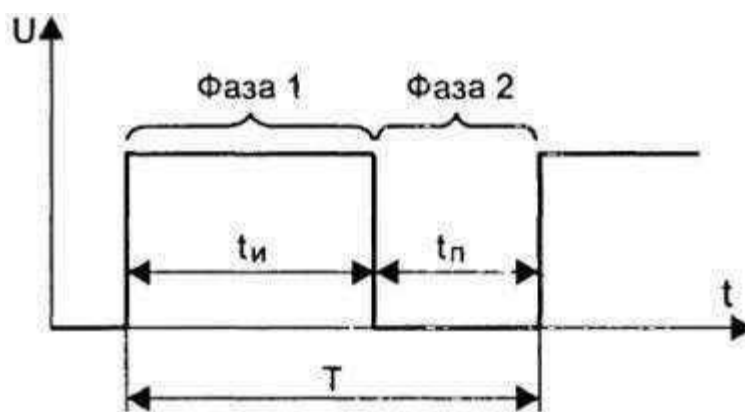


Рисунок 18 – Принцип работы ШИМ

Импульсный преобразователь свободно управляет всеми процессами в системе. Он работает следующим образом: сначала включается силовой транзистор Q1. Затем энергия от источника поступает в нагрузку. При этом точно регулируется накопление в конденсаторах C3 и C4 и индуктивности L1. Также преобразователь отличается способностью предотвращать резкие скачки тока. Как только напряжение нагрузки достигает установленного значения, транзистор Q1 отключается.

При этом индуктивный ток в L1 не прекращается мгновенно, а продолжает протекать через диод D5, что позволяет существенно регулировать работу нагрузки. Для поддержания контроля над данным током предусмотрен шунтирующий резистор R3, который создаёт напряжение, пропорциональное текущему значению. Это напряжение затем усиливается с использованием операционного усилителя U2, предустановленного на заданном уровне путём выбора резисторов R4 и R5. Усиленный сигнал направляется на аналоговый вход A3 микроконтроллера МР.

Выходное напряжение формируется при помощи делителя, состоящего из резисторов R1 и R2, а затем пониженное напряжение передается на аналоговый вход A7 микроконтроллера. Для отображения полученных значений тока и напряжения задействован ЖК-дисплей, который подключен

через интерфейс I2C к соответствующим управляющим контактам 24 и 23 микроконтроллера, обеспечивая функционирование оборудования. Дисплей питается от источника напряжения +5В, подключаемого через разъемы J1 и J5 с общей сетью. Управление меню и функционалом устройства осуществляется при помощи механического энкодера SW1 и кнопок SW3 и SW4. Для уменьшения нежелательных переходных процессов, возникающих в процессе включения и выключения прибора, в этих элементах предусмотрены фильтры с конденсаторами C7-C11 и резисторами R11, R15, R16, R18 и R19.

2.2 Расчет понижающего импульсного стабилизатора напряжения

2.2.1. Для реализации нашей работы необходимо разработать понижающий импульсный стабилизатор напряжения. Ниже представлен алгоритм расчета основных параметров данного стабилизатора.

Начальный этап подразумевает определение основных характеристик, которые влияют на функционирование стабилизатора:

- Входное напряжение (V_{IN}). Входное напряжение может колебаться в диапазоне от 28В (V_{IN_min}) до 32В (V_{IN_max}) из-за возможных изменений в питающей сети 220В.

- Выходное напряжение (V_{OUT}). Требуется регулируемое выходное напряжение в диапазоне от 0.1В (V_{OUT_min}) до 24В (V_{OUT_max}).

- Выходной ток (I_{OUT}). Нагрузка может изменяться, поэтому выходной ток будет варьироваться от 0А (I_{OUT_min}) до 10А (I_{OUT_max}).

- Пульсации выходного напряжения (ΔV_{OUT}). Максимально допустимая величина пульсаций выходного напряжения составляет 0.2В.

2.2.2. Расчет коэффициента заполнения

При работе стабилизирующего устройства, когда происходит варьирование напряжений на входе и выходе, необходимо определить нижнюю и верхнюю границы коэффициента заполнения (q). Этот параметр отражает продолжительность активного действия транзистора – центрального элемента конструкции. Для вычисления коэффициента заполнения применяются такие формулы:

$$q_{max}q_{min} =, \quad =, \frac{V_{OUT_max}}{V_{IN_min}} \frac{V_{OUT_min}}{V_{In_max}} \quad (2)$$

где:

где:

- V_{OUT_max} и V_{OUT_min} обозначают максимальные и минимальные уровни выходного напряжения. Значения V_{IN_max} и V_{IN_min} представляют собой соответственно верхнюю и нижнюю границы входного напряжения. q_{max} и q_{min} указывают на предельные значения коэффициента заполнения.

$$q_{max} = 24/28=0.857 \quad q_{min} = 0/32=0$$

2.2.3. Выбор контроллера и рабочей частоты

В качестве ШИМ-контроллера выбран Arduino Nano на базе ATmega328P. Рабочая частота ШИМ составляет 62.5 кГц.

2.2.4. Рассчитываем параметры силового дросселя

Для правильной работы стабилизатора необходимо подобрать индуктивность силового дросселя.

Определение $q_{\Delta I_{max}}$. Необходимо определить коэффициент заполнения, при котором пульсации тока дросселя будут максимальными. В данном случае, поскольку значение 0.5 находится между q_{min} и q_{max} , принимаем $q_{\Delta I_{max}} = 0.5$.

Расчет индуктивности (L). Индуктивность дросселя рассчитывается по формуле:

$$L = (-), \frac{V_{IN_max}}{f \Delta I_L} q_{\Delta I_{max}} q_{\Delta I_{max}}^2 \quad (3)$$

где:

V_{IN_max} – максимальное значение входного напряжения (32В).

f – рабочая частота импульсного стабилизатора (62.5 кГц).

ΔI_L – пульсации тока дросселя.

$q_{\Delta I_{max}}$ – коэффициент заполнения при котором пульсации тока максимальны (0.5).

Определение пульсаций тока дросселя (ΔI_L). Величину пульсаций тока дросселя выбираем в диапазоне (0.3...0.6) I_{OUT} . В данном случае, I_{OUT} принимаем равным $I_{OUT_max} = 10A$. Выбираем $\Delta I_L = 0.3 \cdot 10A = 3A$.

Подставляя значения в формулу для индуктивности, получаем:

$$L = (32V / (62500 \text{ Гц } 3A)) (0.5 - 0.5^2) = 0.0000853 \text{ Генри } (85.3 \text{ мкГн})$$

Чтобы правильно подобрать дроссель для нашей схемы, необходимо учитывать несколько ключевых параметров, связанных с током, протекающим через него.

Первоначально следует определить максимум тока, протекающего через дроссель (I_{L_max}). Подходящая формула, учитывающая максимальный выходной ток (I_{OUT_max}) и амплитуду пульсаций в дросселе (ΔI_L) как половину величины пульсаций, принадлежит к категории динамических характеристик. Указатели, обозначающие I_{OUT_max} и ΔI_L , имеют значения 10А и 3А соответственно, что подразумевает, что итоговый результат для I_{L_max} будет вычислен согласно следующей формуле: $10 + 0,5 \times 3 = 11,5\text{А}$.

С учетом вероятности насыщения сердечника, при выборе параметра следует предусмотреть запас. Предпочтительно подобрать элемент, который обеспечит ток насыщения, превышающий по величине рассчитываемое значение I_{L_max} не менее чем на 20% - 25%. Так, исходя из проведённых расчетов, требуемые характеристики по току насыщения должны равняться не менее 13,8 Ампер, то есть $11,5 \times 1,2$.

Во-вторых, требовалось провести расчет среднеквадратичного значения тока через дроссель (I_{L_rms}) – величины, характеризующей тепловые потери в дросселе. I_{L_rms} определяется с учетом максимального выходного тока и колебаний тока дросселя. В расчете получено значение I_{L_rms} , равное 10.037А.

На основе этих расчетов, для нашей работы требуется дроссель со следующими характеристиками:

- Индуктивность: 45 мкГн
- Ток насыщения: не менее 14А (с учетом запаса)

Эти параметры служат отправной точкой для выбора конкретной модели дросселя, как указано в источнике [20].

2.2.5. В процессе разработки импульсного стабилизатора напряжения важным этапом является расчёт параметров фильтрующих конденсаторов на выходе и входе схемы. Это необходимо для обеспечения стабильного выходного напряжения с минимальными пульсациями и надёжной работы устройства.

Расчёт выходного конденсатора (C_{out}).

В качестве начального этапа выбрано максимальное выходное напряжение, зафиксированное на уровне 24 В. Для обеспечения устойчивости элементов схемы рекомендуется использование конденсаторов, напряжение которых на 20–25% выше расчётного значения. Соответственно, для выходного конденсатора минимально допустимая величина составляет 28,8 В.

Итак, следующая задача заключается в анализе изменений выходного напряжения (ΔV_{OUT}), которое делится на две части: первая характеризуется пульсациями, обусловленными зарядкой и разрядкой, обозначаемыми как (ΔV_{Cout_disch}), а вторая отражает колебания, возникающие вследствие эквивалентного последовательного сопротивления (ESR), известных как ΔV_{Cout_ESR} . В большинстве случаев первая часть составляет от 10 до 50% от общего значения пульсаций. Для текущего анализа выбрано значение в 50%, что эквивалентно 12 В. Соответственно, пульсации, возникающие из-за ESR, составляют такие же 12 В.

После определения составляющих пульсаций можно рассчитать минимально необходимую ёмкость выходного конденсатора (C_{out}) по формуле (4).

$$C_{out} = \frac{V_{IN_max}}{\Delta V_{cout_disch}} \frac{1}{L} \frac{(-)q_{\Delta I_{max}} q_{\Delta I_{max}}^2}{8f^2} \quad (4)$$

Основой расчетов служат параметрические величины: наибольшее входное напряжение (V_{IN_max}), колебание выходного напряжения при

процессах разряда (ΔV_{Cout_disch}), индуктивность дросселя (L), рабочая частота преобразователя (f) и коэффициент пульсации тока ($q\Delta I_{max}$).

Указанные параметры применяются для определения значения ёмкости накопительного конденсатора, рассчитанного как 199 мкФ.

