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)

11.03.04 Электроника и робототехника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему **Адаптер для питания LED лент**

Обучающийся В.С. Зуев
(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

Объем 70 страниц, 40 рисунков, 1 таблица, 22 источника

Объектом исследования являются системы сетевой источник питания постоянного напряжения с выходными характеристиками U = 3 - 24 В, I = 0,1 - 1 А.

Цель работы - разработка оптимальной электрической схемы адаптера питания для LED лент.

Основной целью настоящей работы является разработка адаптера с регулируемым стабилизированным постоянным напряжением, что требует решения комплекса взаимосвязанных научных и технических задач. К числу важнейших этапов относится создание базовой структурной схемы устройства с дальнейшей детальной проработкой и оптимизацией каждого функционального блока. В рамках данной задачи предусмотрено проектирование подробной принципиальной электрической схемы адаптера, сопровождаемое всесторонним научным обоснованием выбора электронной компонентной базы. Не менее значимым является подготовка полного набора конструкторской документации, предназначенной для последующего изготовления печатного узла. Дополнительным обязательным этапом выступает проведение серии практических испытаний макета, позволяющих подтвердить функциональность и эффективность выбранных технических решений. Завершающей частью работы предусмотрена экспертная оценка готового устройства с позиции его эксплуатационной надежности, соблюдения требований безопасности и экономической целесообразности реализации предложенного решения.

Структурно дипломная работа состоит из трёх логически взаимосвязанных частей, каждая из которых ориентирована на поэтапное решение обозначенных выше задач. Первая часть включает формирование структурной концепции устройства, где приводится обоснование выбора оптимальной топологии, обеспечивающей требуемые характеристики

выходного напряжения. Второй раздел посвящён непосредственно разработке и подробному проектированию принципиальной схемы, при этом значительное внимание уделено всестороннему обоснованию применимости выбранных электронных компонентов с позиции их функциональных и эксплуатационных свойств. Завершающий раздел охватывает технологические аспекты разработки, включающие подготовку детализированных технических чертежей и документов, необходимых для последующего изготовления печатного узла, а также осуществление контрольных испытаний разработанного образца.

Для выполнения поставленных задач был использован специализированный программно-аналитический инструментарий, представленный средами Multisim 12.0 и Simulink. Данные программные комплексы позволяют на высоком профессиональном уровне моделировать, исследовать и оптимизировать рабочие параметры электротехнических схемных решений ещё на предварительной стадии проектирования, тем самым минимизируя возможные ошибки и увеличивая общую надёжность и эффективность устройства. В рамках аналитического этапа был произведён комплексный расчёт рабочих режимов, а также проведён анализ поведения электронных компонентов и узлов разрабатываемой схемы при различных условиях эксплуатации, что обеспечило необходимый уровень точности и достоверности проектных решений.

Аналитические исследования были выполнены посредством математического аппарата интегрально-дифференциального анализа с применением вычислительного программного обеспечения MathCad 2001, позволяющего провести точные расчеты и обеспечить надежность полученных данных. В рамках проведенного проектирования была разработана цифровая модель исследуемого адаптера, представленная в специализированном симуляционном программном средстве. На созданной модели осуществлялись экспериментальные испытания, в ходе которых детально анализировались режимы функционирования устройства и были зафиксированы количественные результаты.

Определены численные значения ключевых характеристик схемных компонентов, которые были подобраны на основании анализа ассортимента, доступного в современной розничной сети. Также описаны методические подходы к проектированию устройства и представлено детальное конструкторское решение печатной платы адаптера, включающее описание технологических операций и рекомендаций к изготовлению.

Содержание

Введение 3
1 Постановка задачи 5
1.1 Поиск и анализ технических параметров аналогичных устройств 5
1.1.1 Линейные источники питания 5
1.1.2 Способы регулирования выходного напряжения 9
1.1.3 Импульсные источники питания 15
1.1.4.Источник питания 22
1.1.5.Установка питания светодиодных лент 24
1.2.Критерии для разработки 25
1.3 Разработка структурной схемы 25
2 Конструкторское проектирование устройства 29
2.1 Разработка электрической принципиальной схемы 29
2.2 Выбор элементов устройства 34
2.3. Моделирование работы элементов схемы в среде имитационного моделирования 49
3. Технологический раздел 53
3.1. Технология разработки печатной платы 53
3.2 Разработка печатной платы 57
Заключение 68
Список используемой литературы 70

Введение

Адаптер выступает в качестве одного из ключевых элементов современной электронной аппаратуры, от эффективности работы которого зависит надежность всего комплекса устройств. Несмотря на внешнюю простоту задачи по проектированию вторичных источников электропитания, достижение одновременно высокой производительности, минимизации габаритов и повышенной степени надежности представляет собой серьезную инженерно-техническую проблему. Сложность обусловлена спецификой физических и технических процессов, характерных для систем преобразования и стабилизации электрической энергии, в особенности при реализации импульсных схем или систем, функционирующих на основе многоуровневой обратной связи.

Разработка высокоэффективного адаптера сопряжена с необходимостью комплексного учета и интеграции целого ряда разнообразных требований и технических условий, что существенно усложняет проектную деятельность. Среди ключевых аспектов, подлежащих обязательному учету, целесообразно выделить следующие:

– функциональные характеристики, определяемые назначением устройства и задачами, которые адаптер должен решать при интеграции в электронную систему;

– эксплуатационные показатели, охватывающие комплекс факторов внешней среды, долговечность, устойчивость работы, а также безопасность эксплуатации в различных режимах;

– требования конструктивно-технологического характера, предполагающие оптимальный подбор элементной базы, целесообразность выбранных технических решений и методов изготовления и монтажа компонентов.

Разработка адаптера требует внимательного учета всех этих аспектов и постоянного балансирования между ними, чтобы создать устройство, которое соответствует высоким стандартам эффективности и надежности.

В соответствии с поставленными техническими условиями, задачей исследования является проектирование адаптера, обеспечивающего регулируемое постоянное напряжение на выходе в пределах от 3 до 24 В при токе нагрузки от 0,1 до 1 А. Подобный источник питания востребован преимущественно для лабораторных испытаний, диагностики и профилактического обслуживания электронной аппаратуры.

На начальной стадии проектирования необходимо обоснованно решить вопрос о типе схемы, которая будет лежать в основе разрабатываемого адаптера: линейной или импульсной. Выбор определяется совокупностью таких критериев, как энергетическая эффективность, массогабаритные показатели, простота схемотехнической реализации и степень сложности интеграции устройств защиты и регулирования. Линейные схемы характеризуются простотой реализации и высоким качеством выходного сигнала, однако обладают низким коэффициентом полезного действия при существенной мощности нагрузки, что вызывает дополнительный нагрев элементов. Импульсные схемы обладают большей эффективностью, компактностью и значительно меньшими тепловыми потерями, но отличаются сложностью в реализации и повышенными требованиями к качеству элементов.

Целью данной работы является проектирование адаптера для LED лент. Для обеспечения необходимых параметров выбирается наиболее оптимальное схемотехническое решение с использованием доступных компонентов, позволяющее реализовать поставленную цель.

В задачи работы входит разработка схемы устройства, выбор компонентов, компьютерное моделирование и конструирование печатного узла.

1 Постановка задачи

При принятии решения в пользу импульсной топологии важнейшим шагом становится точный выбор схемного построения преобразователя. Среди многообразия возможных схемных решений на практике распространение получили однотранзисторные схемы с прямым или обратным ходом, схемы полумостового и полномостового типа, отличающиеся не только конструктивными особенностями, но и существенными различиями в показателях надежности, стоимости реализации и технических характеристиках.

После выбора конкретной топологии становится возможным приступать к проектированию специализированных подсистем, отвечающих за регулировку и стабилизацию выходных параметров, а также за защиту устройства при возникновении нештатных ситуаций (короткие замыкания, перегрузки и иные режимы с повышенным риском повреждения компонентов). В процессе проектирования предпочтение отдается схемам с возможностью простой настройки рабочих режимов и наличием встроенных механизмов защиты, обеспечивающих безопасную эксплуатацию в любых условиях.

1.1 Поиск и анализ технических параметров аналогичных устройств

1.1.1 Линейные источники питания

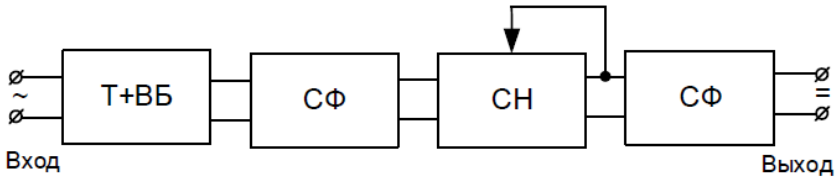
Линейные адаптеры предназначены для преобразования переменного сетевого напряжения посредством понижающих трансформаторов низкой частоты с последующим выпрямлением, фильтрацией и стабилизацией полученного напряжения. В адаптерах, не оснащённых стабилизаторами, выход нагрузки напрямую соединён с фильтром низкой частоты без дополнительной регулировки [1].

Особенность линейных стабилизаторов заключается в непрерывном контроле выходного напряжения, достигаемом благодаря специальному

регулирующему элементу, в роли которого обычно выступает транзистор. «Такой элемент включается либо последовательно, либо параллельно относительно нагрузки. Управление транзистором осуществляется сигналом обратной связи, позволяющим оперативно корректировать рабочие параметры и удерживать выходные характеристики напряжения на заданном постоянном уровне» [2].

«В некоторых случаях схемы линейных адаптеров дополняются импульсными стабилизаторами напряжения. Включение таких устройств обеспечивает повышение эффективности адаптеров и улучшение эксплуатационных характеристик. Современные стабилизаторы напряжения, применяемые в линейных адаптерах, могут основываться на специализированных интегральных микросхемах, обладающих высокой точностью и надёжностью регулировки выходных параметров. Использование подобных микросхем сокращает размеры устройства и улучшает стабильность его работы» [3].

Обобщенная структурная схема сетевого адаптера питания представлена на рисунке 1.



В - выпрямитель, Т - трансформатор, ВБ - вентильный блок, СФ – сглаживающие фильтры, СН - стабилизатор напряжения.

Рисунок 1 - Линейный адаптер

«В процессе проектирования устройств электропитания выбор типа стабилизатора напряжения определяется такими характеристиками, как рабочая мощность, требуемое номинальное значение напряжения, допустимые отклонения и уровень остаточных пульсаций выходного сигнала» [2]. В практике схемотехники возможно использование параметрических стабилизаторов, компенсационных или гибридных конструкций, сочетающих

признаки обоих упомянутых типов. Если реализуется комбинированная схема, предусматривается возможность функционирования регулирующего элемента как в линейном, так и в импульсном режиме управления. Каждый из рассмотренных способов стабилизации дополнительно способствует снижению амплитуды пульсаций выходного сигнала.

Функциональная роль трансформатора в схеме питания заключается в согласовании напряжений входной и выходной цепей, а также обеспечении их электрической изоляции посредством гальванической развязки. Конкретная конструкция предусматривает использование трансформатора понижающего типа, позволяющего подключать один из выходных выводов источника питания к заземляющему контуру. Такая мера существенно снижает влияние помех на потребительские цепи и обеспечивает необходимый уровень электробезопасности при техническом обслуживании оборудования.

При проектировании адаптеров с несколькими каналами питания для каждого канала должны быть предусмотрены индивидуальные вторичные обмотки трансформатора, отдельные узлы выпрямления, фильтрации и стабилизации напряжения. Следует учитывать, что схемные решения для выпрямительных узлов, характеристики фильтров и типы применяемых стабилизаторов могут варьироваться от канала к каналу, исходя из конкретных требований, предъявляемых к соответствующим линиям питания. «В ситуациях, когда наблюдаются существенные скачки входного напряжения или требуется снизить сложность организации стабилизации отдельных выходов, допустимо применение стабилизаторов, действующих непосредственно на стороне переменного тока. Примером подобных устройств являются феррорезонансные стабилизаторы или тиристорные преобразователи напряжения (ТПН). Их использование позволяет эффективно регулировать сетевое напряжение до выпрямления, упрощая тем самым последующую схему стабилизации и повышая общую надёжность и стабильность работы системы» [4].

«Основным недостатком данной конфигурации являются существенно большие размеры и вес источника питания. Это объясняется наличием сетевого трансформатора Т и фильтра СФ, предназначенного для сглаживания НЧ-пульсаций» [5].

На рисунке 2 приведена схема линейного стабилизированного адаптера с защитой от перегрузок [6].

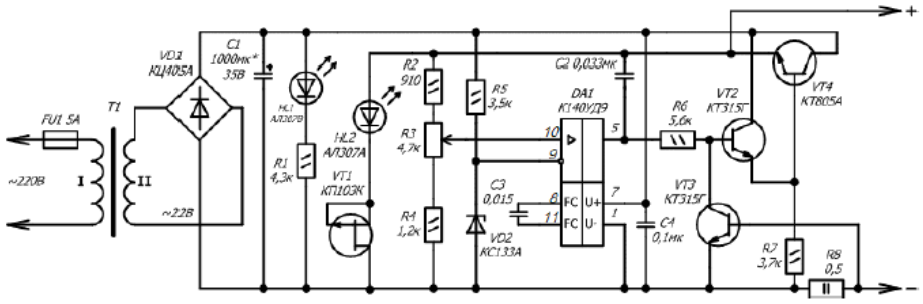


Рисунок 2 - Адаптер с защитой от перегрузок

Питание от сети поступает на входной узел устройства, где первоначально подвергается снижению посредством понижающего трансформатора Т1. Полученный переменный сигнал преобразуется в постоянное напряжение с помощью диодного мостового выпрямителя VD1. Для минимизации колебаний напряжения и устранения остаточных пульсаций предусмотрен электролитический конденсатор С1. О подключении схемы к источнику электропитания сигнализирует светодиод HL1, выполняющий функцию визуального индикатора рабочего состояния блока питания.

«После фильтрации стабилизированное напряжение направляется на регулирующий каскад, представленный составным транзистором, включающим транзисторы VT2 и VT4. Управляющим элементом данного каскада служит специализированная интегральная микросхема DA1 с встроенным операционным усилителем. Данный усилитель непрерывно сравнивает два сигнала: фиксированное опорное напряжение, задаваемое стабилитроном VD2, и изменяющийся сигнал, поступающий с цепи обратной связи, сформированный делителем напряжения на резисторах R2, R3 и R4. При обнаружении разницы между этими напряжениями операционный усилитель генерирует соответствующий корректирующий сигнал рассогласования,

который, воздействуя на базу управляющего транзистора, компенсирует отклонения и стабилизирует выходное напряжение» [6].

Благодаря выбранной конфигурации схемы и заданному уровню опорного напряжения (порядка 3,3 В), устройство позволяет регулировать выходное напряжение в достаточно широком диапазоне — от минимальных 3,3 до максимальных 18 вольт, сохраняя стабильность и точность параметров при различных нагрузочных режимах.

«Для оперативного контроля наличия напряжения на выходной линии схемой предусмотрена дополнительная индикация, реализованная посредством цепи на светодиоде HL2 и полевом транзисторе VT1. Особое внимание уделено защите устройства от коротких замыканий или перегрузок, реализованной через транзистор VT3. В случае превышения допустимого тока нагрузки, транзистор VT3 переходит в насыщение, переводя выход микросхемы DA1 на уровень общего провода, что приводит к блокировке транзисторного элемента регулирования» [7]. Как следствие, индикаторный светодиод HL1 гаснет, а уровень выходного напряжения падает примерно до 1,5 В. Работа стабилизатора возобновляется лишь после устранения причины перегрузки или замыкания. Для регулировки порогового тока срабатывания защиты предусмотрено изменение номинала резистора R8: увеличение его сопротивления снижает ток активации защиты, снижение номинала — наоборот, увеличивает токовую нагрузочную способность схем. [7]

Далее рассматриваются способы регулирования выходного напряжения в адаптерах.

1.1.2 Способы регулирования выходного напряжения

Одним из наиболее востребованных решений при разработке регулируемых адаптеров является применение специализированной интегральной схемы LM317. Данная микросхема представляет собой регулируемый стабилизатор напряжения линейного типа и отличается широкой

функциональностью, что позволяет использовать её в многочисленных технических решениях. Возможности LM317 позволяют эффективно организовать схемы стабилизаторов постоянного тока, зарядных устройств различной мощности, лабораторных источников питания и даже аудиоусилительных каскадов.

Широкое распространение микросхема LM317 получила благодаря простой внутренней структуре и удобству применения, что существенно упрощает её интеграцию в схемотехнические решения. Минимальное количество периферийных элементов, необходимых для обеспечения стабильного функционирования устройства на базе LM317, делает проектирование простым и экономически эффективным. Применение этой микросхемы характеризуется низкими затратами на производство и обслуживанием, а также высоким уровнем эксплуатационной надёжности.

Важным преимуществом LM317 является наличие встроенных защитных механизмов, которые предотвращают выход устройства из строя вследствие короткого замыкания выходных контактов или превышения температуры полупроводникового кристалла. Благодаря такой интегрированной защите увеличивается долговечность схемы, а риск поломки значительно снижается.

Отличительной чертой адаптеров на основе LM317 в сравнении с другими схемами стабилизации является значительное упрощение схемной реализации. Например, решения с операционными усилителями требуют сложной системы внешних элементов для реализации управления и защиты, тогда как стабилизаторы, построенные на LM317, позволяют достичь того же уровня функциональности и стабильности при минимальном использовании вспомогательных цепей и элементов.

У LM317 два главных параметра: это его опорное напряжение, а также ток, истекающий на выводе подстройки. Схема регулируемого блока питания на LM317 показана на рисунке 3. [8]

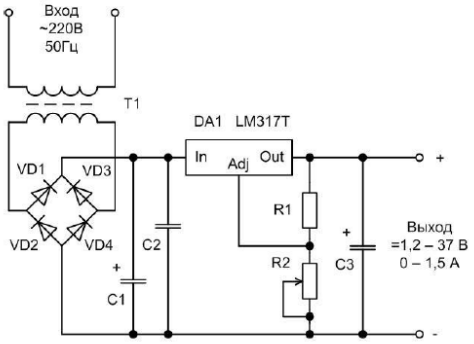


Рисунок 3 - Схема регулируемого блока питания на LM317 11

«Опорное напряжение (V_{ref}) - напряжение, которое стабилизатор поддерживает на сопротивлении R1. Его усредненное значение составляет 1,25 В. В крайнем верхнем положении движка переменного резистора R2 на выходе получим опорное напряжение 1,25В, а с увеличением R2 будет увеличиваться и выходное напряжение» [8] «Таким образом, LM317 постоянно сравнивает напряжение на выходе через резистивный делитель с опорным, поэтому, меняя сопротивление, мы меняем выходное напряжение» [9]. В технической документации на микросхему приводиться формула:

$$V_0 = V_{ref} (1+ R_2 /R_1) + I_{ADJ}R_2 \quad [9]$$

где V_0 - выходное напряжение;

I_{ADJ} - ток постройки.

Паразитный ток, возникающий в цепи регулировки I_{ADJ}, является нежелательным фактором, оказывающим влияние на точность и стабильность регулировки выходного напряжения. Согласно официальным характеристикам, представляемым производителями компонентов, этот ток обычно находится в пределах 50–100 мкА. Однако при практическом тестировании электронных схем были зафиксированы случаи, когда его величина значительно превышала заявленные значения и достигала уровня порядка 500 мкА. Учитывая такую особенность, необходимо обеспечить достаточный ток через резистивный делитель, формирующий опорное напряжение. Поэтому рекомендуемое максимальное сопротивление резистора R1 ограничивается значением 240 Ом, чтобы гарантировать протекание минимального тока не менее 5 мА через указанную цепь. Указанное ограничение обеспечивает достаточный уровень

стабильности и защищает схему от значительных колебаний выходного напряжения вследствие воздействия паразитного тока. Предельно допустимая нагрузочная способность схемы, определяемая выходным током, достигает 1,5 А. [10]

На рисунке 4 представлена схема регулируемого стабилизатора напряжения с регулировкой от нуля. [4].

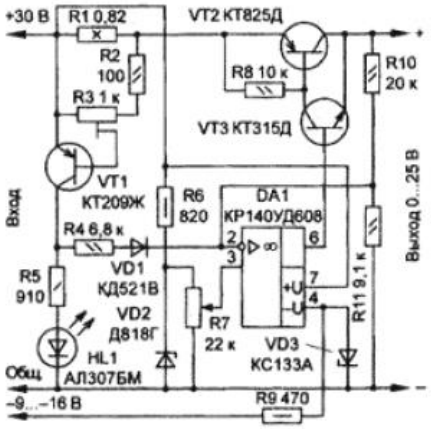


Рисунок 4 - Регулируемый стабилизатор напряжения

Функция стабилизации напряжения в рассматриваемой схеме реализуется на базе составного транзистора, сформированного транзисторами VT2 и VT3, управление которым осуществляет операционный усилитель DA1. Принцип регулирования напряжения основан на сравнении двух сигналов: на инвертирующий вход усилителя поступает сигнал, связанный с выходным напряжением схемы, а на неинвертирующий подаётся регулируемое напряжение опорного типа, устанавливаемое посредством переменного резистора R7. Регулировка уровня напряжения на выходе схемы достигается вращением движка этого резистора.

«Дополнительно разработчиками устройства была предусмотрена схема, реализующая защиту от превышения допустимого тока нагрузки. Механизм защиты основывается на контроле величины падения напряжения на резисторе R1 (маркировки С5-16В), выполняющем роль датчика тока. При возникновении перегрузки, возрастание падения напряжения на R1 приводит к переключению транзистора VT1 в открытое состояние. Это событие сопровождается включением индикации аварийного режима при помощи светодиода HL1» [11].

Одновременно происходит подача соответствующего сигнала через цепочку, состоящую из резистора R4 и диода VD1, на инвертирующий вход операционного усилителя. Усилитель переходит в состояние ограничения величины выходного тока на предварительно заданном уровне, предотвращая тем самым дальнейшее возрастание тока нагрузки. Корректировка порогового значения тока, при котором активируется защитный режим, осуществляется с помощью встроенного подстроечного резистора R3, позволяющего адаптировать параметры защиты к конкретным условиям эксплуатации устройства.

Использование описанного решения даёт возможность достичь надёжной стабилизации выходных характеристик адаптера и обеспечить эффективную защиту электронных компонентов схемы от возможных повреждений вследствие непредвиденных режимов эксплуатации, что существенно увеличивает срок службы устройства и его эксплуатационные возможности. [12].

Приведённая далее схема (рисунок 5) принципиально отличается от рассмотренных ранее решений. В ней основным регулирующим компонентом выступает силовой транзистор полевого типа, работающий в сочетании с линейным стабилизирующим устройством. Такое схемное решение обеспечивает возможность плавного и точного регулирования выходного напряжения в расширенном диапазоне значений, что существенно расширяет функциональные возможности данного источника питания. За счёт применения указанного силового элемента достигается высокая эффективность и стабильность работы при значительных изменениях нагрузки и напряжения, подаваемого на вход устройства.

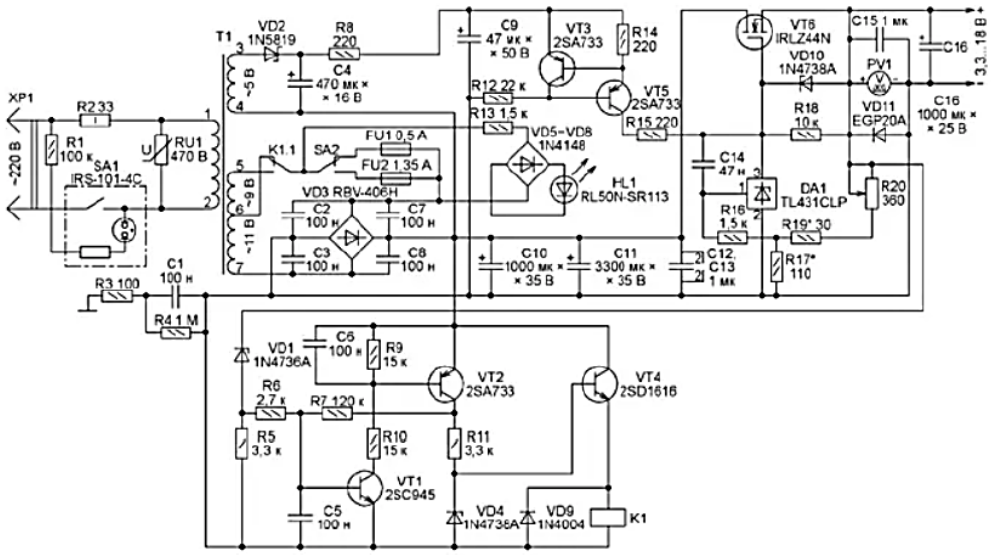


Рисунок 5 - Регулируемый адаптер

«Регулируемый стабилизатор напряжения оснащён узлом, основанным на интегральном параллельном стабилизаторе DA1, выполняющем функции усиления сигнала рассогласования и сравнения текущего напряжения с опорным» [13]. Для работы DA1 предусмотрено питание фиксированным током около 3 мА, стабилизированным двухтранзисторной цепью, сформированной VT3 и VT5. Конкретная величина этого тока устанавливается подбором номинала резистора R14. Подача на микросхему DA1 стабилизированного тока создаёт благоприятный режим функционирования даже при значительных изменениях напряжения на её условном катодном выводе (контакт 3). С целью предотвращения нежелательных колебаний и самовозбуждения схемы предусмотрены элементы демпфирования — резистор R15 и конденсатор C14.

Регулирование выходного напряжения адаптера реализовано переменным резистором R20, позволяющим плавно изменять напряжение на выходе схемы, непосредственно связанное с потенциалом истока силового полевого транзистора VT6. «С уменьшением сопротивления резистора R20 происходит пропорциональное снижение уровня выходного напряжения блока питания. Для защиты полупроводникового прибора VT6 от возможных электрических повреждений используется стабилитрон VD10, ограничивающий максимальное напряжение на затворе транзистора» [13].

Принцип работы стабилизатора DA1 предполагает постоянное удержание напряжения между его управляющим (контакт 1) и анодным выводами (контакт 2) на уровне 2,5 В. Поддержание фиксированного значения этого напряжения обеспечивает стабильность всей схемы регулирования. Резистор R16 выполняет вспомогательную функцию защиты управляющего входа DA1 от перегрузок и скачков напряжения, увеличивая надёжность устройства и продлевая срок его службы.

Подобное «техническое решение позволяет создавать адаптеры питания с высокой точностью регулирования, хорошей надёжностью и низким уровнем выходных шумов, что имеет практическое значение при использовании стабилизатора в чувствительной электронной аппаратуре и измерительных устройствах» [14].

«Для всех линейных источников питания необходимо, чтобы входное напряжение превышало выходное напряжение на определенную минимальную величину, известную как напряжение падения. Этот параметр напряжения падения имеет решающее значение при оценке производительности и потери мощности, что является недостатком данного вида источников питания. Значительным недостатком данного вида источников питания являются относительно большие габариты НЧ понижающего трансформатор и элементов фильтра. При выборе компонентов лучше использовать микросхемы интегральных стабилизаторов напряжения с встроенной защитой от перегрузок, что значительно упрощает схему и повышает ее надежность» [15].

1.1.3 Импульсные источники питания

«Импульсные адаптеры имеют несколько разновидностей, которые отличают их принцип действия. Рассматривается обобщенная структурная схема импульсного источника представленная на рисунке 6» [16].

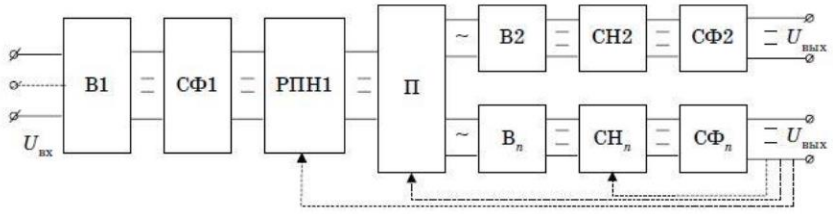


Рисунок 6 - Импульсный источник питания

«Данная схема имеет бестрансформаторный вход и высокочастотный преобразователь постоянного напряжения в постоянное напряжение. Согласование уровней входного и выходного напряжений в данной схеме выполняется посредством преобразователя высокочастотного типа (П), конструкция которого предусматривает наличие нескольких вторичных обмоток. Их число соответствует количеству отдельных каналов стабилизированного напряжения, предусмотренных техническим заданием для блока питания» [16].

«Регулировка и поддержание стабильного уровня выходного напряжения осуществляется с помощью регулятора постоянного напряжения (РПН1) или специализированного стабилизатора напряжения, реализованного на основе автономного инверторного каскада. Частота преобразования энергии в таких устройствах колеблется в пределах от 20 до 100 кГц» [16].

Анализируя указанный подход, необходимо отметить некоторые недостатки, прежде всего усложнённую структуру устройства и необходимость выполнения нескольких ступеней преобразования энергии (не менее трёх). Это обстоятельство обусловливает усложнение конструкции, увеличивает количество используемых элементов и требует более тщательного проектирования схемы с точки зрения стабильности работы и ремонтопригодности.

Однако подобная реализация обладает и весомыми преимуществами. Основной выигрыш проявляется в значительном снижении габаритных размеров и массы устройства по сравнению с аналогичными источниками питания, основанными на классических низкочастотных сетевых трансформаторах. Высокочастотное преобразование позволяет уменьшить

размеры магнитопроводов и обмоток трансформатора, что положительно влияет на компактность устройства, существенно облегчая его интеграцию в современные системы с ограниченным пространством. Такое преимущество актуально, «например, при конструировании малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры или аппаратуры с высокой плотностью размещения компонентов» [17].

«Далее приведена функциональная схема второго варианта импульсного блока питания с однотактным обратноходовым преобразователем (рисунок 7). На схеме ФВФ – узел входного фильтра и выпрямителя. Силовой ключ S управляется схемой управления СУ. Как правило в качестве силового ключа в основном используются MOSFET транзисторы, коммутирующие выпрямленное напряжение в первичной обмотке трансформатора. Для управления работой преобразователя в цепи обратной связи применяется узел гальванической развязки (УГР) на оптроне. Схема сравнения СС выполняет функцию сравнения выходного напряжения с опорным и через УГР управляет режимом работы СУ. Параллельно первичной обмотке TV включена демпферная цепь» [17].

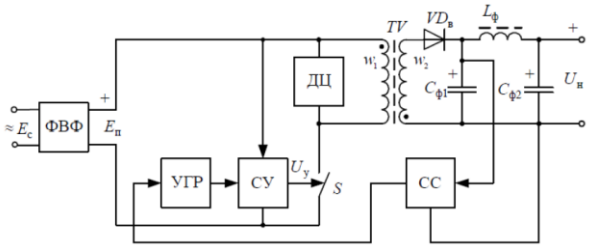


Рисунок 7 - Функциональная схема импульсного источника питания с однотактным преобразователем

«Однотактная схема является относительно простой и дешевой в производстве, по сравнению с некоторыми другими схемами импульсных источников питания, такими как схема с двойным преобразованием. Однотактные обратноходовые схемы обычно обеспечивают хорошую эффективность преобразования энергии и имеют КПД порядка 80%. Эта схема позволяет относительно легко регулировать выходное напряжение путем

изменения ширины импульсов (ШИМ). Однотактная схема имеет хорошую линейность, что означает, что она может обеспечивать стабильное выходное напряжение при различных нагрузках. Принципиальная схема обратноходового импульсного источника питания представлена на рисунке 8» [18].