Затем рассчитывается максимально допустимое значение ESR выходного конденсатора (ESR_{Cout}) по формуле (5), используя величину пульсаций, обусловленных ESR (ΔV_{Cout_ESR}), и пульсации тока выходного дросселя (ΔI_L). Полученное значение ESR составляет 4 Ом.

$$ESR_{cout} =, \frac{\Delta V_{cout_ESR}}{\Delta I_L} \quad (5)$$

Расчёт входного конденсатора (C_{in}).

При выборе параметров конденсатора на входе работы требуется определить напряжение, предельно допустимое для его использования (V_{Cin_max}). Удачным вариантом выступает значение 32 В, оно соответствует максимуму напряжения на входе (V_{IN_max}). Рекомендуется учитывать дополнительный запас в диапазоне около 20-25% от расчетных показателей.

Далее оцениваются составляющие пульсаций входного напряжения (ΔV_{IN}). В данном случае, как пульсации, обусловленные разрядом конденсатора (ΔV_{Cin_disch}), так и пульсации, вызванные ESR (ΔV_{Cin_ESR}), выбираются в пределах 1-2% от минимального входного напряжения (V_{IN_min}). В обоих случаях получено значение 0.28В.

Таким образом, проведён расчёт основных параметров выходного и входного конденсаторов, необходимых для обеспечения стабильной и эффективной работы импульсного стабилизатора напряжения. Полученные значения

являются отправной точкой для выбора конкретных компонентов с учётом их характеристик и доступности

2.2.9. Расчет емкости входного конденсатора

Определение подходящей емкости и эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) входного конденсатора (C_{in}) – важный этап разработки импульсного источника питания. Неправильный выбор этих параметров может привести к нестабильной работе, повышенному уровню шума и даже повреждению компонентов.

Для расчета минимально необходимой емкости C_{in} можно использовать формулу (6),

$$C_{in} = \frac{I_{L_max}^2 L_{PS}}{\Delta V_{cin_disch} V_{IN_min}} \quad (6)$$

Процесс определения коэффициента, характеризующего соотношение периода разряда конденсаторов и интервала, за который дроссель достигает пикового значения тока в электрической цепи, требует учета ряда ключевых факторов. Список необходимых параметров включает максимальный ток дросселя (I_{L_max}), минимальные значения входного напряжения (V_{IN_min}), индуктивные свойства цепи питания (L_{PS}) и предел допустимого снижения напряжения на конденсаторе во время разряда (ΔV_{Cin_disch}). При этом следует обратить внимание на то, что индуктивные свойства цепи питания (L_{PS}) в данном контексте включают индуктивность соединительных проводов, обеспечивающих связь выходного устройства с основным источником питания.

Если точное значение L_{PS} неизвестно, для стандартных лабораторных источников питания можно воспользоваться эмпирическим правилом: рекомендуется выбирать емкость от 10 мкФ до 22 мкФ на каждый ампер

выходного тока. В приведенном примере выбрана емкость 220 мкФ с рабочим напряжением 40В.

Помимо емкости, важно учитывать ESR входного конденсатора.

Максимально допустимое значение ESR (ESR_{Cin}) можно рассчитать по формуле (7).

$$ESR_{cin} = \frac{\Delta V_{cin_ESR}}{I_{OUT_max} \Delta I_L + \frac{1}{2}} \quad (7)$$

Эта формула учитывает максимальный выходной ток стабилизатора (I_{OUT_max}), пульсации тока дросселя (ΔI_L) и допустимые пульсации напряжения на конденсаторе, обусловленные его ESR (ΔV_{Cin_ESR}). Выбор конденсатора с низким ESR позволит минимизировать пульсации напряжения на входе стабилизатора и повысить его эффективность

2.2.10. Рассчитываем параметры ключевого транзистора VT

Для корректной работы импульсного понижающего стабилизатора необходимо тщательно подобрать ключевой транзистор и диод, а также оценить их тепловой режим. Ниже приведена методика расчета основных параметров и выбора этих компонентов.

Определение предельного обратного напряжения (V_{VT_max}) - параметра, который описывает максимальное входное напряжение стабилизатора (V_{IN_max}). Примером служит ситуация, когда V_{VT_max} равняется 30 В, совпадая с V_{IN_max} . Рекомендовано устанавливать этот параметр с запасом на уровне 20-25% для учета возможных пиковых колебаний и обеспечения бесперебойного функционирования полупроводникового устройства.

Определение значения максимального рабочего тока (I_{VT_max}).
 Максимальный ток, протекающий через ключевой элемент, соответствует величине допустимого тока через индуктивную нагрузку (I_{L_max}). Здесь справедливо равенство $I_{VT_max} = I_{L_max}$, при котором значение равно 13,8 А.

Действующее значение тока (I_{VT_rms}) используется в расчетах тепловых потерь, возникающих в полупроводниковых устройствах. Определяется оно по следующей формуле:

$$I_{VT_rms} I_{OUT_max} = \sqrt{q_{max} \left(1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta I_L}{I_{OUT_max}}\right)^2\right)} \quad (8)$$

где:

q_{max} – максимальный коэффициент заполнения;

I_{OUT_max} – максимальный выходной ток;

ΔI_L – пульсации тока выходного дросселя.

В данном случае $I_{VT_rms} = 9,292$ А.

Предварительный выбор транзистора: На основе V_{VT_max} , I_{VT_max} , I_{VT_rms} , рабочей частоты и конструктивных требований выбирается конкретная модель. В примере выбран STGB19NC60HDT4 (IGBT транзистор 600В, 19А).

Определение сопротивления открытого канала (RDS) возможно с использованием параметров, указанных в технической документации для транзисторов. Предположим, RDS равен 10 Ом.

Исходные показатели количества источника первичной мощности (PVT) получаются путем сложения статических потерь (PVT_stat) и потерь от переключения (PVT_switch).

$$P_{VT} = P_{VT_stat} + P_{VT_switch} \quad (9)$$

Статические потери (PVT_stat): Для биполярных и IGBT транзисторов:

$$P_{VT_stat} = I_{OUT_max} V_{VT} \quad (10)$$

где V_{VT} – прямое падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер (VCE). В примере $P_{VT_stat} = 12,855$ Вт.

Динамические потери (PVT_switch):

$$P_{VT_switch} = E_{ts} C_{oes} f + \frac{1}{2} V_{IN_max}^2 \quad (11)$$

где:

E_{ts} – суммарная энергия переключения;

C_{oes} – выходная емкость транзистора;

f - частота переключения.

В примере $P_{VT_switch} = 70.625$ Вт.

Полная рассеиваемая мощность (PVT_total):

$$P_{VT_total} = P_{VT_stat} + P_{VT_switch}$$

В примере $P_{VT_total} = 83.480$ Вт. На основе этой мощности выбирается подходящий радиатор для отвода тепла.

2.2.11 Выбор диода (VD)

Определяется максимальное обратное напряжение (V_{VD_max}), совпадающее с максимальным входным напряжением стабилизатора (V_{IN_max}). В рассматриваемом случае наблюдается равенство: $V_{VD_max} = V_{IN_max} = 32$ В.

Устанавливается верхний предел тока диода (I_{VD_max}), который совпадает с предельным значением тока, протекающего через индуктивность (I_{L_max}). В данной ситуации I_{VD_max} идентичен I_{L_max} и составляет 13,8 А.

Предварительный выбор диода: На основе V_{VD_max} , I_{VD_max} , рабочей частоты и конструктивных требований выбирается конкретная модель. В примере выбран MBR15100, Диод Шоттки 15А 100В [ТО-220АС]

Расчет рассеиваемой мощности на диоде.

Диоды, как и любые электронные компоненты, при работе выделяют тепло. Это тепло, которое нужно отводить, чтобы диод не перегрелся и не вышел из строя. Количество тепла, которое диод рассеивает, называется рассеиваемой мощностью.

Рассчитать эту мощность можно по следующей формуле:

$$P_{VD} q_{min} I_{OUT_max} V_{VD} = (1-), \quad (12)$$

Давайте разберем каждый элемент этой формулы:

P_{VD} – это и есть искомая рассеиваемая мощность диода, измеряется в Ваттах (Вт).

q_{min} – это минимальное значение коэффициента заполнения.

Коэффициент заполнения характеризует, как долго диод находится во включенном состоянии по отношению к общему времени цикла.

Минимальное значение этого коэффициента используется для расчета максимальной рассеиваемой мощности.

$I_{(OUT_max)}$ – это максимальный выходной ток, который протекает через диод. Измеряется в Амперах (А). Важно знать максимальный ток, чтобы оценить наихудший сценарий с точки зрения тепловыделения.

V_{VD} – это прямое падение напряжения на диоде. Это напряжение, которое "падает" на диоде, когда он проводит ток. Типичные значения:

1,2 В для кремниевых диодов

0,8 В для диодов Шоттки

Мы выберем диод Шоттки, через который протекает максимальный ток 10 Ампер, а минимальный коэффициент заполнения равен 0. Тогда рассеиваемая мощность будет:

$$P_{VD} = (1 - 0) 10 0,8 = 8 \text{ Вт}$$

В данном примере, диод Шоттки рассеивает 8 Ватт тепла. Эта информация важна для выбора подходящего диода и системы охлаждения, чтобы обеспечить его надежную и долговечную работу. Если рассеиваемая мощность слишком велика, необходимо использовать диод с более высокой допустимой мощностью или предусмотреть радиатор для отвода тепла.

2.2.12. Определение мощности трансформатора. Исходные данные:

максимальный ток нагрузки (I_n) и напряжение на вторичной обмотке (U_2).

Рассчитывают мощность, потребляемую выпрямителем от вторичной обмотки: $P_2 = U_2 \times I_n$.

$$P_2 = 32 \times 10 = 320 \text{ Вт}$$

Определяют мощность трансформатора: $P_{тр} = 1,25 \times P_2$.

$$P_{тр} = 1,25 \times 320 = 400 \text{ Вт}$$

2.2.13 Расчёт площади сечения сердечника магнитопровода. Используют формулу: $S = 1,3 \times P_{тр}$. (13)

$$S = 1,3 \times 400 = 520 \text{ см}^2$$

2.2.14 Определение числа витков обмоток

Для первичной обмотки: $w_1 = 50 \times U_1 / S$,

$$w_1 = 50 \times 220 / 520 = 21,15$$

для вторичной — $w_2 = 55 \times U_2 / S$.

$$w_2 = 55 \times 30 / 520 = 3,17$$

2.2.15 Расчёт диаметров проводов обмоток.