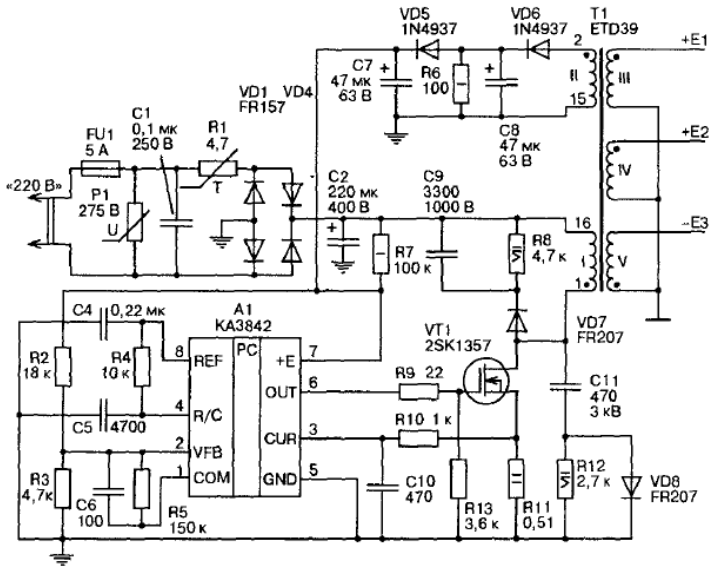


Рисунок 8 - Импульсный источник питания (обратноходовая схема)

Адаптер, рассмотренный в настоящем исследовании, разработан на основе специализированной микросхемы КА3842 (зарубежный аналог – UC3842), получившей широкое применение в современной импульсной схемотехнике. Вход устройства оснащён варистором Р1, задачей которого является предотвращение повреждения схемы при возникновении кратковременных скачков сетевого напряжения. После варистора установлена цепь выпрямления сетевого напряжения на основе диодного моста VD1–VD4. После выпрямления напряжение стабилизируется на фильтрующем конденсаторе С2 и достигает уровня около 310 В. Для ограничения первоначального тока заряда конденсатора С2 предусмотрен терморезистор R1 с номинальным сопротивлением 4,7 Ом при комнатной температуре. В процессе эксплуатации вследствие нагрева его сопротивление снижается практически до незначительной величины, что минимизирует потери и исключает влияние на работу схемы.

Функцию обратной связи, отвечающей за стабилизацию и бесперебойное питание микросхемы КА3842 после запуска схемы, реализует цепочка элементов, включающая вторичную обмотку трансформатора Т1 (обмотка II), диоды VD5 и VD6, резистор R6 и конденсатор С8. Для дополнительного сглаживания пульсаций напряжения питания самой микросхемы служит конденсатор С7.

Формирование частоты импульсов, необходимых для работы внутреннего генератора КА3842, обеспечивают элементы времязадающей цепи – резистор R4 и конденсатор С5. «Стабилизированное значение напряжения, поступающего на вход усилительного каскада ошибки, задаётся с помощью резистивного делителя, образованного комбинацией резисторов R2 и R3. Для обеспечения требуемой частотной коррекции усилителя ошибки в схему включена компенсационная RC-цепь, состоящая из элементов R5 и С6. Назначение указанной цепи заключается в оптимизации амплитудно-частотного отклика и повышении устойчивости обратной связи системы стабилизации.

Защита силового MOSFET-транзистора VT1 от повреждений, связанных с аварийными и экстремальными режимами работы, обеспечивается специальной защитной цепочкой, образованной резисторами R9 и R13. Резистор R13 предусмотрен в качестве резервного компонента, минимизирующего риск выхода из строя транзистора VT1 при неисправности или повреждении основного ограничительного резистора R9.

Функцию датчика тока, протекающего через транзистор VT1, выполняет резистор R11. Сформированный сигнал с измерительного резистора поступает в интегрирующую цепь, реализованную на элементах R10 и С10, и далее передаётся на второй компаратор управляющего контроллера КА3842. Подобная реализация обратной связи по току позволяет обеспечить стабильность работы системы и предотвратить превышение предельно допустимых значений.

Дополнительная функциональная группа, состоящая из компонентов VD7, R8, C9, VD8, C11 и R12, предназначена для улучшения формы выходных импульсов, подавления нежелательных колебаний высоких частот и защиты транзистора VT1 от кратковременных перенапряжений. Эти элементы способствуют улучшению электромагнитной совместимости и снижению вероятности возникновения неисправностей, обусловленных паразитными импульсами и помехами в цепях питания.

Запуск микросхемы управления КА3842 при включении схемы обеспечивается подачей напряжения через резистор R7, что гарантирует устойчивое начальное питание контроллера до момента выхода на рабочий режим преобразователя.

Разработанное схемное решение отличается высокой степенью надёжности, эффективным контролем параметров напряжения на выходе, а также комплексной защитой компонентов от нештатных и аварийных ситуаций. Благодаря указанным характеристикам данная схема успешно применяется в широком спектре электронных устройств различного функционального назначения» [19].

«Мощные импульсные блоки питания могут быть построены на основе схемы полумостового инвертора. Обобщенная схема полумостового инвертора представлена на рисунке 9. Постоянное напряжение с входного выпрямителя, поступающее на инвертор, преобразуется в переменное с частотой 100 кГц. Пока на затворы транзисторов не поступило напряжение, они закрыты. Напряжение в средней точке емкостного делителя, выполненного на конденсаторах C1 и C2 одинаковой емкости, составляет половину от постоянного напряжения, питающего инвертор» [19].

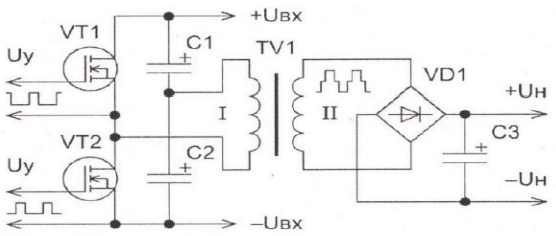


Рисунок 9 - Полумостовой инвертор

«После поступления на затвор транзистора VT2 отпирающего напряжения с ШИМ-контроллера, по цепи +Uвх, конденсатор C1, обмотка трансформатора TV1, транзистор VT2, -Uвх потечет ток. На вторичной обмотке трансформатора TV1 возникнет напряжение, которое будет выпрямлено диодной сборкой VD1 и сглажено конденсатором C3. Транзистор VT1 все это время был закрыт» [1].

«При подаче напряжения запирающего типа на затвор полевого транзистора VT2 и одновременном поступлении открывающего потенциала на затвор транзистора VT1 формируется цепь, по которой происходит движение тока: положительный вывод источника (+Uвх), открытый транзистор VT1, первичная обмотка трансформатора TV1, фильтрующий конденсатор C3 и отрицательный вывод источника (-Uвх). В этот момент во вторичной обмотке трансформатора TV1 индуцируется напряжение с полярностью, обратной относительно предшествующего такта работы схемы. Выпрямление данного напряжения осуществляется с помощью диодного узла VD1, а последующее сглаживание — посредством конденсатора фильтра C3. Далее уже стабилизированное напряжение подаётся непосредственно на нагрузку схемы» [19].

На протяжении второго такта преобразования транзистор VT2 остаётся закрытым, а ток в нагрузку поступает стабильно и без перерыва в течение обоих рабочих циклов. «Благодаря использованию двухтактного режима работы преобразователя частота возникающих на выходе пульсаций вдвое превосходит рабочую частоту преобразования, что позволяет применять фильтрующий конденсатор C3 с относительно небольшой величиной ёмкости без потери качества сглаживания напряжения. Магнитный сердечник трансформатора, применяемого в схеме полумостового преобразования, при работе задействует частную петлю гистерезиса, максимально приближенную к своей предельной характеристике, что повышает эффективность энергетического обмена» [19].

В режиме отсутствия нагрузки на выходе источника питания напряжение, приложенное к ёмкостному делителю (конденсаторы напряжения), равномерно

распределяется между ними, составляя половину общего питающего напряжения. Если же ёмкости указанных конденсаторов недостаточны, то при подключении максимально допустимой нагрузки в процессе работы схемы будет наблюдаться значительный разряд конденсаторов на протяжении каждого рабочего полупериода. Это вызовет неравномерность напряжений и приведёт к тому, что величина напряжения на конденсаторах станет превышать номинальную половину напряжения, подаваемого на вход преобразователя. Подобное явление нежелательно, так как способно негативно повлиять на стабильность выходных параметров и создать предпосылки для выхода из строя элементов схемы. Решение данной проблемы достигается тщательным подбором ёмкостей конденсаторов делителя, исходя из расчётных требований и характеристик нагрузки. [20]

1.1.4.Источник питания

«Источник питания включает в себя две или больше входных форм колебаний, которые имеют форму или которые выбирают так, чтобы после раздельного подъема их уровня и выпрямления их совокупная комбинация приводила бы к получению выходной формы постоянного тока, по существу, с отсутствующими пульсациями. Источник питания может содержать генератор формы колебания, каскад преобразования уровня для преобразования на повышенный уровень или пониженный уровень, выпрямительный каскад и объединитель. Преобразование уровня может осуществляться с использованием трансформаторов или цепей с переключаемым конденсатором. Обратная связь из выходной формы постоянного тока может использоваться для регулирования характеристик входных форм колебаний» [20].

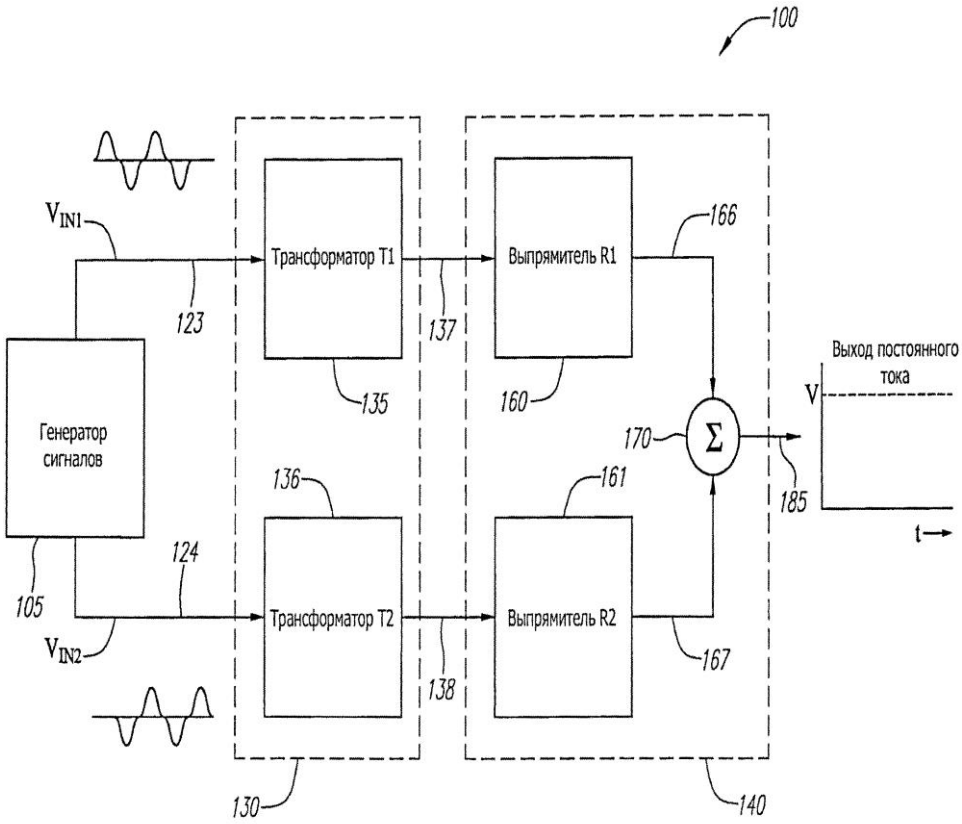


Рисунок 10 - Источник питания

Рассматриваемая схема источника питания обладает существенным потенциалом для различных прикладных областей, включая, например, автомобильную электронику, где устройство способно эффективно выполнять функцию бортового питания аудиоусилительных модулей транспортных средств. Внедрение подобной схемы способно обеспечить снижение массы, уменьшение габаритных размеров и толщины блока питания, а также способствовать удешевлению итогового изделия благодаря сокращению количества необходимых элементов и их упрощённой компоновке. При этом достигается высокая энергетическая эффективность при минимальном уровне электромагнитных помех (EMI).

Упрощённая конструкция схемы и снижение сложности технологического процесса позволяют существенно ускорить цикл разработки и производства, что позитивно отражается на сроках выхода продукции на рынок. Сокращение времени, затрачиваемого на конструирование и изготовление, наряду с низким уровнем электромагнитного излучения,

значительно упрощает процесс сертификации изделия, снижая тем самым и общие расходы. Этот фактор играет важную роль, учитывая строгие нормативные требования к электромагнитной совместимости.

Экономия, достигаемая за счёт упрощённой схемотехники, невысокой стоимости комплектующих элементов и уменьшенных затрат на сертификационные испытания, является весомым конкурентным преимуществом перед традиционными вариантами реализации импульсных источников питания. Низкий уровень электромагнитных помех и компактность конструкции открывают возможности для размещения устройства в труднодоступных зонах транспортного средства, где ранее применение стандартных решений было технически затруднительным или экономически нецелесообразным.

Комплекс перечисленных выше преимуществ позволяет рассматривать данную разработку в качестве перспективного и практичного решения, способного успешно конкурировать с существующими аналогами по техническим, экономическим и эксплуатационным характеристикам, существенно расширяя сферу потенциального применения.

1.1.5.Установка питания светодиодных лент

Установка питания светодиодных лент, включающая в свою электрическую схему генератор сигналов, усилитель, конденсаторы, катушки индуктивности, выпрямители, стальные уголки с размещенными на них магнитами и отличающаяся тем, что использует для работы явление резонанса напряжений и явление электрической наводки, и что при последовательном соединении светодиодных лент в качестве нагрузки, полученная мощность значительно превосходит затраченную.

1.2.Критерии для разработки

«На основании обзора технических решений выбор остановлен на импульсной схеме адаптера так как данная схема имеет минимальные габариты за счет исключения НЧ-трансформатора и элементов НЧ-сглаживающего фильтра, имеет более высокий КПД и более широкий диапазон входных напряжений. В таблице 1 приведены параметры для различных топологий импульсных блоков питания» [20].

«Согласно данной таблице оптимальным выбором будет обратноходовая топология, соответствующая рабочему диапазону мощностей и максимальному КПД. По техническому заданию мощность блока питания составляет 9 Вт. Выходное напряжение в диапазоне от 5 до 9 В будет регулироваться на выходе при помощи схемы на базе микросхемы LM317» [20].

Таблица 1 - Сравнение топологий импульсных источников питания

Топология	Диапазон мощностей, Вт	Диапазон напряжений Vin(dc)	Изоляция вход/выход	Типичный КПД, %	Относительная стоимость элементов
Инвертирующие	0..150	5..40	нет	80	1,0
Однотранзисторные прямоходовые	0..150	5..500	да	78	1,4
Обратноходовые	**0..150**	**5..500**	**да**	**80**	**1,2**
Пушпульные	100..1000	5..1000	да	75	2,0
Полумостовые	100..500	5..1000	да	75	2,2

1.3 Разработка структурной схемы

Структурная схема рассматриваемого адаптера основана на однотактном преобразователе с использованием мощного полупроводникового ключевого элемента, выполненного на MOSFET-транзисторе. Переменное сетевое напряжение подаётся на вход фильтра, предназначенного для подавления сетевых помех, после чего оно направляется в выпрямительный блок.

Полученное постоянное напряжение питает схему управления адаптера, начиная с момента первоначального включения устройства.

Ключевой транзистор VT1 работает в режиме высокочастотного переключения постоянного напряжения, приложенного к первичной обмотке импульсного трансформатора T1, обладающего понижающими свойствами. Управление транзистором VT1 осуществляется посредством сигналов управления, «формируемых выходным каскадом схемы управления. Вследствие работы транзистора в импульсном режиме, во вторичных обмотках трансформатора T1 индуцируются прямоугольные импульсы напряжения, которые затем проходят этапы выпрямления и последующего сглаживания» [20].

Для передачи аналогового сигнала управления между разными электрическими цепями и обеспечения их взаимной электрической изоляции применяется специальный блок гальванической развязки. Важной функцией схемы сравнения является контроль текущего значения напряжения на выходе устройства, его сопоставление с фиксированным опорным напряжением и выработка соответствующего аналогового сигнала. Полученный сигнал направляется через упомянутый ранее изолирующий узел гальванической развязки, что гарантирует устойчивость и безопасность работы цепи управления.

Поддержание стабильности выходного напряжения адаптера достигается благодаря применению замкнутой автоматической системы регулирования, функционирующей по принципу обратной связи. Напряжение со вторичной обмотки трансформатора T1 проходит через блок выходного выпрямления и фильтрации, после чего направляется на вход регулируемого стабилизатора напряжения. В дальнейшем уже стабилизированное напряжение поступает непосредственно к нагрузке устройства.

Предложенная конфигурация адаптера характеризуется высокими техническими показателями по точности стабилизации и качеству выходного сигнала, обладает хорошими эксплуатационными свойствами и надёжностью,

что определяет перспективность её применения в современных электронных системах и устройствах.