Диаметр провода обмотки определяют по формуле: $d = 0,02 \times I$.

Для первичной обмотки $d = 0,02 \times 1,818 = 0,036 \text{ мм}$

Для вторичной обмотки $d = 0,02 \times 13,8 = 0,276 \text{ мм}$

Понижающий импульсный стабилизатор, известный как Buck Converter, представляет собой значимый компонент современных источников питания,

отличающихся компактностью и высоким коэффициентом полезного действия. Теоретически функционирование такого стабилизатора основывается на управлении процессом накопления и передачи энергии с помощью магнитных элементов — основными из которых являются дроссели и выходные конденсаторы. Работа устройства осуществляется в двухфазном режиме, который включает периоды включения и выключения силового ключа, что обеспечивает регулирование длительности протекания тока и контролируемого уровня выходного напряжения.

Суть работы стабилизатора формирует последовательность включения и выключения полупроводникового транзисторного ключа. Энергия аккумулируется в индуктивности за время подачи напряжения на вход преобразователя и поступает к нагрузке посредством диодного выпрямителя в момент отключения ключа. Благодаря инерции, т.е. сопротивлению изменения тока, индуктивный элемент не позволяет мгновенно прервать ток, осуществляя его поддержание по вспомогательному контуру. Это обеспечивает непрерывность силовой цепи, тем самым сохраняя плавный и ровный выходной сигнал. При этом стабилизатор осуществляет регулирование уровня выходного напряжения ниже входного, что является ключевой особенностью данной схемы преобразования энергии.

При изучении принципа работы стабилизатора акцентируют внимание на двух возможных режимах работы дросселя: упорядоченном (непрерывном) и нарушенном (прерывистом). Первый характеризуется постоянным током, что повышает КПД и снижает выплаты мощности. Второй сопровождается спадом тока в части периода с ШИМ, что вызывает потери и уменьшает эффективность. Целесообразно подобрать параметры так, чтобы стабилизатор работал в этом режиме и сохранял стабильность.

Параметры, такие как эквивалентное последовательное сопротивление конденсаторов (ESR), магнитные свойства сердечника, схема трассировки печатной платы и качество управляющих сигналов, играют определяющую

роль в стабилизации и эффективности преобразователя. Пониженный ESR минимизирует пульсации напряжения на выходе, а резкое снижение индуктивности может привести к превышению допустимых токов и вызвать нестабильные переходные процессы.

Основной задачей стабилизатора является обеспечение стабильного выходного напряжения, неизменного при изменениях входного напряжения и нагрузки. Для этого используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая регулирует длительность импульсов, подаваемых на управляющий транзистор. Увеличение длительности импульсов повышает поток энергии через дроссель, в результате чего среднее выходное напряжение растёт. Управление осуществляется в режиме замкнутой петли, предусматривающем непрерывный мониторинг параметров и внесение корректировок для поддержания стабильности.

Выбор частоты широтно-импульсной модуляции опирается на компромиссное сочетание параметров — габаритов пассивных компонентов, уровня помех и точности регулировки. При возрастании частоты уменьшаются размеры индуктивностей и конденсаторов, однако одновременно увеличиваются потери при переключении в силовых элементах и усложняется система отвода тепла. Частота 62,5 кГц, применённая в рассматриваемой работе, представляет собой оптимальный баланс технической осуществимости, компактности и эффективности используемой платформы.

Импульсный стабилизатор, функционирующий в определённом тепловом режиме, предъявляет точные требования к тепловому сопротивлению всех своих компонентов, при этом транзистору и диоду отводится ведущая роль в процессе рассеяния энергии. Для устойчивой работы устройства важны точный расчёт тепловых характеристик этих элементов, а также эффективный теплоотвод, который достигается с помощью правильно подобранных по форме и площади радиаторов. Такой подход значительно увеличивает эксплуатационный срок стабилизатора.

Проблема электромагнитной совместимости заслуживает отдельного анализа. Импульсный режим работы провоцирует появление напряжений с высокими скоростями нарастания, ведущих к возникновению радиопомех. Наличие таких помех способно оказывать влияние на работу стабилизатора и распространяться в окружающей среде. Для ослабления этих воздействий применяются: ферритовые кольца, экранирование, рациональная компоновка дорожек печатных плат с целью сокращения петель тока и размещение фильтров на входах и выходах преобразователя.

В условиях промышленного применения критически важна высокая надежность функционирования блока питания. Именно она является одним из основных факторов, определяющих его конструкцию и схемотехнику. В этом контексте, выбор топологии понижающего стабилизатора стал оптимальным для поставленной задачи, обеспечивая стабильную и регулируемую подачу питания, высокий КПД и компактный дизайн устройства. Следует отметить, что помимо понижающих стабилизаторов, существуют и иные топологии импульсных преобразователей. Выбор схемы – повышающей (Boost), инвертирующей (Buck-Boost) или более сложных вариантов, таких как SEPIC либо Сик-преобразователи – главным образом зависит от требований к выходным параметрам и условиям эксплуатации. Однако анализ представленных процессов и их характеристик показал, что понижающая топология наиболее оптимальна и лучше всего подходит для решения задачи с учетом поставленных требований.

Расчетные параметры системы получили подтверждение как в аналитических вычислениях, так и в экспериментальной проверке. Выбор элементов — дросселя, конденсатора, ключевых компонентов и управляющего контроллера — обусловлен техническими характеристиками, доступностью на рынке и надежностью работы. Применение микроконтроллера ATmega328P на базе платформы Arduino Nano обеспечивает необходимый уровень точности управления и гибкости настройки при достаточно низкой сложности

реализации системы в целом. Использование устройств более высокой мощности признано избыточным, а также нежелательным ввиду усложнения программирования и отладки.

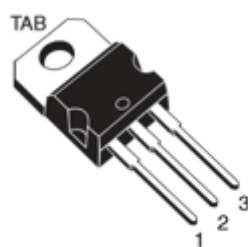
В заключение необходимо отметить, что разрабатываемый стабилизатор представляет собой сложенный инженерный продукт, построенный на основе теоретических основ работы импульсных преобразователей и практических аспектов их реализации. Указанные параметры стабилизатора способствуют достижению выраженных результатов, повышают стабильность во всех пределах нагрузки и напряжения и удовлетворяют современные требования источников питания как в лабораторной, так и в прикладной электронике.

2.3. Выбор силового транзистора

Для эффективной работы устройства ключевым является правильный выбор силового транзистора. Учитывая высокую частоту ШИМ (62,5 кГц), необходимо отдать предпочтение компоненту с минимальной паразитной ёмкостью. Это позволит снизить требования к управляющей схеме и обеспечит быстрое и чёткое переключение.

Помимо ёмкости, важно обратить внимание на сопротивление канала в открытом состоянии (эмиттер-коллектор). Чем оно меньше, тем меньше будут потери мощности и, соответственно, тепловыделение транзистора. Однако, первостепенное значение имеют максимальный допустимый ток и рабочее напряжение. Превышение этих параметров может привести к выходу транзистора из строя.

В данной работе был выбран IGBT транзистор STGB19NC60HDT4. Этот компонент, выполненный в корпусе ТО-220, обладает встроенным защитным диодом. Он способен выдерживать напряжение до 600 В и ток до 19 А. При температуре 100°C падение напряжения насыщения составляет 2,5 В.



TO-220

Рисунок 19 биполярный транзистор с изолированным затвором(в корпусе TO 220)

Статические характеристики транзистора.

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)CES}$	Collector-emitter breakdown voltage ($V_{GE} = 0$)	$I_C = 1 \text{ mA}$	600			V
$V_{CE(sat)}$	Collector-emitter saturation voltage	$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 12 \text{ A}$		1.8	2.5	V
		$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 15 \text{ A}$		2		
		$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 30 \text{ A}, T_J = 100^\circ \text{C}$		2.5		
		$V_{GE} = 15 \text{ V}, I_C = 12 \text{ A}, T_J = 125^\circ \text{C}$		1.6		
$V_{GE(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250 \mu\text{A}$	3.75		5.75	
I_{CES}	Collector cut-off current ($V_{GE} = 0$)	$V_{CE} = 600 \text{ V}$			150	μA
		$V_{CE} = 600 \text{ V}, T_J = 125^\circ \text{C}$			1	mA
I_{GES}	Gate-emitter leakage current ($V_{CE} = 0$)	$V_{GE} = \pm 20 \text{ V}$			± 100	nA
$g_{fs} (1)$	Forward transconductance	$V_{CE} = 15 \text{ V}, I_C = 12 \text{ A}$		5		S

Динамические характеристики

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
--------	-----------	-----------------	------	------	------	------

C _{ies}	Input capacitance	V _{CE} = 25 V, f = 1 MHz, V _{GE} = 0	-	1180	-	pF
C _{oes}	Output capacitance		-	130	-	
C _{res}	Reverse transfer capacitance		-	36	-	
Q _g	Total gate charge	V _{CE} = 390 V, I _C = 5 A, V _{GE} = 15 V,	-	53	-	nC
Q _{ge}	Gate-emitter charge		-	10	-	
Q _{gc}	Gate-collector charge		-	23	-	

Рисунок 15 – Техническая спецификация STGB19NC60HDT4.

Благодаря своим характеристикам, транзистор STGB19NC60HDT4 идеально подходит для использования в качестве силового ключа Q1. Его низкое сопротивление в открытом состоянии – всего 24 мОм при 2,5 В и 19 А – существенно повышает эффективность работы источника питания, как показано на рисунке 16. Несмотря на относительно высокую входную ёмкость затвора (1180 пФ), при использовании подходящего драйвера, обеспечивающего эффективную зарядку и разрядку, транзистор стабильно работает на частоте 62,5 кГц. Кроме того, значительный запас по току и напряжению гарантирует надежность и долговечность компонента в данной схеме.

2.4 Выбор индуктивности

В качестве силового дросселя выберем существующий на рынке проволочный дроссель 8121-RC Рис. 20



Рисунок 20 8121-RC - Дроссель: проволочный, 1мГн, 20А, 7мОм, ТНТ, Шаг:30,48x17,78 мм

2.5 Выбор выходного конденсатора

Чтобы обеспечить стабильную и надежную работу устройства, важно правильно подобрать конденсатор. Рабочее напряжение конденсатора должно быть как минимум равно, а лучше немного превышать максимальное выходное напряжение схемы. В нашем случае, для этой цели идеально подходит конденсатор емкостью 1800 мкФ и рабочим напряжением 35 В. Этот конденсатор также обладает низким эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) в 28 мОм, что положительно скажется на его эффективности. Внешний вид конденсатора можно увидеть на рисунке 21.



Рисунок 21 – Выходной конденсатор есар

Итак, мы выбрали конденсатор есар с емкостью 1800 мкФ и рабочим напряжением 35 В, который соответствует нашим требованиям и обеспечит надежную работу устройства.

2.6 Расчет усилителя шунта

Поскольку напряжение, вырабатываемое токоизмерительным шунтом, оказывается недостаточным, достичь желаемой точности измерений становится крайне затруднительно. Поэтому мы применим зарекомендовавшую себя практику, которая давно нашла свое место в схемах стабилизаторов и высокоточных измерительных устройств [17].

Параметры схемы усиления, считающиеся предпочтительными, можно выразить с помощью следующего уравнения (14):

$$U_{\text{вых}} I_{\text{н}} R_{\text{ш}} = U_{\text{н}} \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

Где:

- $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение операционного усилителя, которое мы ограничим значением в 5 вольт.
- $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки. В нашем случае, мы исходим из максимального тока источника, равного 10 Амперам.
- $R_{\text{ш}}$ - сопротивление шунта.
- R_1, R_2 - сопротивления резисторов в схеме усиления.

Подставляя известные значения в формулу, получаем:

$$U_{\text{вых}} = 10 (0.01 \cdot 5000 / 100) = 5 \text{ В}$$

В качестве операционного усилителя (ОУ) мы выбрали LM358. Этот выбор обусловлен его доступностью и низкой ценой. В целом, для данной задачи подойдет практически любой ОУ общего назначения.

2.7 Расчет и выбор остальных элементов

В состав электрической схемы выпрямителя включён полупроводниковый элемент STTH 2002D, который обеспечил высокую степень устойчивости и надёжность конструкции. Высокая степень защиты данного полупроводника, способности к образованию слаботочного потока и теплоотведению позволили устройству справляться с высокими нагрузками, поддерживать высокую производительность в различных условиях эксплуатации, что позитивно сказывается на сроках службы всего устройства. Надёжный запас прочности в пределах (20 А, 1000 В) минимизирует вероятность перегрева и преждевременного выхода устройства из строя.

Структура управления выходным напряжением осуществляется посредством делителя, обеспечивающего на выходе стабильные 5 В при предельном уровне нагрузки. Расчет данного делителя основывался на формуле (15):

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (15)$$

В данной формуле символ U представляет входной потенциал, а U_2 - выходной. При условии, что величина R_1 составляет 1 кОм, сопротивление R_2 рассчитывается по следующей формуле $R_2 = (R_1 \cdot U_2) / (U - U_2) = (1000 \cdot 5) / (30 - 5) = 200 \text{ Ом}$.

В нашей работе применяется независимый источник питания на 5 вольт, служащий для обеспечения функционирования микроконтроллера,

драйвера и жидккристаллического дисплея. Подходящим решением выступает стабилизатор напряжения с выходными параметрами 5 вольт и токовой нагрузкой до 1 ампера, как показано на рисунке 22. Благодаря его использованию стабильное напряжение, необходимое для всех компонентов, сохраняется в пределах допустимых значений при колебаниях напряжения в сети.



Рисунок 22 – Стабилизатор напряжения 78D05L 5 вольт 1 ампер.

Для защиты цепи мы выбрали предохранитель Пр1, рассчитанный на ток 2 ампера. Чтобы определить ток срабатывания предохранителя, мы использовали формулу 31

$$I = 1,95A \frac{P}{U} \frac{450}{230} \quad (16)$$

Мощность нагрузки составляет 450 ватт. Такой запас мощности позволяет избежать ложных срабатываний предохранителя.

Рассчитаем ток, потребляемый нагрузкой, по формуле: $I = P / U = 450 \text{ Вт} / 230 \text{ В} = 1,95 \text{ А}$. (16)

Согласно произведённым вычислениям, величина электрического тока оказалась равной 2 ампера. Для защиты электрической схемы применён быстродействующий предохранитель марки 179021.2, имеющий керамическое покрытие (см. рис. 23). Конструктивные характеристики устройства рассчитаны на токовой параметр 2 ампера и напряжение, превышающее 250 вольт, что соответствует установленным требованиям электробезопасности.



Рисунок 23 – Предохранитель в керамическом корпусе

Напряжение управления на IGBT транзистор Q1 подаем с помощью драйвера. UCC27511AD Рис 24.

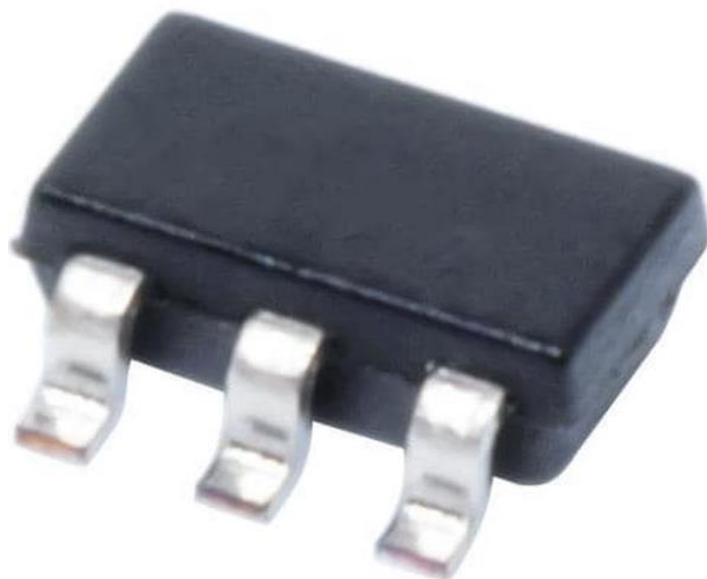


Рис 24 драйвер IGBT UCC27511AD

Этот драйвер обеспечивает скорость коммутации 7ns. И ток до 8 А. что вполне достаточно для текущего проекта.

3. Разработка управляющей программы для микроконтроллера и разработка программного обеспечения для компьютера

3.1 Разработка управляющей программы

Микроконтроллер служит центральным компонентом системы, осуществляющим генерацию и управление широтно-импульсной модуляцией. Схематичное изображение его работы представлено на рисунке 23.

Программное обеспечение для микроконтроллера будет создано в среде разработки Arduino IDE. Выбор этой платформы обусловлен её бесплатностью, открытостью и широкой поддержкой AVR-микроконтроллеров. Программирование будет вестись на упрощенном варианте C++, а использование доступных библиотек значительно ускорит и упростит процесс разработки.