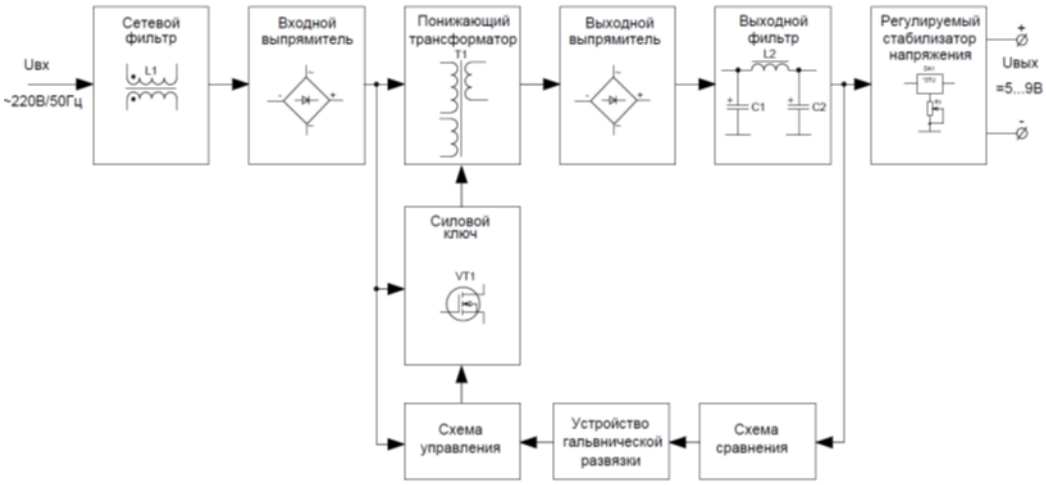


Рисунок 11 - Структурная схема блока питания

Система управления адаптера реализует функции генерации и модуляции управляющих сигналов посредством широтно-импульсного модулятора (ШИМ), выполненного на базе специализированной интегральной микросхемы. Данный ШИМ-контроллер включает внутренний генератор частоты, формирующий импульсы заданной частоты преобразования, защитные и контрольные схемы, а также логический блок управления шириной формируемых импульсов.

«Увеличение напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора импульсного типа сопровождается усилением интенсивности светового потока светодиода оптрона. Под воздействием этого фотопотока сопротивление управляемого им фототранзистора уменьшается, вследствие чего возрастает падение напряжения на резисторе, соединённом с транзистором последовательно. Подобное изменение напряжения приводит к соответствующему снижению потенциала на входном контакте управляющего ШИМ-контроллера. Встроенный логический блок ШИМ-контроллера в ответ на такое снижение напряжения увеличивает длительность управляющих импульсов, что возвращает уровень выходного напряжения к норме. В случае же, когда наблюдается снижение напряжения на выходе источника питания,

процесс протекает в противоположном направлении: уменьшается интенсивность свечения светодиода, повышается сопротивление фототранзистора, и происходит коррекция в сторону уменьшения ширины управляющих импульсов» [20].

Предложенное техническое решение обеспечивает высокую точность регулировки и оперативность реакции на любые отклонения параметров выходного напряжения, гарантируя эффективную и надёжную стабилизацию рабочих характеристик импульсных источников питания. [20]

Выводы: стабильность выходного напряжения импульсного источника обеспечивается благодаря функционированию специализированной цепи обратной связи, которая измеряет и регулирует величину напряжения на выходе устройства. Основными элементами обратной связи служат блок гальванической изоляции, выполненный в виде транзисторной оптопары с дополнительным резистором, а также схема, реализующая функцию сравнения фактического выходного напряжения с заданным опорным уровнем.

На начальном этапе работы выполнен детальный анализ и систематизация технических характеристик, а также возможных схемных реализаций двух основных типов источников электропитания: линейного и импульсного. Особое внимание уделено изучению существующих методов изменения и стабилизации напряжения на выходе устройств.

По результатам проделанной аналитической работы разработаны рекомендации и обоснована целесообразность применения однотактного преобразователя для построения источника питания с регулируемым выходным напряжением. На основе сформулированных требований создана структурная схема, отражающая функциональные связи и принципы взаимодействия отдельных модулей адаптера. Предложенная конфигурация обеспечивает необходимую гибкость настройки выходных параметров, а также надёжность и эффективность функционирования проектируемого устройства в различных режимах эксплуатации.

2 Конструкторское проектирование устройства
2.1 Разработка электрической принципиальной схемы

Проектирование блока питания начнем с входной цепи, состоящей из входного фильтра, мостового выпрямителя и сглаживающего конденсатора. Схема входного узла представлена на рисунке 12.

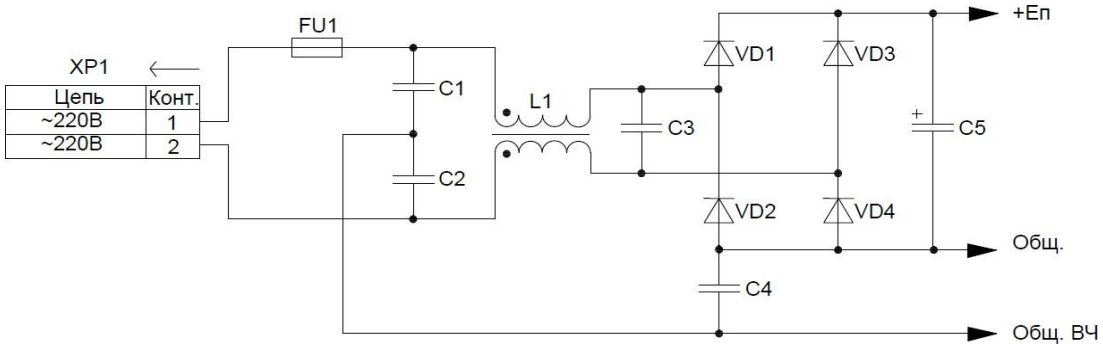


Рисунок 12 - Схема входного узла блока питания

Далее на рисунке 13 представлена схема силового каскада и схемы сравнения.

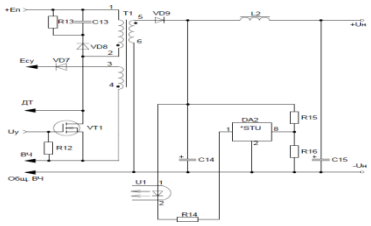


Рисунок 13 – Схема силового каскада и схемы сравнения

Представленная схема выполняет задачу преобразования входного постоянного напряжения (ЕП) в стабилизированное постоянное напряжение на выходе (UH), реализуя это посредством импульсного режима работы силового каскада. В роли силового коммутирующего элемента выступает транзистор типа MOSFET (обозначен VT1). При функционировании силового каскада возможны два принципиально различных режима: режим непрерывного тока (НТ) и режим прерывистого тока (ПТ).

Каждый из перечисленных режимов имеет свои специфические преимущества и недостатки. Например, непрерывный режим характеризуется увеличенной длительностью токовых импульсов во вторичной цепи, что

позволяет применять выходной фильтрующий конденсатор сравнительно малой ёмкости, несмотря на больший эквивалентный последовательный импеданс. Кроме того, первичная обмотка трансформатора обладает высокой индуктивностью при относительно низком значении пикового тока, что существенно упрощает её проектирование и расчёт.

Однако при работе схемы в режиме непрерывного тока возникают определённые сложности, в частности при коэффициенте заполнения, превышающем 50%, усложняется процедура коррекции крутизны характеристики токового регулятора. Помимо этого, режим сопровождается существенным выделением тепла при переключении ключевого транзистора, обусловленным тем, что коммутация происходит на высоком уровне как тока, так и напряжения, что приводит к ощутимым энергетическим потерям. Дополнительной проблемой, присущей данному режиму, является эффект обратного восстановления в выходных выпрямительных элементах. Этот эффект провоцирует кратковременное повышение тока в момент повторного включения транзистора вследствие обратного заряда диодов, что может отрицательно сказаться на общей надёжности устройства.

«Существенным отличием режима схемы преобразования ПТ является принципиальное отсутствие в силовом каскаде коммутационных импульсов тока $I_{\text{стахи}}$ и $I_{\text{втахи}}$. Это определяет увеличение надежности работы блока питания и повышение КПД, что позволяет применять более высокие частоты преобразования $f_{\text{пр}}$, по сравнению с режимом работы силового каскада в режиме НТ» [21]. «Однако возникает необходимость увеличения емкости конденсаторов С14 и С15, так как при этом появляется интервал времени, когда неизменность выходного напряжения $U_{\text{Е}}$ поддерживается только засчет емкости конденсатора С15. Поэтому выбор того или иного режима работы силового каскада определяется в каждом конкретном случае при разработке» [21].

На рисунке 14 представлена схема управления.

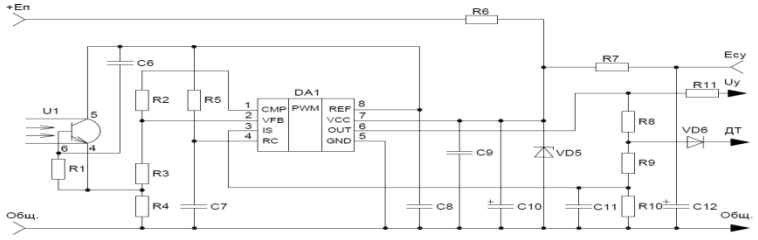


Рисунок 14 – Схема управления

«В основе системы управления устройством лежит специализированная интегральная микросхема DA1 (UC3842), реализующая широтно-импульсный метод регулирования. Электропитание контроллера (седьмой вывод микросхемы) подаётся через стабилитрон VD5, работающий в двух режимах» [21].

«Первый режим, соответствующий начальному запуску источника питания, активируется при отсутствии или недостаточном уровне выходного напряжения UH. В момент подачи входного напряжения Еп начинается токовая стабилизация через резистор R6, включённый последовательно со стабилитроном VD5. По достижении стабилитроном рабочего состояния на вывод 7 контроллера поступает стабильное напряжение, достаточное для запуска и поддержания его функционирования» [21].

«Во втором, установившемся режиме работы, необходимый ток стабилизации поступает не от стабилитрона VD5, а от дополнительной обмотки трансформатора Т1, относящейся к силовому каскаду схемы. Для устранения помех и сглаживания возможных колебаний напряжения питания используются фильтрующие конденсаторы С9 и С10. В качестве общего контакта, объединяющего входные и выходные цепи, а также обеспечивающего общее питание микросхемы DA1, выступает её пятый вывод» [21].

«Шестой вывод интегральной схемы DA1 представляет собой управляющий выход, от которого через ограничивающий резистор R11 импульсный сигнал (Uy) поступает на затвор ключевого транзистора VT1. Подача высокого потенциала с выхода контроллера на транзистор VT1

приводит к его открыванию. В этом случае падение напряжения на открытом транзисторе определяется произведением величины тока первичной обмотки трансформатора T1 и сопротивления канала сток-исток Rсиоткр открытого транзистора. Суммарное падение напряжения, регистрируемое на последовательно включённых резисторе Rсиоткр и диоде VD6, подаётся на делитель, образованный резисторами R9 и R10. Полученное таким образом напряжение поступает на третий вывод контроллера DA1, выполняющий функцию мониторинга токового режима силового транзистора» [21].

Схема регулируемого стабилизатора напряжения приведена на рисунке 15.

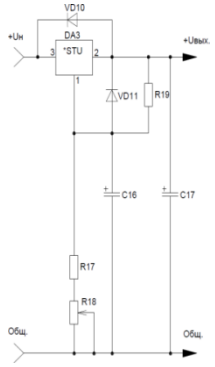


Рисунок 15 – Узел регулируемого стабилизатора напряжения

«Для реализации рассматриваемого узла стабилизации напряжения наиболее рационально использовать специализированную интегральную микросхему LM317 (обозначенную в схеме как DA3) либо её функциональные аналоги с аналогичными характеристиками» [21].

«Минимальное значение стабилизированного выходного напряжения (величиной около 5 В) определяется подбором сопротивления резистора R17. Верхний предел выходного напряжения (9 В) достигается при крайнем нижнем положении движка переменного резистора R18. Элементы VD10 и VD11 выполняют функцию защитных диодов, предохраняя микросхему DA3 от повреждений при возникновении короткого замыкания. При этом диод VD10 устанавливается на входе, а VD11 — на выходе интегрального стабилизатора. Согласно данным производителя микросхемы LM317, если

максимальное значение выходного напряжения не превышает 25 В, допускается работа стабилизатора без указанных защитных диодов» [21].

«Для снижения уровня пульсаций напряжения на выходе микросхемы на 15 дБ предусмотрен конденсатор С16. Важно отметить, что при увеличении номинальной ёмкости этого конденсатора выше 10 мкФ существенно снизить уровень пульсаций не получится, однако это может негативно сказаться на быстродействии стабилизатора, увеличивая его время реакции на изменения нагрузки» [21].

«Микросхема LM317 обеспечивает возможность точной стабилизации напряжения в широком диапазоне значений от 1,25 до 37 вольт при максимальном выходном токе до 1,5 ампер. Конструкция и схема включения этой микросхемы достаточно просты, что позволяет сократить число дополнительных внешних компонентов, необходимых для её корректной работы. Встроенные механизмы защиты LM317 включают автоматическое отключение при перегреве и защита от токовых перегрузок, что соответствует требованиям, предъявляемым техническим заданием к разработке данного источника питания» [21].

Расчёт номиналов резисторов, входящих в стандартную схему подключения микросхемы LM317, производится по известной формуле, приведённой в технической документации производителя.

Стабилизатор напряжения в схеме источника питания устанавливается непосредственно за выходным фильтрующим узлом, что обеспечивает необходимую чистоту и стабильность подаваемого на нагрузку напряжения.

Таким образом, в работе были детально проанализированы и описаны принципы функционирования каждого компонента разработанной принципиальной схемы источника питания. Итоговый вариант полной электрической принципиальной схемы представлен на рисунке 16.

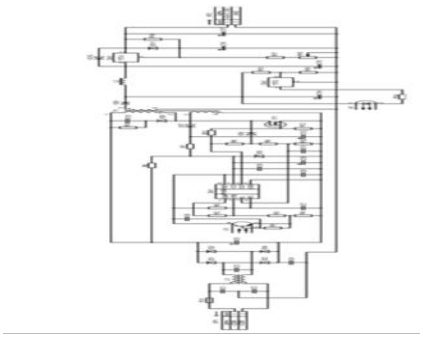


Рисунок 16 – Электрическая принципиальная схема

2.2 Выбор элементов устройства

Выбор элементов блока питания производиться на основании проведенных расчетов. В начале расчета задаются исходные данные.

1. Номинальное действующее значение напряжения сети 220В ±10%.
2. Частота питающей сети f=50Гц.
3. Выходное напряжение блока питания $U_н$=5…9В.
4. Максимальный ток нагрузки $I_{нmax}$=1А.
5. КПД – не менее η=0,8.

1. Вычисляем максимальное и минимальное значения постоянного напряжения питания силового каскада [21]:

$$E_{пmax} = \sqrt{2}\, E_{cmax} = 1{,}4 \cdot 242 = 341 \text{ В} \quad [21]$$

$$E_{пmin} = \sqrt{2}\, E_{cmin} - \Delta E_п - 2U_д = 1{,}4 \cdot 198 - 40 - 2 \cdot 1 = 237 \text{ В} \quad [21]$$

где $\Delta E_п$ - – напряжение пульсаций на конденсаторе сглаживающего фильтра С5 расчет на основании рекомендаций МУ[11] рекомендовано 40В;

$U_д$ – падениенапряженияна диодесетевого выпрямителя $U_д$=1В.

2. Выбираем диоды сетевого выпрямителя VD1…VD4.

Максимальное обратное напряжение принимаем $U_{добр}$=$E_{пmax}$=341В. Средний ток через диод:

$$I_{дср} = \frac{P_H}{2E_{n\min} \cdot \eta} = \frac{9}{2 \cdot 237 \cdot 0{,}8} = 0{,}02 \text{ А} \quad [21]$$

«В качестве диодов VD1…VD4 выбираем диоды BA159. BA159 выбираются с необходимым запасом и имеют следующие основные параметры:

− максимально допустимое обратное напряжение – 1000В;

− максимально допустимый прямой ток – 1А;

− время обратного восстановления – 250нс;

−рабочий диапазон температур: -65…+125°С» [21].