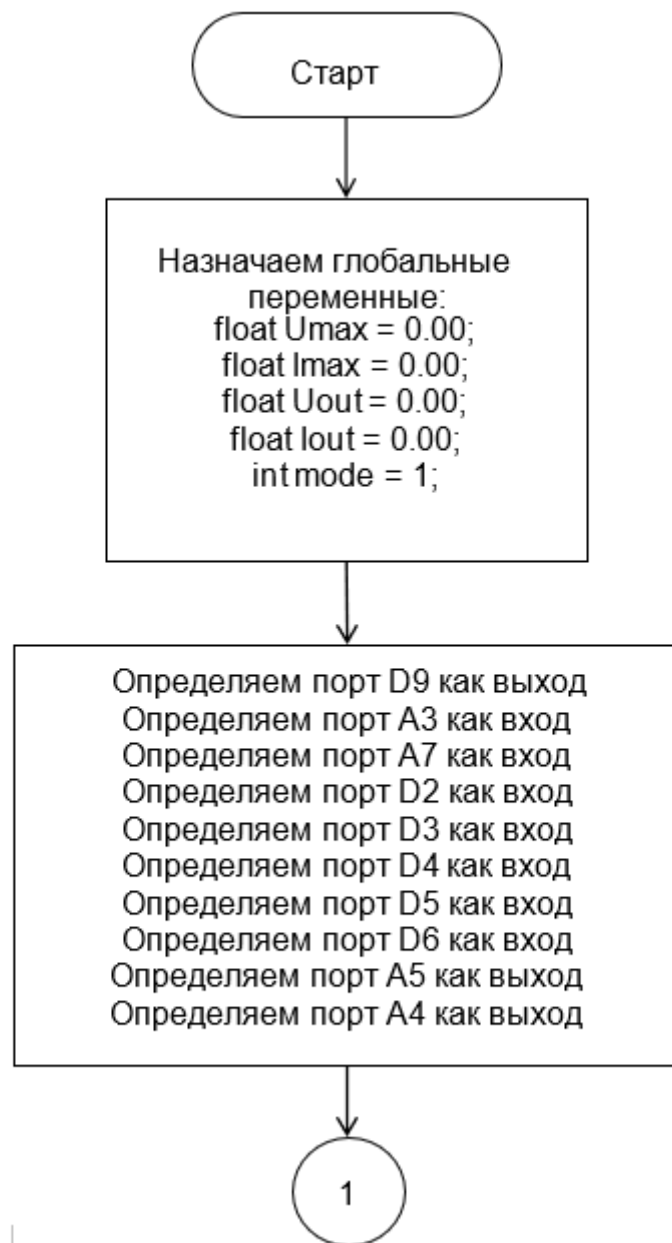


Рисунок 25 – Блок-схема программы управления

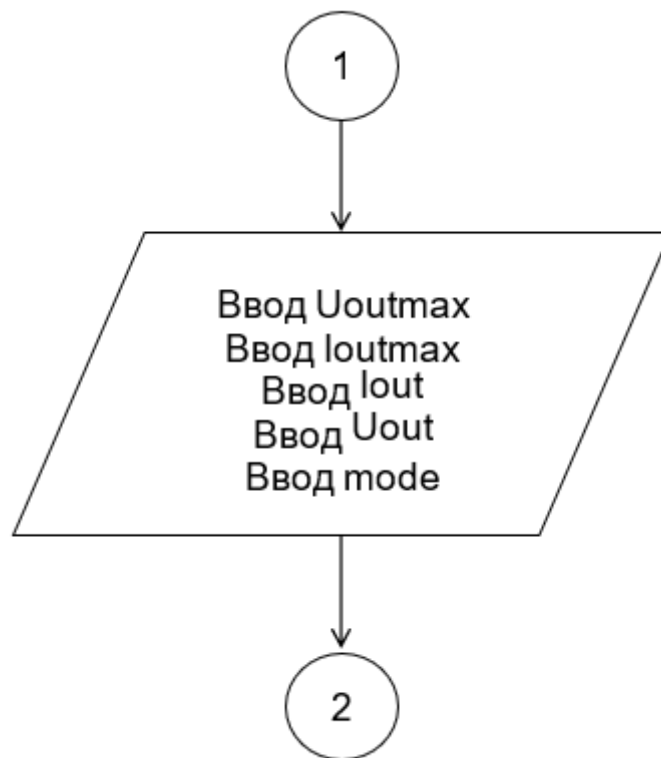


Рисунок 26 – Блок-схема программы управления

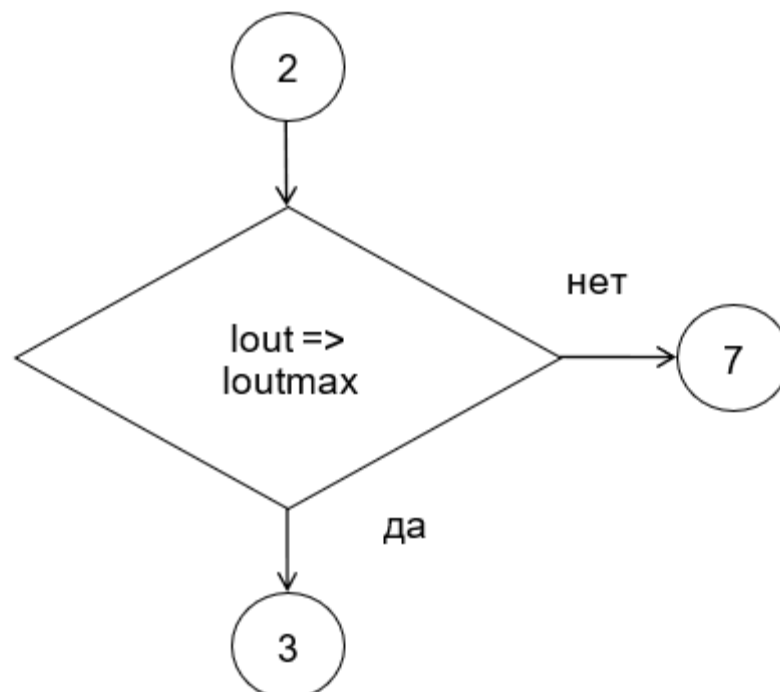


Рисунок 27 – Блок-схема программы управления

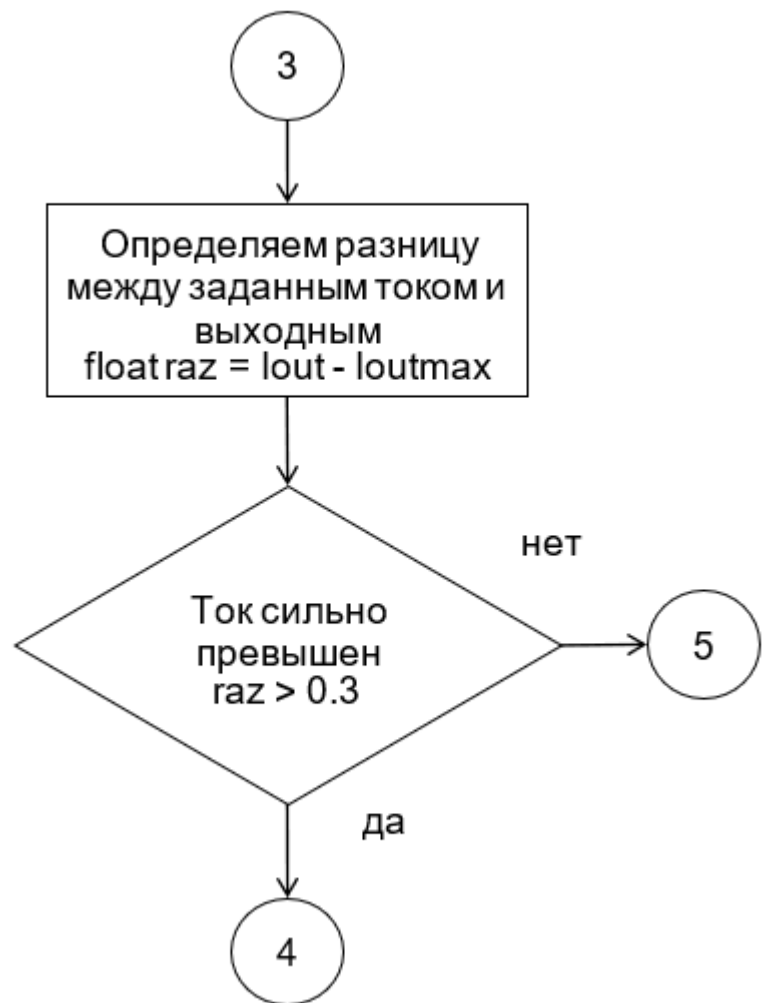


Рисунок 28 – Блок-схема программы управления

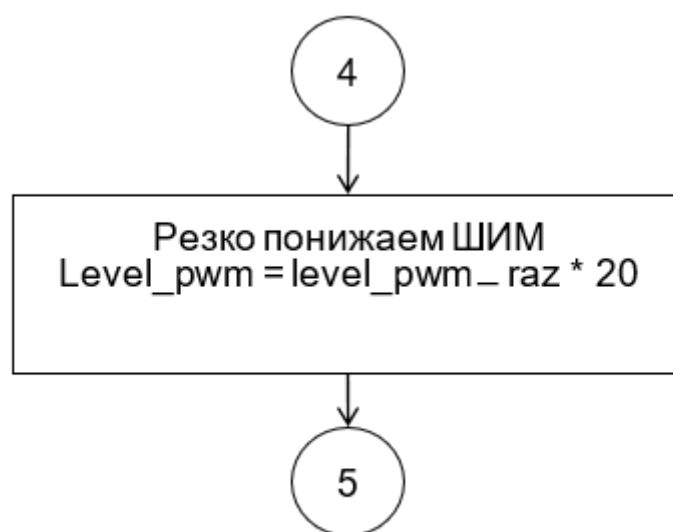


Рисунок 29– Блок-схема программы управления

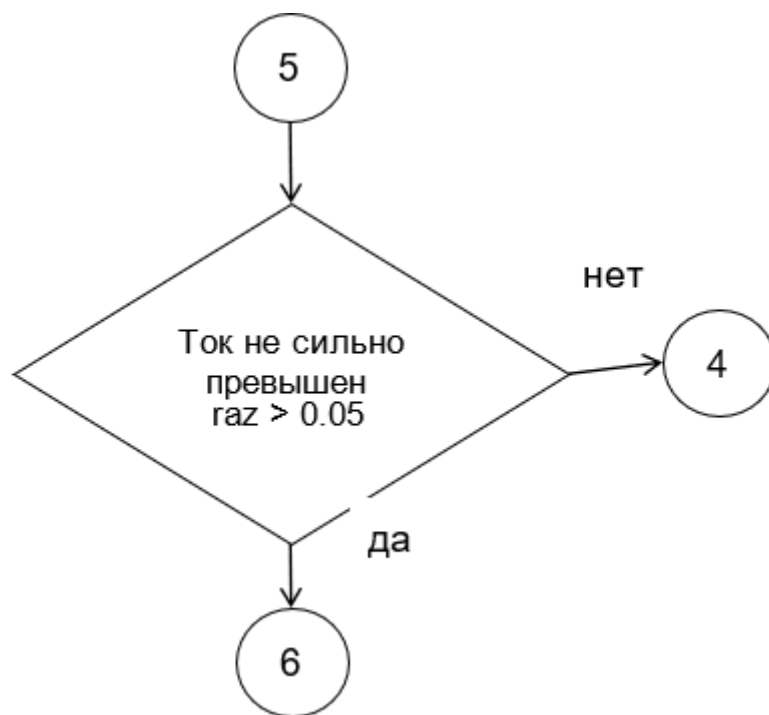


Рисунок 30 – Блок-схема управляющей программы

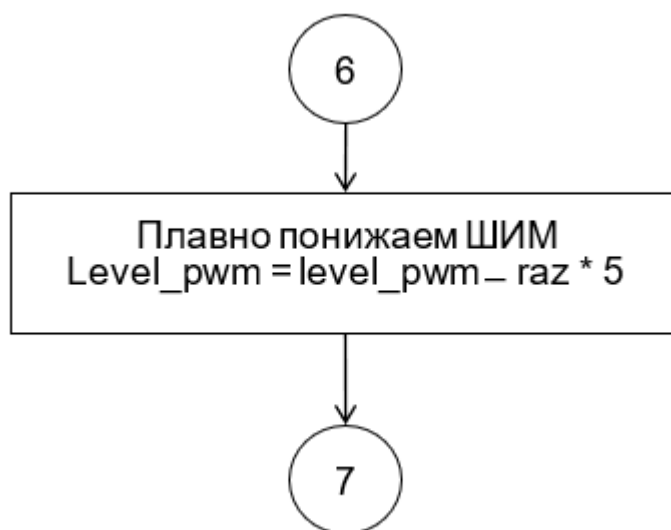


Рисунок 31 – Блок-схема программы управления

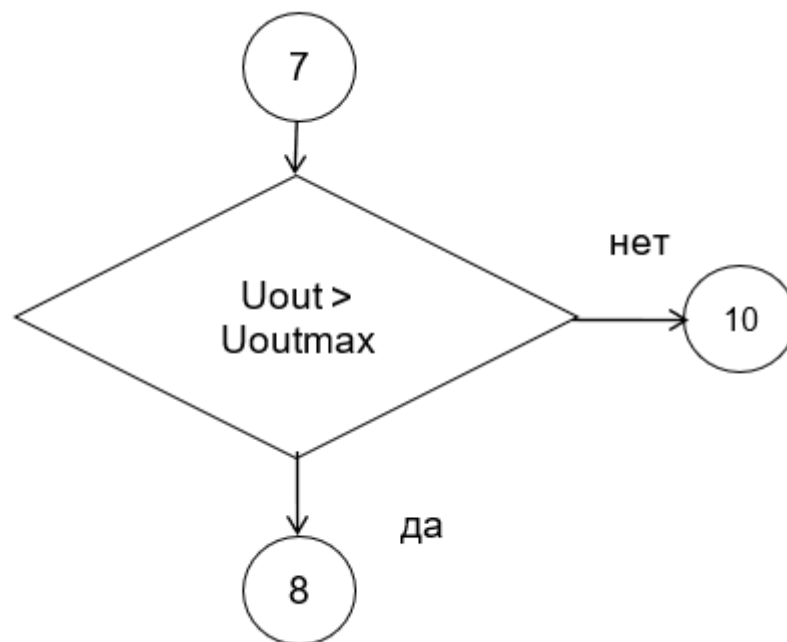


Рисунок 32– Блок-схема программы управления

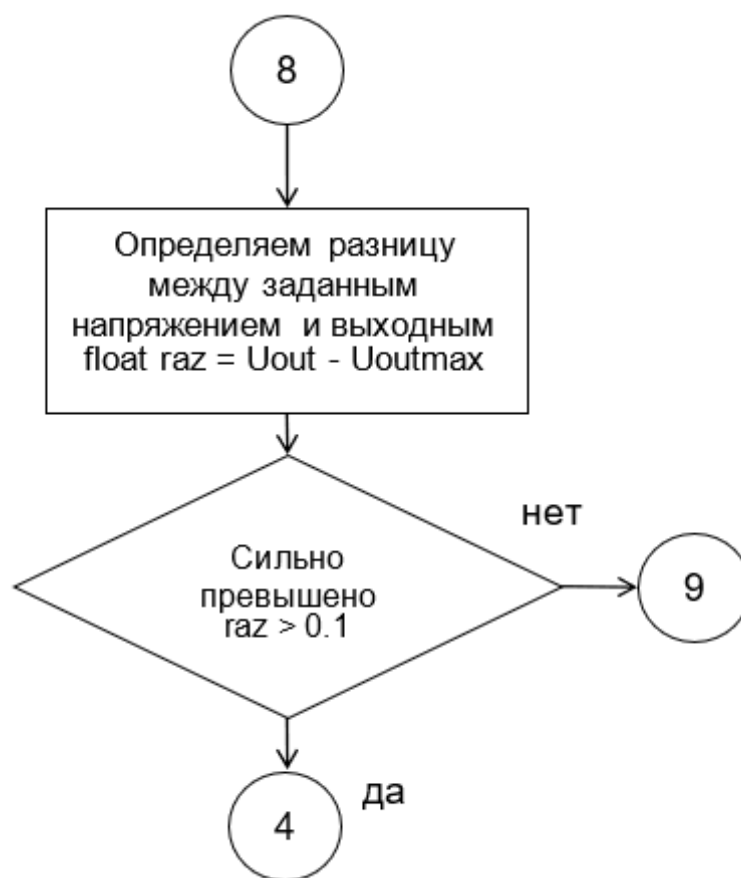


Рисунок 33 – Блок-схема программы управления

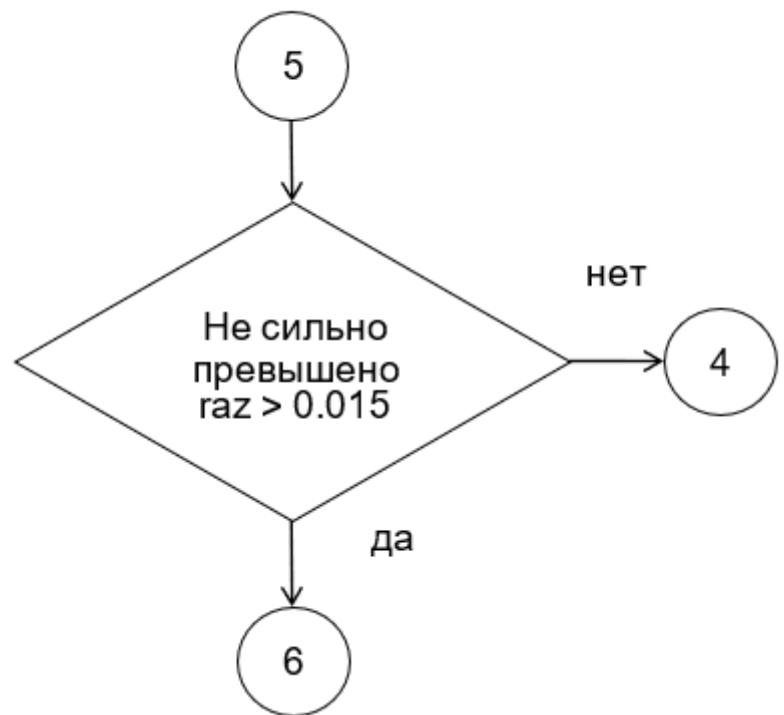


Рисунок 34 – Блок-схема программы управления

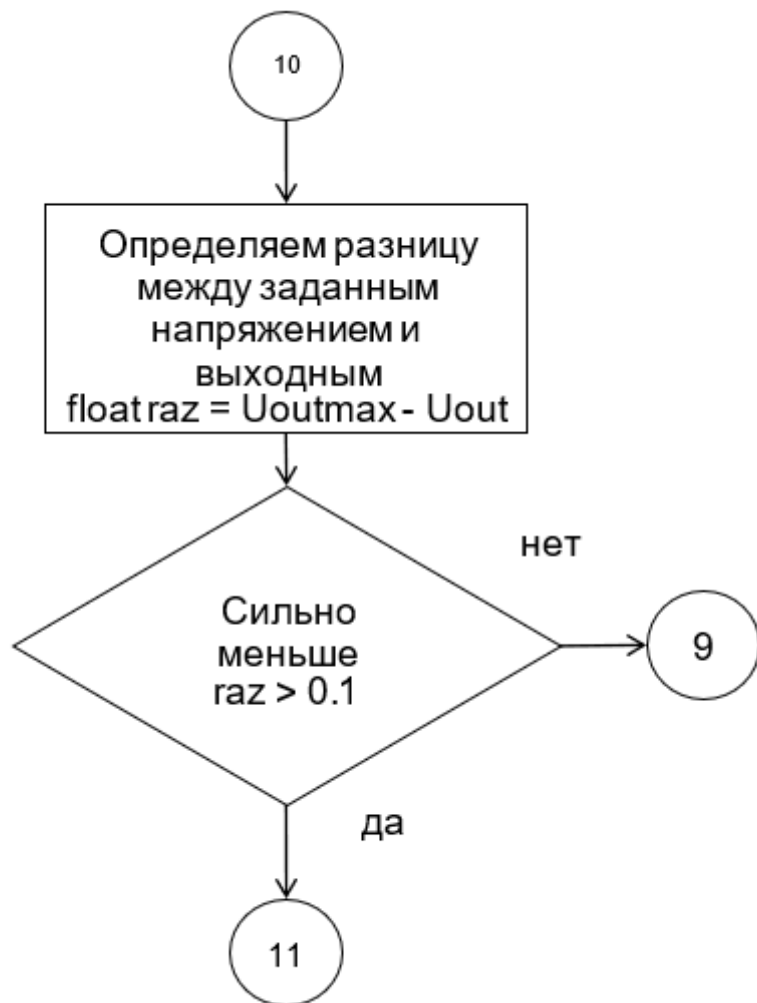


Рисунок 35 – Блок-схема программы управления

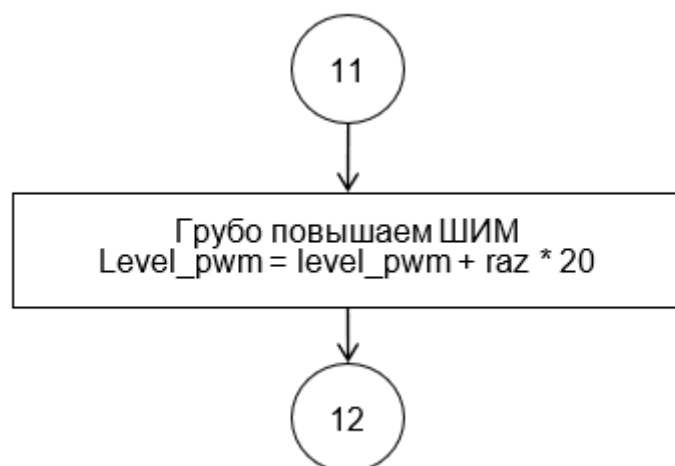


Рисунок 36 – Блок-схема программы управления

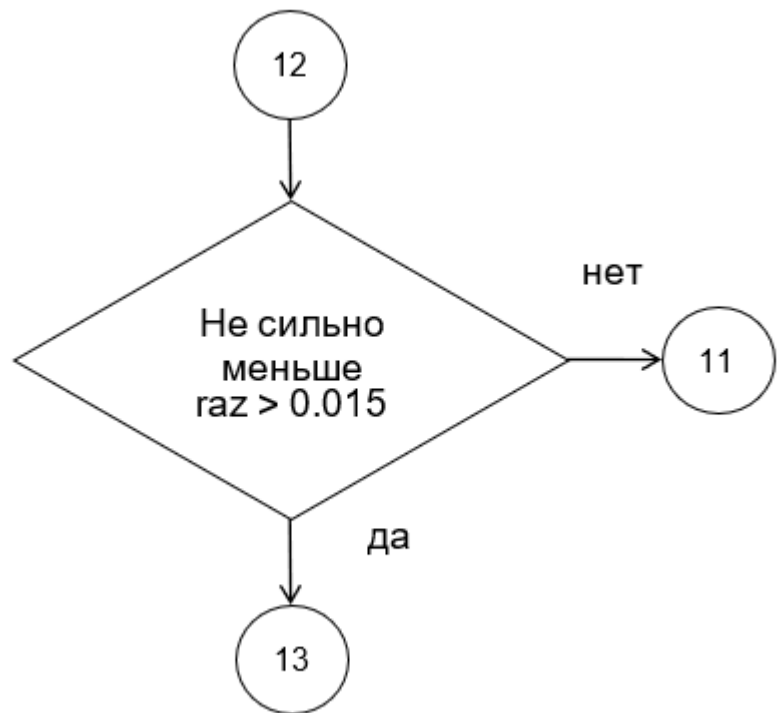


Рисунок 37 – Блок-схема программы управления

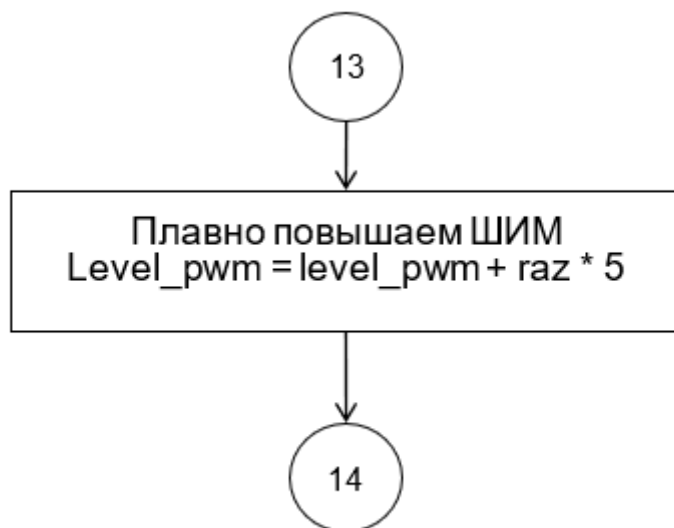


Рисунок 38 – Блок-схема программы управления

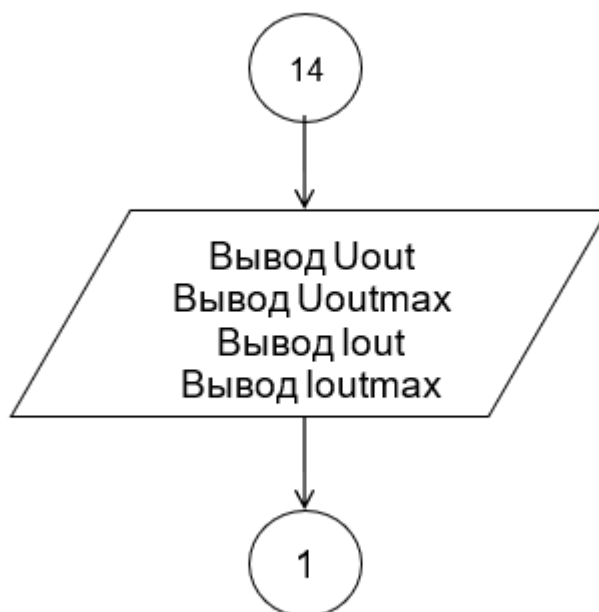