Диоды BA159 выпускаются в корпусах do-204al/do-41 (рисунок 17).

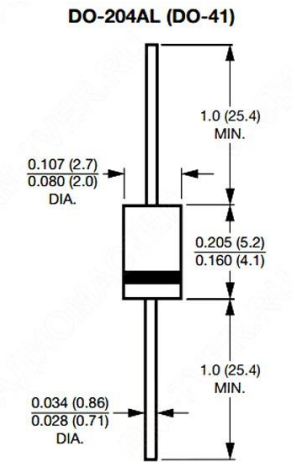


Рисунок 17 –Габариты корпуса диода BA159

«Далее рассчитываем емкость сглаживающего конденсатора на выходе сетевого выпрямителя С5 по формуле из МУ» [21]:

$$C5 = \frac{0{,}5 \cdot P_H}{m \cdot E_{c\min} \cdot f \cdot \Delta E_n \cdot \eta} = \frac{0{,}5 \cdot 9}{2 \cdot 198 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 0{,}8} = 7{,}7 мкФ \text{ [21]}$$

Выбираем конденсатор с ближайшим стандартным номиналом 10мкФ.

Так как $E_{\text{пmax}}$=341В, то выбираем конденсатор с максимально допустимым напряжением 450В.

«В данном случае выберем электролитический конденсатор типа B43851 10 мкФ 450 В (Epcos)».

«Технические характеристики конденсаторов B43851 (Epcos):

− допуск номинальной емкости 20 %;

− тангенс угла диэлектрических потерь 0,2%;

− рабочая температура - 40...105°С;

− ток утечки макс. - 0,01мкА;

− выводы/корпус – радиальный;

− диаметр корпуса 12,5 мм;

− длина корпуса 20мм» .

Далее все электролитические конденсаторы в устройстве будем также выбирать одной фирмы-производителя Epcos. Возможно применение других аналогичных конденсаторов с такими же номиналами.

Внешний вид конденсаторов B43851 с габаритными размерами приведен на рисунке 18.

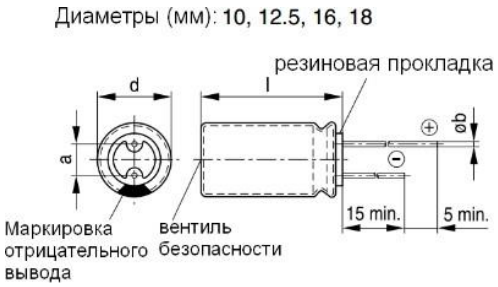


Рисунок 18 –Габаритные размеры конденсаторов электролитических B43851

4. «Коэффициент заполнения импульсов U_y, управляющих работой транзистора VT1 определяется по формуле»:

$$\gamma_{max} = \frac{t_u}{T} = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta U_{СИ} + E_{пмин} - \Delta U_{СИОТКР.}} = \frac{75}{75 + 237 - 2} = 0{,}24 \quad [21]$$

где $\Delta U_{\text{сиоткр.}}$ – падение напряжения на открытом транзисторе VT1, принимается равным $\Delta U_{\text{сиоткр.}}$ = 2...5 В,

«$\Delta U_{\text{си}}$ – амплитуда увеличения импульса напряжения сток-исток силового транзистора VT1, возникающего за счет влияния индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора, $\Delta U_{\text{си}}$=75В».

5. Рассчитываем параметры трансформатора Т1.

Максимальный ток первичной обмотки w_1 [11,стр.35]:

$$I_{w1max}=\frac{2{,}1P_H}{E_{n\min}\gamma_{\max}\eta}=\frac{2{,}1\cdot 9}{237\cdot 0{,}24\cdot 0{,}8}=0{,}42\text{ А}\ \ [21]$$

Действующее значение тока первичной обмотки w_1:

$$I_{w1}=I_{w1max}\sqrt{\frac{\gamma_{\max}}{3}}=0{,}42\sqrt{\frac{0{,}24}{3}}=0{,}12\text{ А}\ [21]$$

Коэффициент трансформации Т1:

$$n=\frac{w_2}{w_1}=\frac{(U_{H1}+U_{\partial np})(1-\gamma_{\max})}{\gamma_{\max}(E_{n\min}-U_{сиоткр})}=\frac{(12+1)(1-0{,}24)}{0{,}24(237-2)}=0{,}22\ [21]$$

Действующее значение тока вторичной обмотки w_2 и диода VD9:

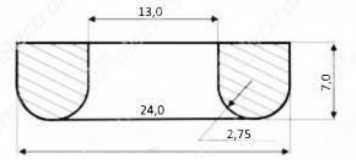
$$I_{w1}=\frac{I_{w1}}{n\sqrt{\frac{1-\gamma_{\max}}{3}}}=\frac{0{,}12}{0{,}22\sqrt{\frac{1-0{,}24}{3}}}=1{,}1\text{ А}\ \ [21]$$

Индуктивность первичной обмотки трансформатора Т1:

$$L_1=\frac{\gamma_{\max}E_{n\min}}{I_{w1max}f_{np}}=\frac{0{,}24\cdot 237}{0{,}42\cdot 20}=6{,}8\text{ мГн}[21]$$

«Из справочника [21] выбираем ферритовый сердечник МП140 2(К24х13х7) (рисунок 19). (Выбор сделан такого типа сердечника, потому что для него была методика расчета. Делалось согласно рекомендациям в МУ [11] для аналогичной схемы)» [21].

Рисунок 19 – Сердечник МП140(К24х13х7)



«Характеристики МП140 (К24х13х7):

− площадь поперечного сечения S_c=0,385см^2;

− средняя длина силовой линии $l_{ср}$=5,8см;

− магнитная проницаемость μ=140» [12].

Находим число витков первичной обмотки:

$$w_1 = 10^4\sqrt{\frac{L_1 I_{cp}}{1{,}26\cdot\mu\cdot S_c}} = 10^4\sqrt{\frac{6{,}8\cdot10^{-3}\cdot5{,}8}{1{,}26\cdot140\cdot0{,}385}} = 230 \text{ [21]}$$

Рассчитаем приращение магнитной индукции за время действия импульса тока первичной обмотки:

$$\Delta B = 10^4\,\frac{E_{n\min}\gamma_{\max}}{w_1 S_c f_{np}} = 10^4\,\frac{237\cdot0{,}24}{230\cdot0{,}358\cdot20\cdot10^3} = 0{,}35 \text{ Тл [21]}$$

Типоразмер сердечника выбран верно,так как ΔB=0,35Тл<$B_{нас}$=0,4Тл [11]. Из справочника. [12]

Коэффициент трансформации обмотки w_{cy} питания схемы управления по отношению к w_1.

$$n_{cy} = \frac{w_{cy}}{w_1} = \frac{(U_{cy} + U_{дсу})(1-\gamma_{max})}{\gamma_{max}(E_{n\min} - U_{сиоткр})} = \frac{(14+1)(1-0{,}24)}{0{,}24(237-2)} = 0{,}2 \quad [21]$$

где U_{cy} = 14В – питание DA1;

$U_{дсу}$– прямое падение напряжения на диоде VD7.

Находим число витков остальных обмоток Т1:

$$w_2 = n w_1 = 0{,}22 \cdot 230 = 50$$

$$w_{cy} = n_{cy} w_1 = 0{,}2 \cdot 230 = 46 \quad [21]$$

Определяем диаметр провода с изоляцией для первичной обмотки при условии расположения в один слой:

$$d_{1п} = \frac{\pi d}{w_1} = \frac{3{,}14 \cdot 13}{230} = 0{,}18 \text{ мм} \quad [21]$$

где d– внутренний диаметр сердечника.

«Из справочных данных по обмоточным проводам [21], выбираем для первичной обмотки провод ПЭТВ-2 с диаметром 0,2 мм без изоляции. Сечение провода $S_{1п}$ = 0,03142 мм^2, а сопротивление 1 м провода (погонное сопротивление): $r_{1пог}$ = 0,572 Ом/м» [21].

Плотность тока в первичной обмотке:

$$j_1 = \frac{I_{w1}}{S_{1n}} = \frac{0{,}12}{0{,}03142} = 3{,}8 \text{ А/мм}^2$$

Длина провода первичной обмотки:

$$l_{1п} = [2h+2(D-d)]w_1 = [2 \cdot 7 + 2(24 - 13)]230 = 8280 \text{ мм}$$

Потери мощности в первичной обмотке:

$$P_{1п} = I_{w1}^2 l_{1п} r_{1п} = 0{,}12^2 \cdot 8{,}28 \cdot 0{,}572 = 0{,}07 \text{ Вт}$$

Потери мощности незначительны, поэтому ими можно пренебречь.

Находим диаметр провода вторичной обмотки без изоляции:

$$d_{2пр} = 1{,}13\sqrt{\frac{I_{w2}}{j_{max}}} = 1{,}13\sqrt{\frac{1{,}1}{4}} = 0{,}59 \text{ мм}$$

Выбираем провод ПЭТВ-2-0,59 с сечением $S_{2п}$ = 0,2734 мм^2, а сопротивление 1 м провода (погонное сопротивление): $r_{2пог}$ = 0,063 Ом/м.

Определяем длину провода вторичной обмотки с учетом w_1 и изоляции между обмотками:

$$l_{2пп} = [2(h + 2) + (D – d + 2)]w_2 = [2(7 + 2) + 2(24 – 13 + 2)]51 = 2244 \text{ мм}$$

Потери мощности во вторичной обмотке:

$$P_{2пп} = I_{w2}^2 l_{2ппо} r_{2ппо} = 1{,}1^2 \cdot 2{,}244 \cdot 0{,}063 = 0{,}17 \text{ Вт}$$

Ток обмотки $w_{су}$ трансформатора не превышает 10 мА и для нее выбираем провод ПЭТВ-2 – 0,1.

6. Выбираем тип транзистора VT1. Действующее значение тока стока транзистора VT1 $I_с = I_{w1}$ = 1,1 А. Максимальное напряжение сток- исток:

$$U_{сиmax} = E_{пmax} + \frac{U_{Н1} + U_д}{n} + U_{LS} = 341 + \frac{12 + 1}{0{,}22} + 25 = 425 \text{ В}$$

где U_{LS} - напряжение, вызванное накоплением тока в индуктивности рассеяния обмотокТ1.На предварительном этапе расчета принимается равным 25 В.

Выбираем в качестве VT1 транзистор 2N60G со следующими характеристиками: $U_{сиmax}$ = 600 В, $I_{сmax}$ = 2 А, $R_{сиоткр.}$ = 4 Ом (рисунок 20). Транзистор выбираем в компактном корпусе SOT-223 [21].

SOT-223

Рисунок 20 – Транзистор2N60G

Определяем статические потери мощности в транзисторе 2N60G[11]:

$$P_{VT1ст} = R_{си.откр.} \cdot I_{w1}^2 [1+0{,}007(T_п - T_{окр.})] = 4_. \cdot 0{,}12^2 \cdot [1+0{,}007(120 - 50)] = 0{,}08 \text{ Вт}.$$

где $R_{си.откр.}$ - сопротивление открытого транзистора при 25°С;

$T_{окр.}$-максимальная температура окружающей среды;

$T_{п}$- максимальная температура перехода VT1.

Потери мощности при выключении VT1[11]:

$$P_{выклVT1} = \frac{I_{w1max} \cdot U_{cimax} \cdot t_{сп} \cdot f_{пр}}{2} = \frac{0{,}42 \cdot 425 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{3}}{2} = 0{,}18 \text{ Вт}[21]$$

Суммарная рассеиваемая мощность транзистором VT1:

$$P_{VT1} = P_{VT1\ ст} + P_{выкл\ VT1} = 0{,}08 + 0{,}18 = 0{,}26 \text{ Вт}$$

7. «Рабочие условия для диода VD8 такие же, как и у VT1. Выбираем с запасом быстродействующий диод ES2J. Технические характеристики ES2J:

- максимальное постоянное обратное напряжение, В–600;
- максимальный (средний) прямой ток, А–2;
- время обратного восстановления, нс–20;
- максимальное прямое напряжение, В - 0,9.

Внешний вид диода ES2J показан на рисунке 21» [21].

Рисунок 21–Диод ES2J

8. Далее выбираем элементы схемы управления.

«Элементы внешних цепей DA1 выбираются в соответствии с технической документацией на микросхему. Микросхема ШИМ-контроллер DA1 UC3842B имеет следующие технические характеристики: максимальный выходной ток, А– 1; максимальный выходной ток, В–11…30; максимальная частота преобразования, кГц–500; максимальная скважность, %–100» [21].

Будем использовать UC3842B в корпусе SOP-8 (рисунок 22).

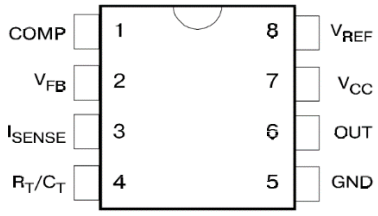


Рисунок 22 - Микросхема UC3842B

Находим номинал резистора *R*6 в цепи питания DA1:

$$R6 = \frac{E_{n\min} - U_{зап}}{I_{зап}} = \frac{237 - 16}{1 \cdot 10^{-3}} = 221 \text{ кОм [21]}$$

где $U_{зап}$– напряжение запуска DA1;

$I_{зап}$– ток запуска DA1.

Ближайшим из стандартного ряда Е24 является резистор сопротивлением 220 кОм.

Мощность, рассеиваемая R6:

$$P_{R6} = \frac{E_{n\max} - U_{су}}{R6} = \frac{(340 - 14)^2}{220 \cdot 10^3} = 0{,}48 \text{ Вт[21]}$$

«Напряжение на выводе 3 DA1 равно падению напряжения на резисторе R10 и составляет $U_{3имс}$ = 1 В. Исходя из того, что амплитуда импульса тока, протекающего через резистор R10, должна находиться в пределах 0,5... 1,0 мА, выбираем его сопротивление равным 1,2 кОм» [21].

В качестве диода VD6 выбираем FR104.

«Основные параметры диода FR104: Максимальное постоянное обратное напряжение, В–400; Максимальный (средний) прямой ток на диод, If(AV)(A)– 1; Время обратного восстановления, Trr(нс)– 150» [21].

Примем, что падение напряжения на диоде VD6. равно $U_{дтпр}$ = 1,2 В, найдем сопротивление резистора R9:

$$R9 = \frac{(0{,}75R_{сиоткр}I_{w1\max} + U_{дтпр} - U_{3имс})R10}{U_{3имс}} = \frac{(0{,}75 \cdot 4{,}2 \cdot 0{,}42 + 1{,}2 - 1)1{,}2}{1} = 1{,}8 \text{ кОм}$$

R8 выбирается из следующих условий [11]:

$$\frac{U_{су}}{I_{R10\max}} \le R8 \le \frac{U_{выкл}(R9+R10)}{0{,}75R_{сиоткр}I_{w1\max}+U_{отпр}} \text{-(R9 – R10)}$$

$$\frac{14}{0{,}01} \le R8 \le \frac{10(1800+1200)}{0{,}75\cdot 4{,}2\cdot 0{,}42+1{,}2} \text{ - (1800 +1200) [21]}$$

$$1400 \le R8 \le 9000 \quad \text{Ом}$$

Выбираем *R*8=4,3кОм.

$$\text{I}_3 = \frac{Q_3}{t_{сп}} = \frac{7{,}2\cdot 10^{-9}}{100\cdot 10^{-9}} = 0{,}072 \text{ А[21]}$$

где Q_3 – полный заряд емкости затвор-исток транзистора VT1 (7,2нКл для транзистора 2N60G) [13];

$t_{сп}$ – время переключения VT1.

UDA1UC3842B максимальный выходной ток 1А.

$$\text{R11} = \frac{U_y}{I_3} = \frac{14}{0{,}072} = 194{,}4 \text{ Ом[21]}$$

Стандартный номинал для *R*11=200Ом.

Из технической документации на UC3842B определяем емкость C7:

$$\text{C7} = \frac{1{,}8}{R5\,f_{пр}} = \frac{1{,}8}{20000\cdot 20000} = 4500 \text{ пФ[21]}$$

Выбираем конденсатор К10-17Б4700пФ±10%50В,(рисунок 24).

Рисунок 24 – Конденсатор К10-17Б

9. Рассчитываем элементы цепи схемы сравнения. В качестве DA2 выбрана микросхема TL431CLP. Её расположение выводов показано на рисунке 25.

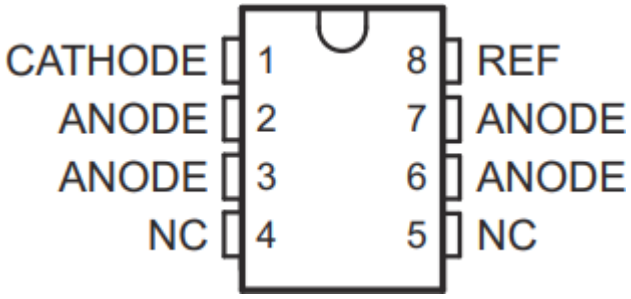


Рисунок 25 – Микросхема TL431CLP

«Технические характеристики TL431CLP: выходное напряжение 2,495…36В; выходной ток 100 мА; точность ±2.2%; тип выхода-регулируемый» [21].

«Рассчитываем резисторы в цепи делителя R14, R15. Внутреннее опорное напряжение DA2 схемы сравнения равно $U_{опсс}$ = 2,5 В. Оно формируется при помощи делителя напряжения R14, R15. Выбираем величину тока через делитель $I_{дел}$ = 10 мА. Тогда сопротивление R15 можно найти по формуле:

$$R15 = \frac{U_{опсс}}{I_{делсс}} = \frac{2,5}{0,01} = 250 \text{ Ом}$$

В соответствии с номинальным рядом Е24 выбираем резистор на 240Ом.

$$R14 = \frac{U_{H1} - U_{опсс}}{I_{дел}} - R15 = \frac{12 - 2,5}{0,01} - 240 = 710 \text{ Ом»} [21].$$

10. Находим емкость конденсатора С13:

$$C13 = \frac{L_S I_{c\max}^2}{\Delta U_{си}^2} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,42^2}{25^2} = 0,00336 \text{ мкФ}[21]$$

Амплитудное значение напряжения на С13:

$$U_{C12} = (U_{H1} + U_{дв}) \frac{w_1}{w_2} + \Delta U_{сд} = (12 + 1) \frac{230}{51} + 25 = 83,7 \text{ В}[21]$$

Выбираем конденсатор К10-17Б 3300 пФ±10% 250 В.

Сопротивление резистора R13 рассчитываем исходя из того, что напряжение на конденсаторе С13 уменьшается на величину $\Delta U_{сд}$ за период $T=1/f_{пр}$ чтобы к следующему моменту выключения транзистора конденсатор

смог «поглотить» следующий импульс тока, накопленный в индуктивности рассеяния. Закон изменения напряжения на С13 имеет вид:

$$u_c(t) = U_{C13}\exp\frac{t}{R1C13}\ [21]$$

Из формулы находим *R*13:

$$R13 = \frac{-1}{f_{пр}C13\ln\frac{U_{c13max} - \Delta U_{C13}}{U_{C13max}}} = \frac{-1}{20\cdot10^3\cdot3{,}3\cdot10^{-9}\ln\frac{84-25}{84}} = 42{,}9\ \text{кОм}$$

Для обеспечения заведомо полного разряда демпфирующего конденсатора С13 во всех режимах работы преобразователя величину сопротивления резистора *R*13 выбираем в два раза меньше расчетной прядка 22 кОм.

Находим напряжение на *R*13:

$$U_{R13} = \frac{U_{H1} - U_{дпр}}{n} = \frac{12+1}{0{,}22} = 59\ \text{В}\ [21]$$

Рассеиваемая мощность на *R*1:

$$P_{R13} = \frac{U_{R13}^2}{R13} = \frac{59^2}{22000} = 0{,}16\ \text{Вт}$$

«Выбираем резистор R13 мощностью 0,25 Вт.

В качестве диода VD9 выбираем диод Шоттки В 340А.

Технические характеристики В340А:

−максимальное постоянное обратное напряжение, В–40;

−максимальный (средний) прямой ток, А–3;

−обратный ток утечки, мкА–500;

−максимальное прямое напряжение, В - 0,55» [11].

11. Находим емкости конденсаторов сглаживающего фильтра С14,С15:

$$C14 = C15 = \frac{k_{эпс}\gamma_{max}I_{H\,max}}{\Delta U_{H\,max}f_{пр}} = \frac{5\cdot0{,}24\cdot1}{0{,}5\cdot20000} = 476\ \text{мкФ}$$

Выбираем конденсаторы ECAP 470мкФ 25В, ±20%.

В качестве транзисторного оптрона U1 выбираем TCLT1102 (рисунок 26).

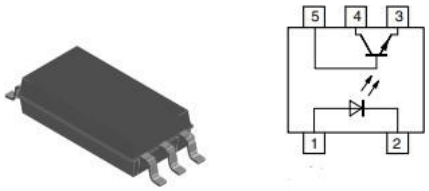


Рисунок 26 –Оптрон TCLT1102

«Оптрон TCLT1102 имеет следующие технические характеристики: максимальный ток коллектора – 100мА; максимальное напряжение коллектор – эмиттер–80В; максимальный прямой ток светодиода –60мА» [21].

«Требуемая величина индуктивности дросселя L2 обычно не велика и составляет несколько десятков мкГн. Она реализуется путем использования малогабаритных высокочастотных дросселей. В качестве L2 выберем SMD дроссель B82472G6223M000 на 22 мкГн, 1,45 А. Внешний вид дросселя приведен на рисунке 27» [21].

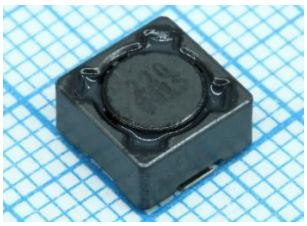


Рисунок 27 – Дроссель B82472G6223M000

12. Далее выбираем элементы узла регулируемого стабилизатора напряжения на DA3. Внешний вид микросхемы показан на рисунке 28.

Рисунок 28 – Микросхема LM317

Для реализации узла стабилизации напряжения выбрана интегральная микросхема LM317 (обозначение в схеме – DA3), обладающая следующими техническими характеристиками [21]

– диапазон регулируемого выходного напряжения составляет от 1,2 до 37 В;

– максимально допустимый ток нагрузки не превышает 1,5 А;

– предельное входное напряжение микросхемы составляет 40 В;

– рабочий диапазон температурного режима микросхемы варьируется от -40 °С до +125 °С.

Для обеспечения необходимого диапазона регулировки выходного напряжения устанавливается переменный резистор стандартного номинала сопротивления. В данном случае выбран переменный резистор типа PTV09A-4225F-B102 с номиналом сопротивления 1 кОм (представлен на рисунке 29).

Рисунок 29 – Переменный резистор PTV09A-4225F-B102

Необходимо подобрать резистор R17 таким образом, чтобы напряжение изменялось на выходе от 5 до 9 Вольт. Для этого используем формулу их технической документации на микросхему LM317 [21]:

$$V_0 = V_{ref}(1 + R/R19) + I_{ADJ}R \quad \text{где } V_{ref} \approx 1{,}25\text{В};$$

$I_{ADJ} \approx 50$мкА;

$R = R18 + R17$.

В качестве $R19$ выберем номинал 230 Ом из рекомендуемого диапазона 200 до 270 Ом. Для 9 В на выходе:

$$R = \frac{R19 \cdot V_0 - V_{ref}}{(V_{ref} + R19 \cdot I_{ADJ})} = \frac{230 \cdot 9 - 1{,}25}{(1{,}25 + 230 \cdot 0{,}00005)} = 1642 \text{ Ом[21]}$$

Выбираем стандартный резистор 634Ом 08051%RI0805L6340FT чип-

резистор.

$$V_{min} = 1{,}25(1+ 643/230) + 0{,}00005 \cdot 634 = 4{,}7 \text{ В}$$

По условию напряжение на выходе регулируется от 5 В. Учитывая разброс параметров резисторов ±10 % данный по условию диапазон регулирования будет реализован. Так же будет выполнена проверка при моделировании.

«Диоды VD10, VD11 выполняют защитную функцию от перегрузок DA3. Выбираем диоды SS14, имеющие следующие технические характеристики:

−максимальное постоянное обратное напряжение, В–40;

−максимальный (средний) прямой ток, А–1;

−обратный ток утечки, мкА–200;

−максимальное прямое напряжение, В - 0,5» [21].

Диоды SS14 выпускаются в корпусе do-214ac/sma (рисунок 30).

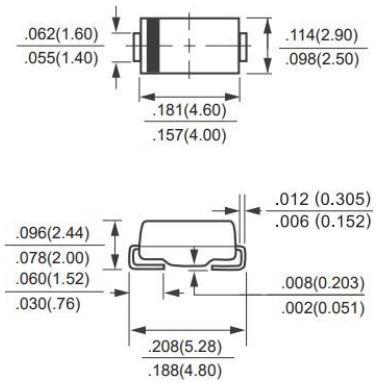


Рисунок 30– Диод SS14

«Рекомендуемые номинальные значения емкости конденсаторов по технической документации на LM317 для С16, С17 – 100 мкФ и 10 мкФ. Выбираем конденсаторы ECAP 100 мкФ 25В, ±20% и ECAP 10мкФ25В,±20%» [22].

2.3. Моделирование работы элементов схемы в среде имитационного моделирования

В процессе проектирования и анализа электронных схем блока питания оптимальным инструментом является метод компьютерного моделирования, реализуемый с использованием специализированных программных комплексов. Среди широкого спектра существующего программного обеспечения заслуженной востребованностью пользуется система Multisim, ориентированная на виртуальное исследование параметров и режимов работы аналоговых и цифровых электронных устройств. Отличительной особенностью данного программного комплекса выступает набор виртуальных измерительных инструментов, по функциональным возможностям и пользовательскому интерфейсу максимально приближенных к традиционным лабораторным приборам. Подобное решение обеспечивает высокую степень соответствия получаемых результатов реальным рабочим условиям, что существенно повышает точность анализа и эффективность этапов проектирования устройства.

В рамках настоящего исследования применяется версия Multisim 12.0. Программный комплекс обладает удобным и интуитивно понятным интерфейсом, адаптированным под стандартные пользовательские принципы работы с программами операционной системы Windows. Multisim 12.0 предоставляет разработчику возможность реализации двух принципиально различных подходов к моделированию.

Первый подход, условно обозначаемый как классическое схемотехническое моделирование, аналогичен режимам работы распространённых программ аналогичного назначения — PSpice или Micro-Cap. Этот вариант характеризуется высоким быстродействием и является оптимальным при проверке принципиальных схем на стабильность и точность работы при длительном цикле моделирования.

Альтернативный подход — моделирование в реальном времени с привлечением виртуальных приборов, таких как мультиметры, осциллографы, вольтметры и другие измерительные устройства. Данный способ несколько увеличивает расчётные затраты ресурсов системы, поскольку требует анализа поведения схемы на протяжении одного-двух периодов в целях изучения стационарных периодических процессов. Вместе с тем преимущество такого метода состоит в высокой наглядности получаемых результатов и возможности максимально приближённого к реальным условиям исследования поведения схемы. Именно это обстоятельство делает моделирование в реальном времени предпочтительным инструментом на ранних стадиях проектирования и отладки электронных схем.

Таким образом, применение программного комплекса Multisim 12.0 предоставляет разработчикам широкие возможности для комплексного и высокоточного анализа создаваемых электронных устройств, снижает вероятность проектных ошибок и существенно ускоряет процесс разработки благодаря наглядности и удобству взаимодействия с виртуальными приборами.

Результаты моделирования представлены на скриншотах (рисунки 31 - 34).

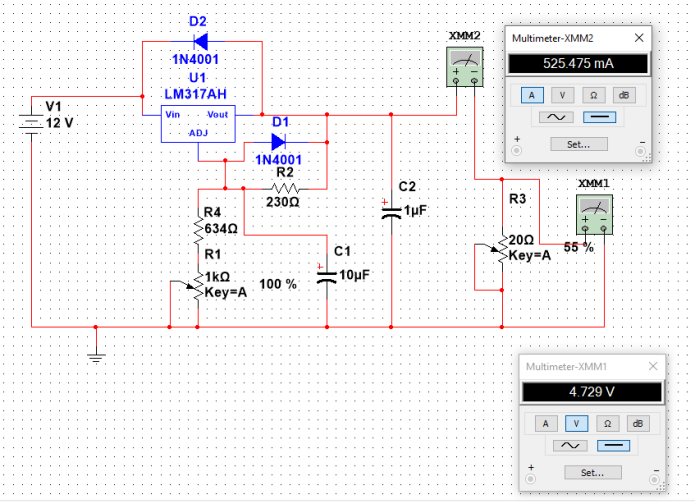


Рисунок 31 – Минимальное значение выходного напряжения 4,729В

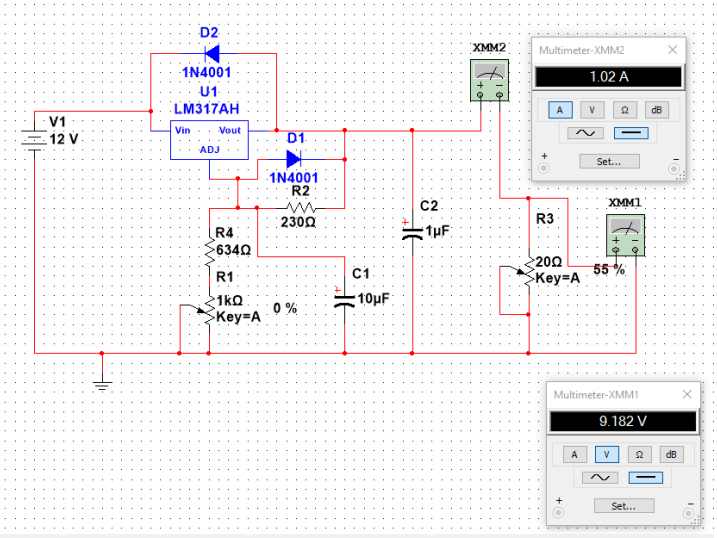


Рисунок 32 – Максимальное значение выходного напряжения 9,182В

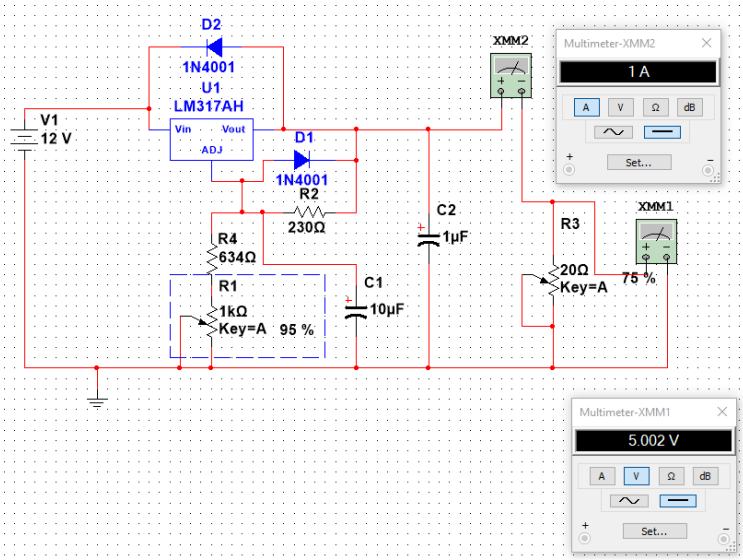


Рисунок 33 – Работа при максимальном токе нагрузки 1А и напряжении 5 В

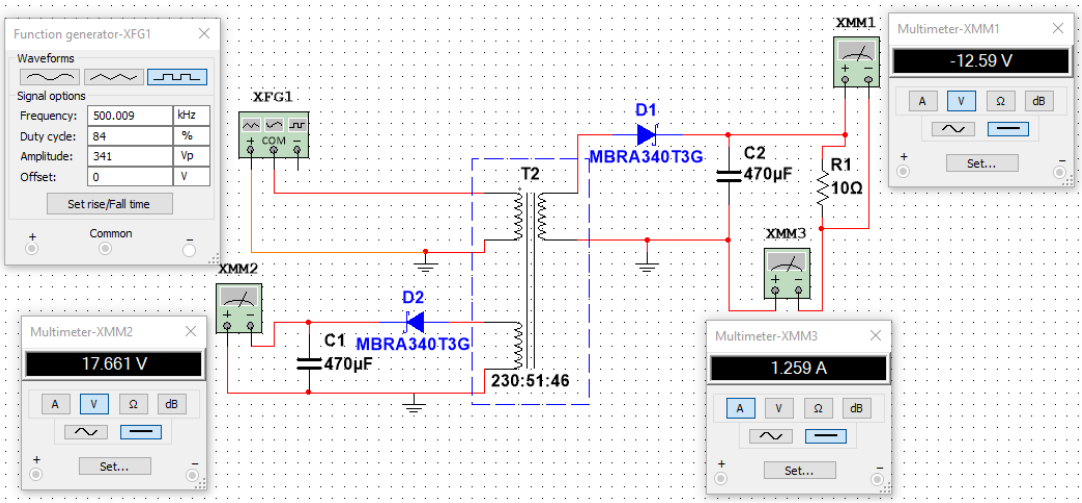


Рисунок 34 – Работа трансформатора от генератора прямоугольных импульсов.