Рисунок 39 – Блок-схема программы управления

В приложении А вы найдете полный код управляющей программы. Он снабжен подробными комментариями, которые помогут вам разобраться в логике работы каждого блока и понять, как программа взаимодействует с оборудованием.

4. Разработка печатной платы

В процессе реализации проекта была создана печатная плата с помощью KiCad — бесплатного программного обеспечения для автоматизированного проектирования (САПР). Выбор данной платформы был обусловлен её доступностью, обширной библиотекой компонентов и открытой лицензией GNU [20]. KiCad продемонстрировал высокую эффективность в области электронных разработок.

При создании печатной платы был выбран фольгированный стеклотекстолит, обладающий двусторонним покрытием. Плата обладает толщиной в 1,5 миллиметра и размерами 165 на 120 миллиметров. В процессе производства применялась технология, предполагающая фотолитографию для формирования медных дорожек и последующее химическое травление, протекающее с целью удаления избыточного медного слоя.

Для более детального изучения расположения и габаритов элементов была разработана объемная модель печатной платы, представленная на рисунке 40. Такой подход предоставил возможность всесторонне проанализировать размеры и распределение компонентов, а также своевременно выявить потенциальные трудности, способные возникнуть в ходе сборки.

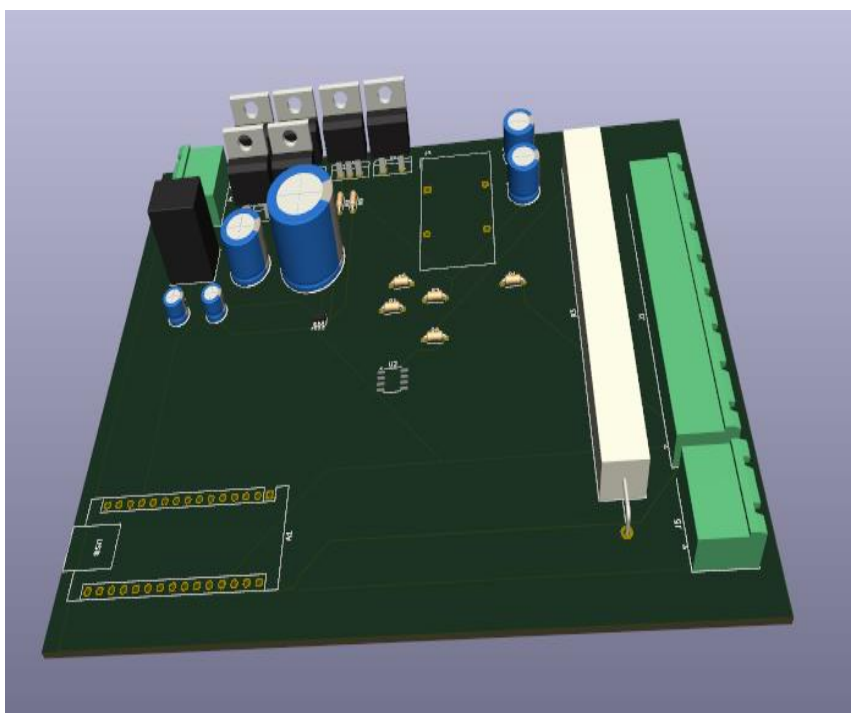


Рисунок 40 – Трехмерная модель печатной платы импульсного источника питания

5. Разработка и моделирование корпуса устройства

Чтобы создать физическую оболочку для нашего устройства, мы использовали AutoCAD. Эта мощная программа позволила нам детально спроектировать корпус, создав точный чертеж, который послужит основой для производства. Мы выбрали листовую сталь толщиной полмиллиметра в качестве материала, учитывая её прочность и удобство обработки.

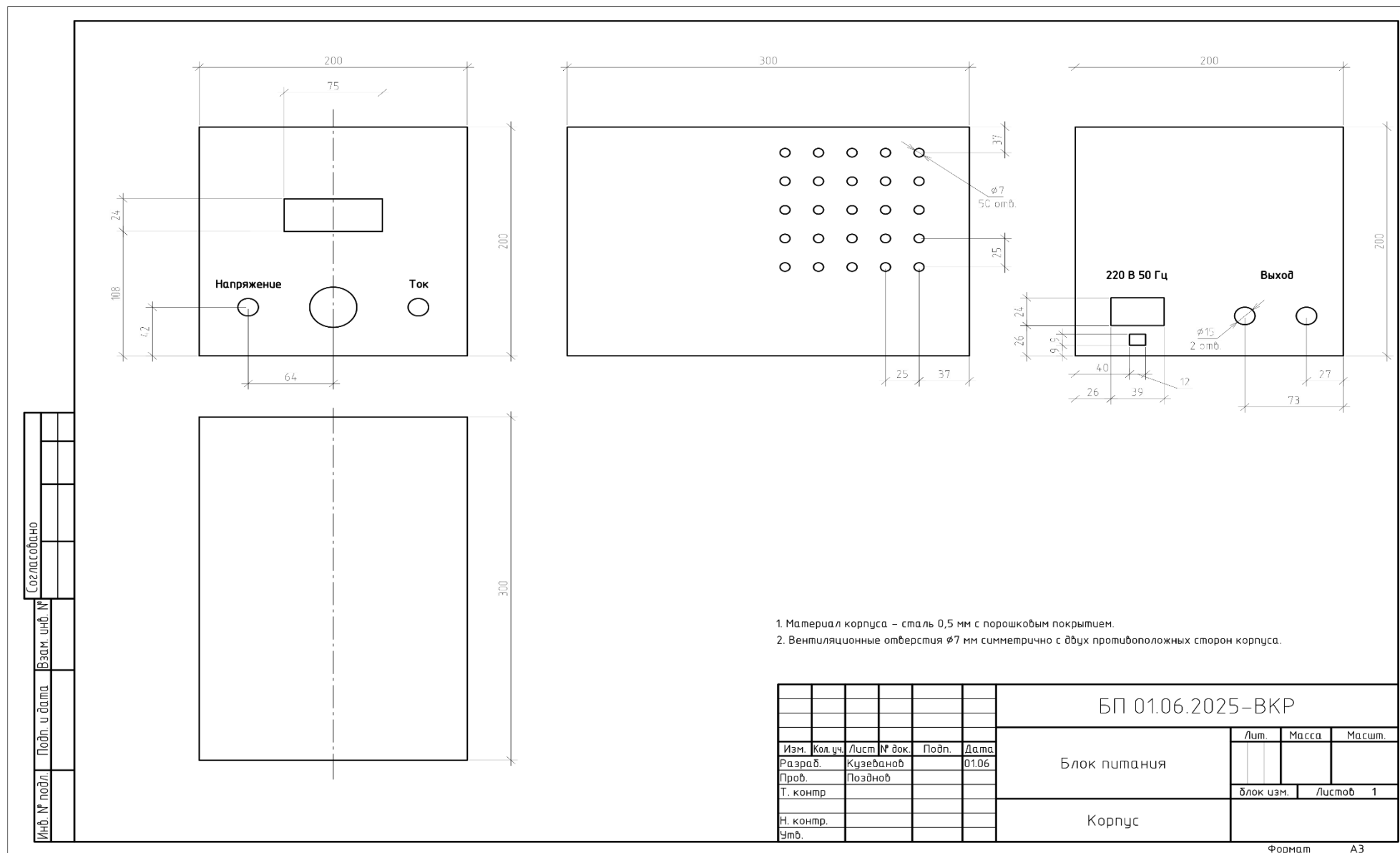


Рисунок 41 – Чертеж корпуса импульсного источника питания на микроконтроллере

На лицевой панели устройства удобно расположены отверстия для кнопок управления, с помощью которых легко перемещаться по меню настроек. Рядом предусмотрено место для небольшого жидкокристаллического дисплея, отображающего важную информацию такую как выходное напряжение и выходной ток информация постоянно обновляется и соответствует фактическим показателям

Чтобы устройство не перегревалось, в корпусе предусмотрены вентиляционные отверстия, обеспечивающие естественную циркуляцию воздуха[16]. Кроме того, сам корпус разработан таким образом, чтобы защищать устройство от помех, как извне, так и нагрузку, которую оно питает[15].