Результаты проведённого моделирования полностью подтвердили корректность выполненных расчётов для импульсного трансформатора и подтвердили обоснованность выбора электронной компонентной базы, в частности, элементов регулирующего узла стабилизации напряжения, построенного на основе интегральной микросхемы LM317.

По итогам второй главы была успешно спроектирована подробная принципиальная схема адаптера, выполнены необходимые аналитические расчёты параметров её элементов, подобраны компоненты с учётом заданных технических требований и выполнена проверка работоспособности узла стабилизации посредством компьютерного моделирования с использованием программного комплекса Multisim 12.0.

3. Технологический раздел

3.1. Технология разработки печатной платы

В современном проектировании печатных плат широкое распространение получили специализированные программные комплексы, так называемые системы автоматизированного проектирования (САПР). Среди наиболее востребованных на практике решений выделяются такие программные платформы, как Altium Designer, OrCAD, EasyEDA и KiCAD. Рассмотрим кратко особенности и сферы применения указанных САПР.

Первой следует упомянуть профессиональную программную платформу Altium Designer, ориентированную на комплексную разработку электронных схем и печатных плат. Отличительными особенностями этого пакета являются широкие функциональные возможности, позволяющие реализовывать полноценное проектирование печатных узлов (PCB), встроенные средства трёхмерной визуализации и моделирования, развитый функционал для трассировки и анализа цепей, а также возможности командной работы над проектами. Продукт предназначен, прежде всего, для специалистов высокой квалификации и профессиональных инженеров, занятых проектированием сложных электронных систем.

Следующим программным комплексом является OrCAD, объединяющий несколько инструментов проектирования, включая OrCAD Capture и OrCAD PCB Designer.

EasyEDA представляет собой «веб-ориентированную платформу для проектирования электронных схем и печатных плат. Преимуществами данного решения выступают максимально простой и удобный интерфейс пользователя, возможность проектирования непосредственно в интернет-браузере без установки специализированного программного обеспечения» [21], наличие облачного хранения и совместной работы над проектами. EasyEDA доступна в виде как бесплатной, так и платной версии и ориентирована преимущественно на студентов, начинающих специалистов и разработчиков, предпочитающих простоту и оперативность в работе.

Платформа KiCAD представляет собой свободно распространяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом, предназначенное для разработки электронных схем и проектирования печатных плат.

К числу ключевых преимуществ такого рода программных продуктов можно отнести мультиплатформенность, благодаря которой обеспечивается их функционирование в различных операционных системах, таких как Windows, macOS и Linux. Важным достоинством является также наличие интегрированного набора инструментов, позволяющего осуществлять как принципиальное схемотехническое проектирование, так и разработку печатных плат. Открытый исходный код обеспечивает возможность активного участия сообщества в совершенствовании функционала программы путём создания дополнительных модулей и расширений. Отсутствие необходимости в приобретении лицензий существенно облегчает доступ к этим инструментам широкой аудитории пользователей.

Подобные программные комплексы предназначены, прежде всего, для пользователей, отдающих предпочтение открытым технологиям, а также для студентов и разработчиков-новичков, стремящихся получить практический опыт при ограниченных финансовых ресурсах. Выбор того или иного продукта зависит от специфики задач, уровня подготовки специалистов и ресурсов, которыми располагает разработчик.

Вместе с тем, для выполнения задачи по конструированию печатной платы адаптера принято решение использовать специализированные профессиональные программные пакеты Altium Designer 17 и AutoCAD 2023. Altium Designer 17 обеспечивает полную интеграцию всех этапов проектирования – от создания схем принципиального типа до подготовки файлов для автоматизированного монтажа электронных компонентов. Существенным преимуществом этого программного комплекса выступает концепция единого проектного пространства, объединяющего весь объём документации по разрабатываемому устройству, что значительно упрощает процесс управления проектами повышенной сложности и сокращает время на разработку.

Вся документация, которая необходима для производства и сборки изделий на базе печатных плат может быть получена непосредственно из AltiumDesigner 17, без использования сторонних систем.

Современные системы автоматизированного проектирования электроники, такие как Altium Designer 17, несмотря на свои многочисленные преимущества, не обеспечивают полное выполнение всего комплекса проектных работ, необходимого для подготовки конструкторской документации согласно Единой системе конструкторской документации (ЕСКД). Результатом работы данных САПР является, как правило, цифровая модель печатной платы и соответствующие управляющие файлы для автоматического производства. Эти данные вполне подходят для организации «бездокументного» производственного процесса, однако большинство производственных предприятий придерживаются традиционных подходов, предусматривающих выпуск полного комплекта документации, как в печатном, так и в цифровом формате, строго соответствующего требованиям стандартов ЕСКД.

Для решения задачи по окончательной подготовке и оформлению необходимой конструкторской документации была выбрана система AutoCAD версии 2023, как одна из наиболее функциональных и распространённых платформ для инженерного проектирования. Данное программное решение позволяет полноценно оформить чертежи, схемы и другую проектную документацию, обеспечивая её соответствие действующим нормам и стандартам.

Перенос проектной информации из Altium Designer 17 в AutoCAD реализуется посредством экспорта слоёв печатной платы в стандартный формат DXF, который поддерживается обеими системами. Такой подход позволяет специалистам эффективно использовать преимущества обеих платформ: удобство и специализированные возможности Altium Designer для проектирования электроники и широкие графические и документальные возможности AutoCAD для оформления конструкторской документации.

Процесс проектирования любого электронного устройства начинается с разработки принципиальной схемы, основу которой формируют компоненты, представленные в стандартных библиотеках выбранного программного пакета. Однако на практике нередко возникает необходимость применения специализированных или уникальных элементов, отсутствующих в базовом наборе библиотеки. В таких случаях проектировщик формирует собственные, индивидуальные библиотеки с соответствующими компонентами. После того как создание схемы завершено, осуществляется процедура её компиляции и верификации для выявления и устранения возможных ошибок и несоответствий. Завершённая и проверенная схема затем переносится в специализированную среду для проектирования печатной платы.

На следующем этапе проектирования печатной платы происходит определение её основных физических параметров и технических характеристик: задаются общие габаритные размеры платы, выбирается необходимое количество её слоёв, проводится размещение компонентов. После этого формируется подробный перечень требований для трассировки, включающий в себя следующие параметры: ширина проводящих дорожек в зависимости от пропускаемого тока и функционального назначения цепей, условия прохождения и обхода контактных площадок, допустимые значения углов и радиусов изгибов трасс, минимальные расстояния между соседними проводниками, требования по межслойным переходам и размерам отверстий для монтажа компонентов, а также точное позиционирование элементов, предназначенных для поверхностного монтажа. На данном этапе также устанавливаются производственные стандарты, учитывающие специфику последующих автоматизированных технологических операций и особенностей оборудования, используемого при изготовлении плат [21].

Процесс трассировки печатной платы реализуется двумя способами: автоматически и интерактивно. В автоматическом режиме система сама прокладывает дорожки, следуя заданным правилам и ограничениям. Интерактивный режим предполагает активное участие проектировщика,

задающего контрольные точки и направления трассировки, после чего система завершает прокладку проводников в соответствии с указанными параметрами. Такой метод позволяет учесть дополнительные нюансы компоновки и повысить качество проектирования.

На завершающих этапах проектирования возможны дополнительные корректировки: создание массивов проводящих областей, уточнение расположения компонентов и дорожек, а также оптимизация топологии платы для последующего выпуска документации и передачи проекта в производство. Подобный подход обеспечивает высокую эффективность, точность и соответствие проектных решений требованиям современного промышленного производства.

«Результатом работы являются чертеж печатной платы и необходимые производственные файлы. Форматы файлов, используемые для создания трафаретов для производства пустых плат, включают в себя GerberRS-274-X/X2, IPC-2581 и ODB++. Файлы для сверления NC используются при программировании сверлильных станков с ЧПУ для создания отверстий в пустой плате» [21].

3.2 Разработка печатной платы

«В зависимости от сложности схемы, реализуемой на печатной плате, а также возможностями технологического оборудования и экономическими критериями выбирают тип печатной платы:

– однослойная;

– двухслойная;

– многослойная» [21].

«Однослойные платы наиболее простые и дешевые, но имеют малые коммутационные способности. В современных устройствах радиоэлектроники наиболее часто используют двухслойные и многослойные платы» [21].

Для проектируемого адаптера будет использоваться двухслойная

печатная плата.

«На основании критериев при выборе класса точности печатной платы, приведенных в ГОСТ 23751-86 [22], самым подходящим является 3-й класс точности для разрабатываемой печатной платы. Печатные платы 3-го класса наиболее распространенные, поскольку, с одной стороны, обеспечивают достаточно высокую плотность трассировки и монтажа, а с другой – для их производства требуется рядовое, хотя и специализированное, оборудование.

Толщину печатной платы определяют в зависимости от механических нагрузок на неё и используемых материалов» [22]. Так же определяется диаметром отверстий. Обычно выполняется правило:

$$H > (2{,}5 \ldots 5)\, d_0$$

где H – толщина ПП, мм;

d_0– минимальный диаметр отверстий, мм.

Толщину платы определяем в зависимости от минимального диаметра отверстия. Для переходных отверстий d_0=0,5мм толщину печатной платы принимаем 1,5 мм.

Плата будет изготавливаться комбинированным позитивным методом.

«В настоящее время наиболее часто употребляемым материалом печатных плат являются стеклотекстолит. На основании технических характеристик, в качестве материала печатной платы устройства будем использовать стеклотекстолит фольгированный типа СФ-2-35-1.5 ГОСТ 10316–78»[21].

На начальном этапе разработки принципиальной схемы блока питания была использована специализированная среда Altium Designer версии 17 (результат разработки представлен на рисунке 38). Данный программный комплекс поставляется со встроенными интегрированными библиотеками, такими как MiscellaneousDevices.IntLib и MiscellaneousConnectors.IntLib, содержащими как условные графические обозначения компонентов, так и соответствующие им посадочные места на плате. В случаях, когда требуемые элементы схемы отсутствовали в стандартных библиотеках программного пакета, была привлечена дополнительная интегрированная библиотека с ресурса SnapEDA, предоставляющего расширенный каталог специализированных электронных компонентов с полным набором необходимых параметров и характеристик.

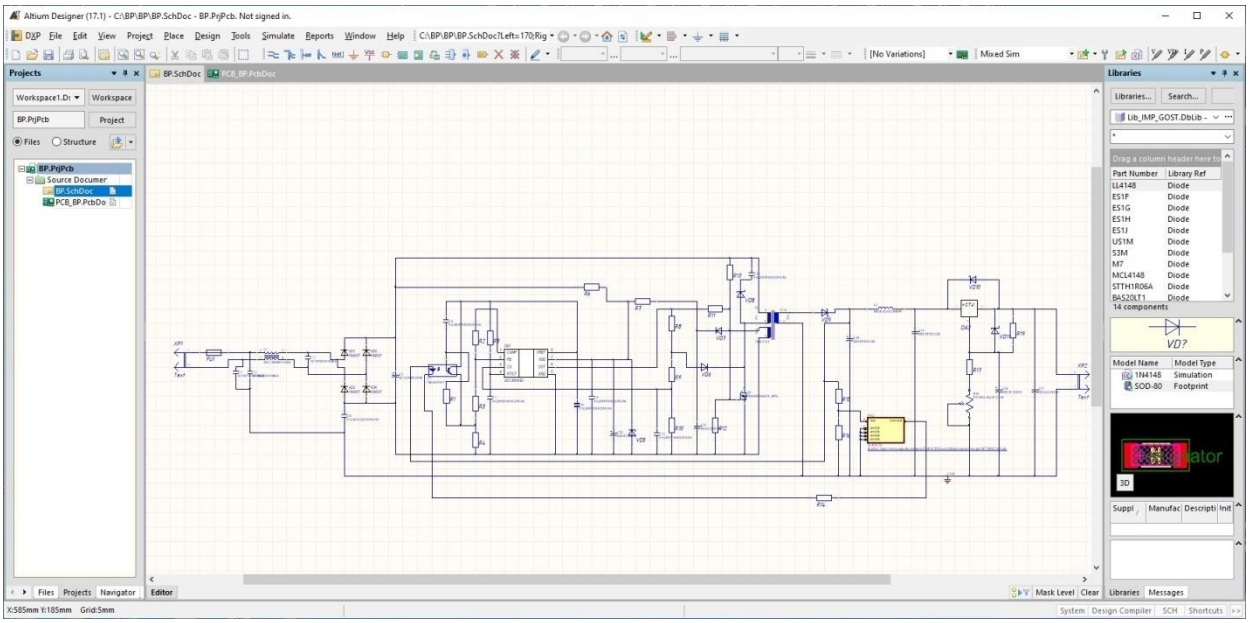


Рисунок 35 –Скриншот экрана редактора схем AltiumDesigner17

Разработанная схема содержит исчерпывающую информацию по всем используемым электронным компонентам, доступную непосредственно в рабочем поле проекта. Также предусмотрена возможность непосредственного редактирования характеристик и свойств элементов в среде проектирования.

В частности, можно изменять такие параметры, как назначение и маркировка выводов компонента, указание посадочного места на печатной плате и другие важные характеристики.

Копия экрана AltiumDesigner с запущенным редактором плат до трассировки представлена на рисунке 36.

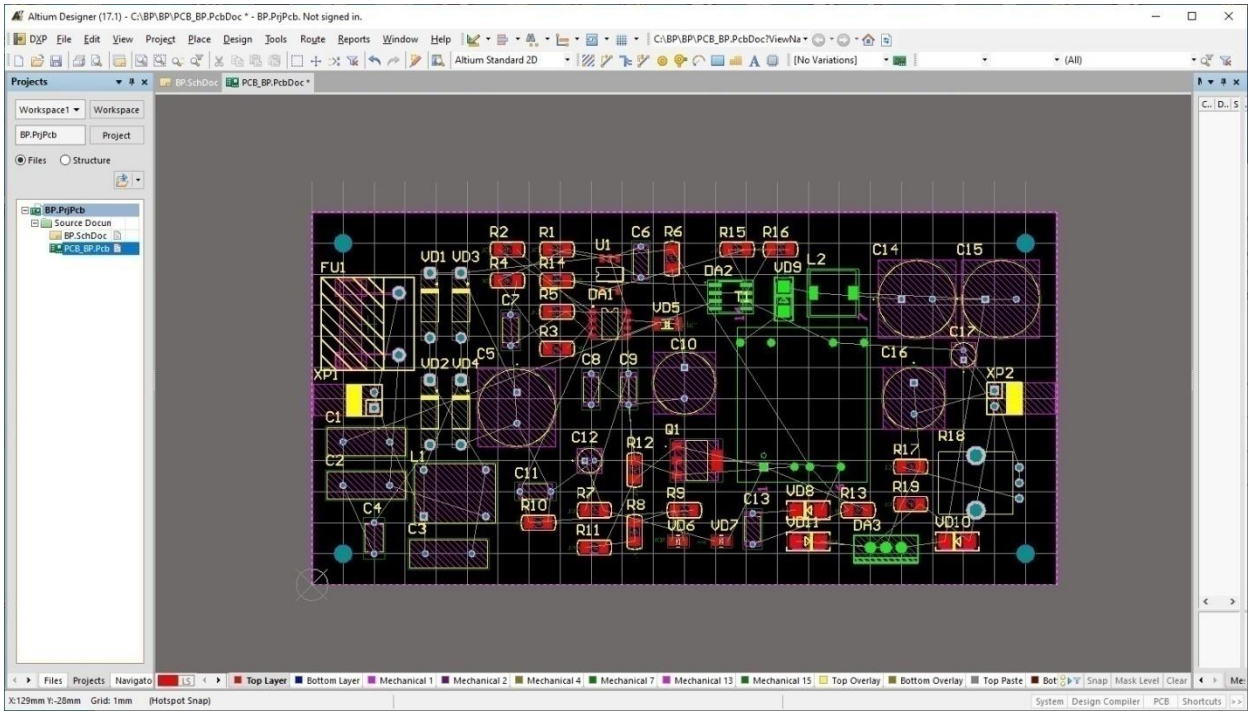


Рисунок 36 –Копия экрана AltiumDesigner17 с запущенным редактором плат

«Далее перед трассировкой выполняется настройка правил проектирования согласно параметров печатного монтажа.