На рисунке 42 можно увидеть, как выглядит лицевая панель блока питания.

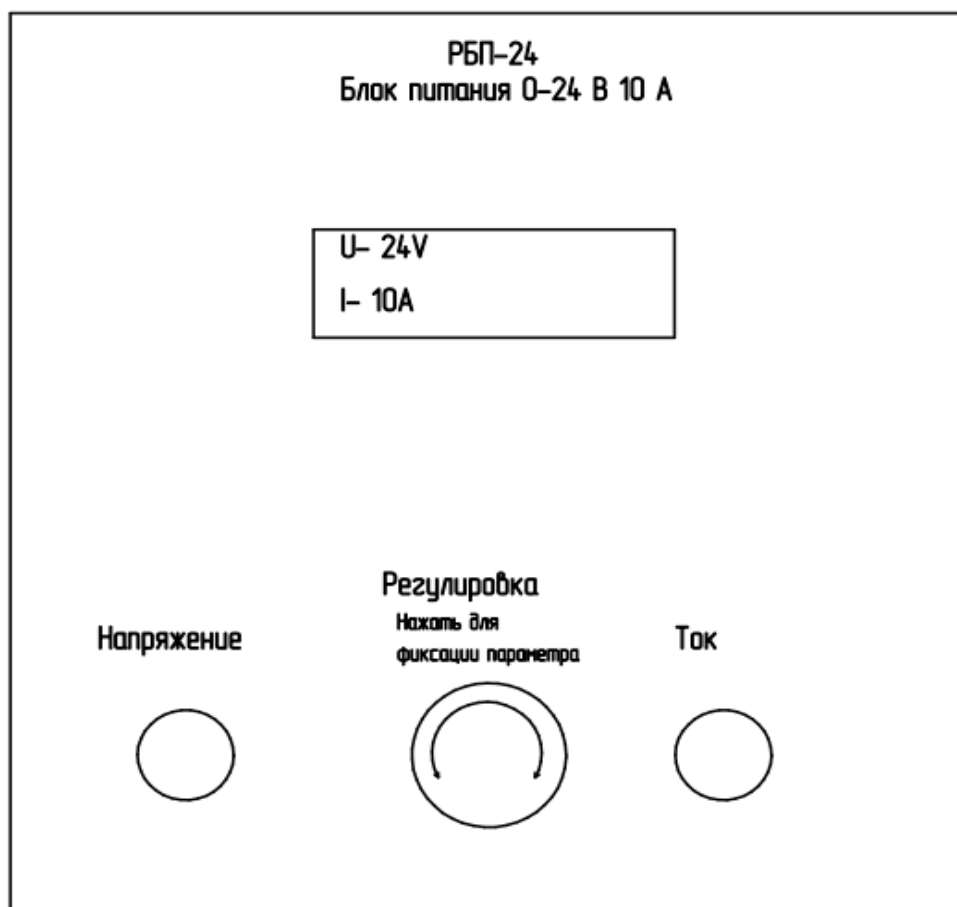


Рисунок 42 Лицевая панель блока питания.

Для установки выходных параметров напряжения и тока необходимо нажать соответствующую кнопку, с помощью ручки регулировка выставить необходимые значения по напряжению от 0.1 В до 24 В и по току от 0.1 до 10 А нажатием на ручку регулировка зафиксировать выбранные значения. Блок питания переключится на установленные параметры.

Заключение

В процессе выполнения настоящей выпускной квалификационной работы был разработан и испытан сетевой импульсный источник питания с управлением, осуществляемым с помощью микроконтроллера. Эта работа охватила множество направлений, среди них — разработка силового блока, конструирование корпуса и создание программного обеспечения для персонального компьютера.

В системе управления центральным элементом считают микроконтроллер, который поддерживает именно ШИМ-режим, что позволяет гибко настраивать выходные параметры. Его задача — выполнять замеры тока и напряжения, проводить сравнительный анализ с заданными параметрами и обеспечивать корректировки в режиме реального времени на основе алгоритма регулировки.

Применение импульсной схемотехники вызвало существенно возросшую общую эффективность оборудования и сократило рассеивание тепла. Выработанный алгоритм управления, закреплённый в виде блок-схемы, обеспечивает надёжную и стабильную работу источника питания. Реальные параметры функционирования визуализируются на жидкокристаллическом дисплее, упрощая слежение и оценку состояния оборудования.

Разработанный с соблюдением современных стандартов питательный модуль, обладающий широкими возможностями регулировки электрических характеристик и мониторинга, может автоматически настраиваться на изменение параметров нагрузки. Кроме того, прибор позволяет проводить комплексное исследование электропараметров в различных условиях эксплуатации, включая тестирование на предельных значениях параметров. Модуль функционирует в трёх базовых режимах: поддержке фиксированной

силы тока, сохранении определённого уровня напряжения и защите против чрезмерного тока. Наличие такого разнообразия функций обеспечивает оптимизацию работы в широком спектре задач.

В процессе выполнения работы приобрели практические навыки разработки электронной схемы, расчета элементной базы, подбор элементной базы существующей в современном рынке. Приобрели практические навыки работы в различных автоматизированных системах проектирования и разработки электронных схем и корпусов приборов. Знание различных программных пакетов, предназначенных для проектирования печатных плат и моделирования электронных схем, открывает широкие возможности для создания сложных и функциональных устройств. В дальнейшем приобретенный опыт поможет решать различные технологические задачи в условиях производства на рабочем месте и в бытовых условиях при реализации различных необходимых в быту проектах.

Список используемой литературы

1. Аполлонский, С.М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебное пособие / С.М. Аполлонский. - СПб.: Лань, 2018. - 592 с.
2. Белов, Н.В. Электротехника и основы электроники: Учебное пособие / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. - СПб.: Лань, 2018. - 432 с.
3. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для бакалавров / Л.А. Бессонов. - М.: Юрайт, 2015. - 701 с.
4. Буртаев, Ю.В. Теоретические основы электротехники: Учебник / Ю.В. Буртаев, П.Н. Овсянников; Под ред. М.Ю. Зайчик. - М.: ЛИБРОКОМ, 2016. - 552 с.
5. Гальперин, М.В. Электротехника и электроника: Учебник / М.В. Гальперин. - М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2018. - 480 с.
6. Ермуратский, П.В. Электротехника и электроника / П.В. Ермуратский, Г.П. Лычкина, Ю.Б. Минкин. - М.: ДМК Пресс, 2018. - 416 с.
7. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника: Учебное пособие для студ. высш. проф. образования / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. - М.: ИЦ Академия, 2016. - 400 с.
8. Иньков, Ю.М. Электротехника и электроника: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования / Б.И. Петленко, Ю.М. Иньков, А.В. Крашенинников. - М.: ИЦ Академия, 2013. – 368 с.
9. Колистратов, М.В. Электротехника и электроника: электротехника на оборудовании National Instruments: Лабораторный практикум / М.В. Колистратов, Л.А. Шапошникова; Под ред. Л.А. Шамаро. - М.: ИД МИСиС, 2016. - 79 с.

10. Кузовкин, В.А. Электротехника и электроника: Учебник для бакалавров / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов. - М.: Юрайт, 2016. - 431 с.
11. Лоторейчук, Е.А. Теоретические основы электротехники.: Учебник / Е.А. Лоторейчук. - М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 320 с.
12. Миловзоров, О.В. Электроника: Учебник для бакалавров / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. - М.: Юрайт, 2017. - 407 с.
13. Морозова, Н.Ю. Электротехника и электроника: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования / Н.Ю. Морозова. - М.: ИЦ Академия, 2017. - 288 с.
14. Немцов, М.В. Электротехника и электроника: Учебник для студ. образовательных. учреждений сред. проф. образования / М.В. Немцов, М.Л. Немцова. - М.: ИЦ Академия, 2017. - 480 с.
15. Новожилов, О.П. Электротехника и электроника: Учебник для бакалавров / О.П. Новожилов. - М.: Юрайт, 2016. - 653 с.
16. Покотило, С.А. Справочник по электротехнике и электронике / С.А. Покотило. - Рн/Д: Феникс, 2018. - 282 с.
17. Прянишников, В.А. Теоретические основы электротехники: Курс лекций / В.А. Прянишников. - СПб.: КОРОНА-принт, 2015. - 368 с.
18. Розум, Т.Т. Сборник задач по электротехнике и электронике: Учебное пособие / Ю.В. Бладыко, Т.Т. Розум, Ю.А. Куварзин; Под общ. ред. Ю.В. Бладыко. - Мн.: Вышэйшая шк., 2017. - 478 с.
19. Синдеев, Ю.Г. Электротехника с основами электроники: Учебное пособие для профессиональных училищ, лицеев и колледжей / Ю.Г. Синдеев. - Рн/Д: Феникс, 2018. - 407 с.
20. fresh-web-studio.github.io/artemsdobnikov/math/buck-converter
Обращение 1.05.2025.

21. Guido, S.O. A Microcontroller based DC power supply [Electronic resource] URL: https://www.ibiblio.org/pub/linux/docs/linuxfocus/Archives/lf-2002_11-0251.pdf (date treatment: 30.05.2025)
22. Harendran, T.K. Precision MicroController Power Supply Unit [Electronic resource] URL: <https://www.electroschematics.com/precisionmicrocontroller-power-supply-unit/> (date treatment: 30.05.2025)
23. Muhhamad, R.A. Design and development of a microcontroller based regulated high voltage power supply. [Electronic resource] URL: https://www.researchgate.net/publication/265469067_Design_and_development_of_a_microcontroller_based_regulated_high_voltage_power_supply_for_GM_detectors (date treatment: 30.05.2025)
24. Proft, V.A. Development of a new microcontroller power supply // 6th International Particle Accelerator Conference IPAC2015, Richmond, VA, USA JACoW Publishing ISBN: 978-3-95450-168-7.
25. Suraje, S.S. Variable Power Supply Using Microcontroller // International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR) ISSN: 23210869, Volume-2, Issue-12, December 2014.