Определяем минимальную ширину печатного проводника по постоянному току для цепей питания и заземления b_{min}, мм:

$$b_{min} = \frac{I_{max}}{j_{don} \cdot t}$$

где I_{max}–максимальный постоянный ток через проводник (определяется из анализа электрической схемы), А;

j_{don}–допустимая плотность тока, выбирается в зависимости от метода

изготовления ПП, А/мм^2 ;

t–толщина фольги, мм.

Тогда

$$b_{min} = \frac{1}{20 \cdot 0{,}035} = 1{,}4 \text{ мм» [21]}$$

Закладываем запас и выбираем ширину печатных проводников на силовом контуре с током 1 А равной 2,5 мм. Остальные дорожки проводим с шириной 0,8 мм. что улучшит теплорассеиваюшие способности всей печатной платы. Окно настройки правил трассировки с панелью задания правила ширины печатных проводников показано на рисунке 37.

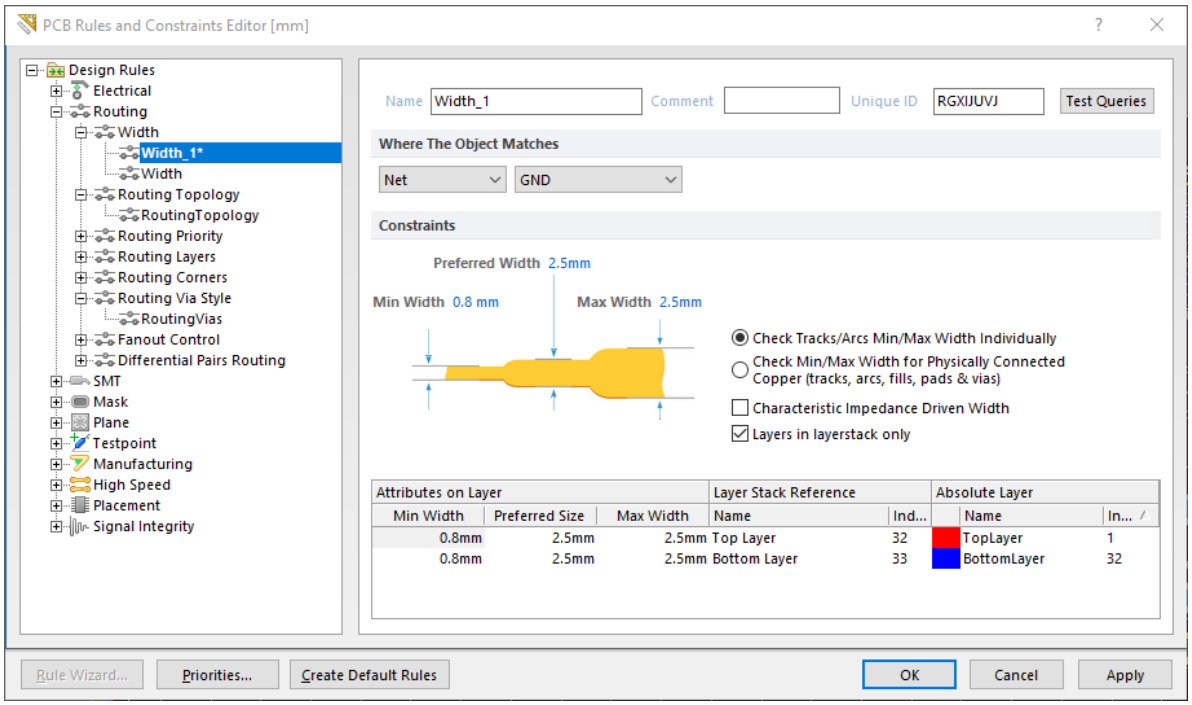


Рисунок 37 – Скриншот окна настройки ширины проводников

В следующем окне задаем параметры переходных отверстий (рисунок 38).

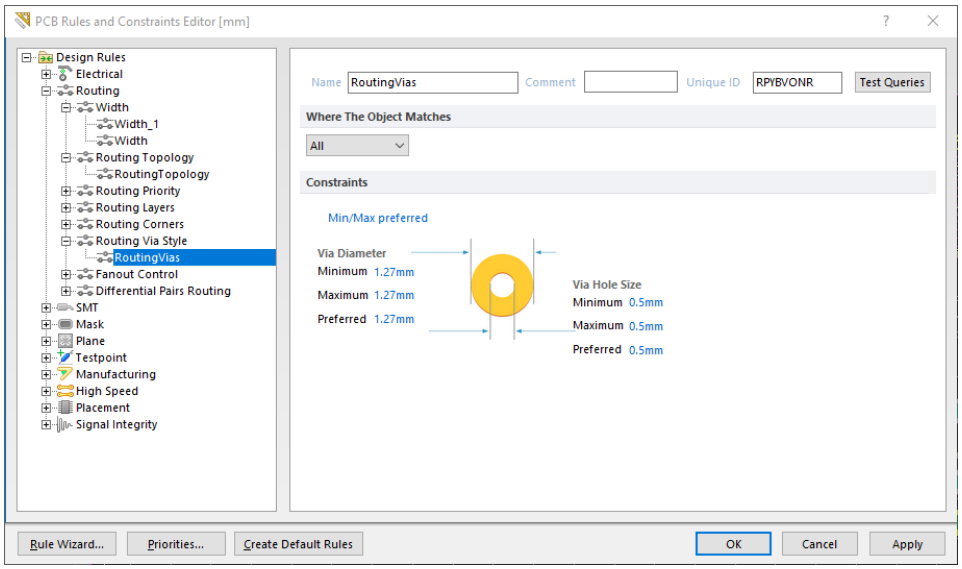


Рисунок 38 – Скриншот окна настройки переходных отверстий

Далее задается режим автоматической трассировки с последующим контролем результатов. Результаты трассировки платы представлены на рисунке 39.

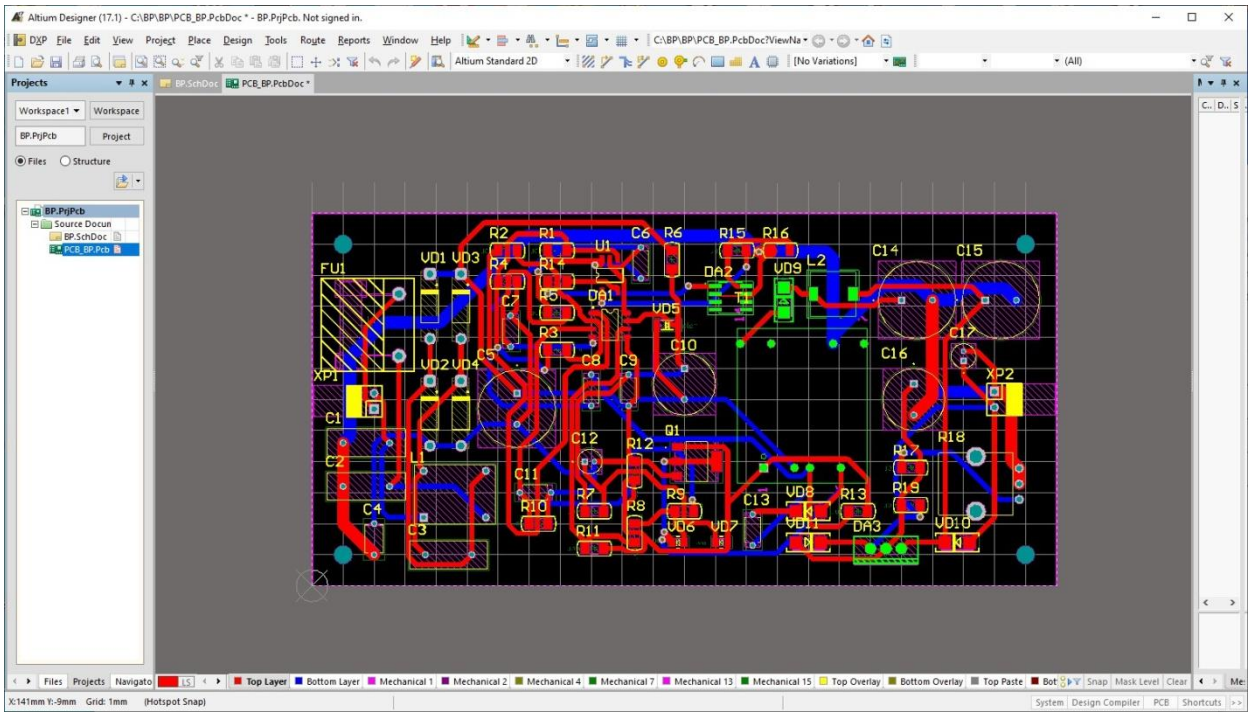


Рисунок 39 – Копия экрана AltiumDesigner17 после трассировки платы

«Экспорт PCB-документа в AutoCAD производится командой

File>Export. В диалоге сохранения файла указывается формат выходных данных - ExportAutoCADFiles (*.dwg; *.dxf). Открывается диалог настройки формата экспорта (рисунок 40)» [21].

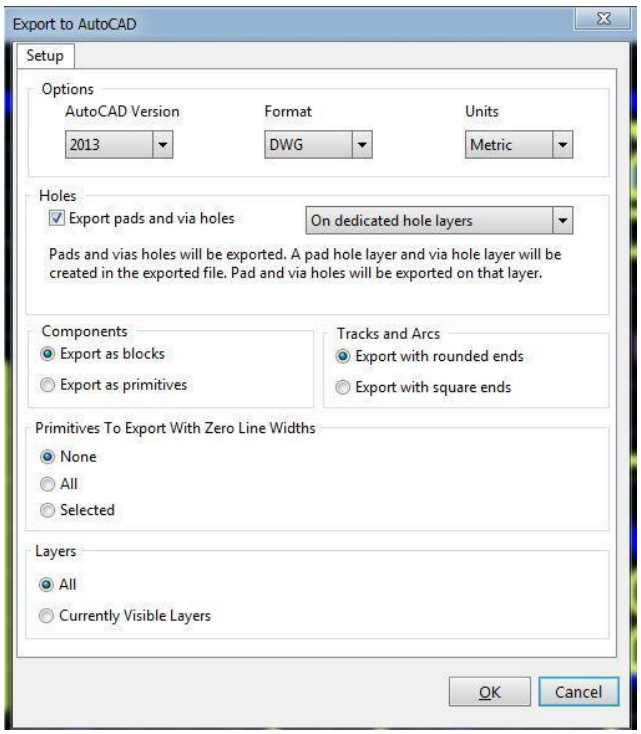


Рисунок 40 – Окно диалога настройки экспорта в AutoCAD

«Экспортированный из AltiumDesigner документ печатной платы открывается в AutoCAD в стандартном диалоге File>Open. Документ переносит в AutoCAD структуру слоев, сформированную в AltiumDesigner. Импортированный документ дорабатывается в пространстве модели AutoCAD в соответствии с требованиями ГОСТ» [23]. Доработка «включает следующие операции:

– настройку стиля написания текстов;

– настройку стиля нанесения размеров;

– образование новых слоев, необходимых для составления текстов, нанесения размеров и другие;

– составление текстовых технических требований для чертежа печатной платы и сборочного чертежа узла;

– нанесение размеров и предельных отклонений» [21].

В итоге оформлен чертеж печатной платы блока питания и сборочный чертеж (рисунок 41).

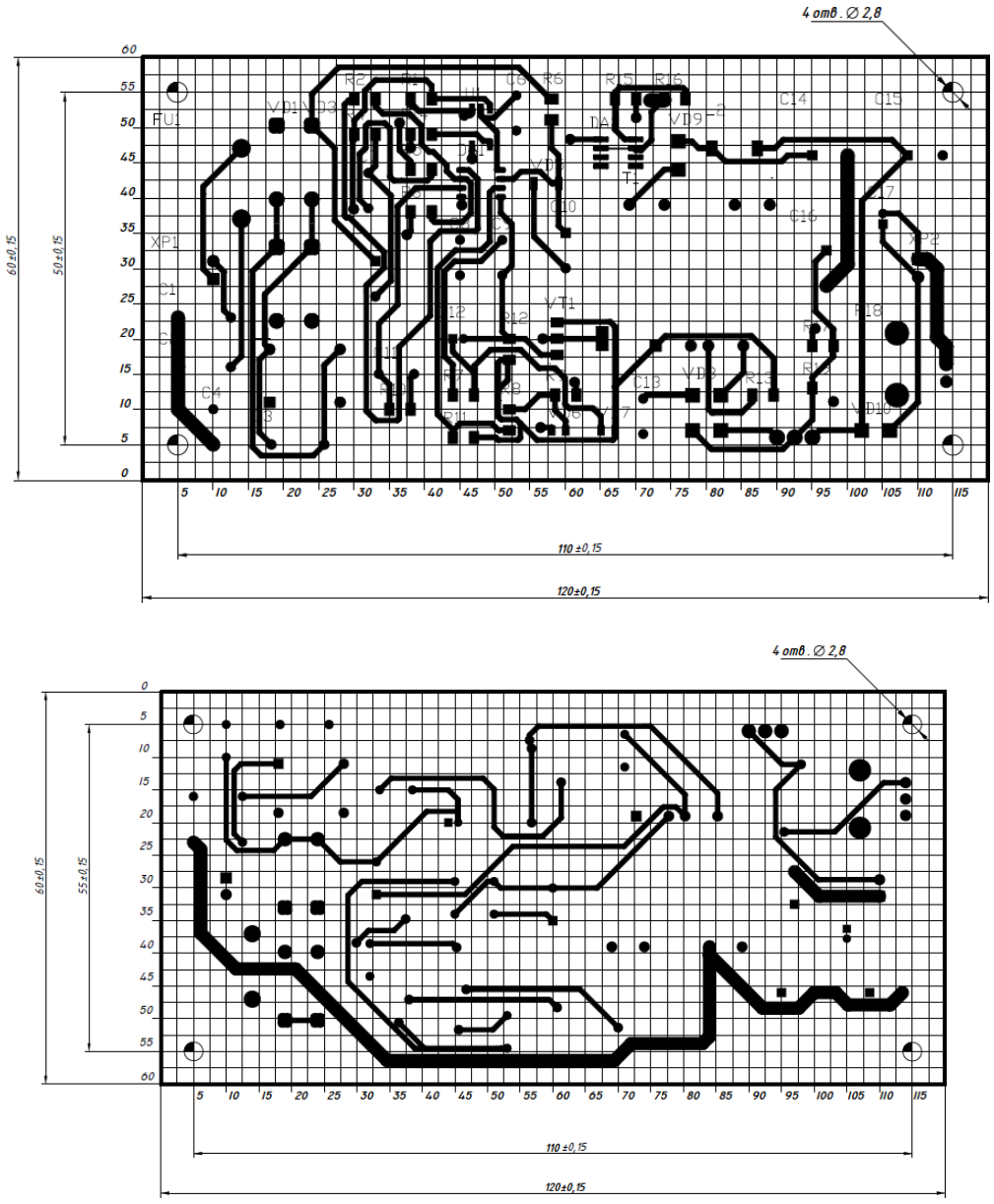


Рисунок 41 – Чертеж двухсторонней печатной платы адаптера (сторона монтажа элементов и нижняя сторона)

«Сборочный чертеж печатной платы адаптера содержит информацию о том, как компоненты должны быть размещены и припаяны на поверхности печатной платы. Этот чертеж представляет собой важную часть процесса проектирования и производства устройства» [22].

«Сборочный чертеж печатной платы является важным элементом конструкторской документации, на котором представлены все необходимые сведения для правильного выполнения сборки и монтажа электронных устройств» [22.]. В состав такого чертежа обычно входят следующие элементы:

1.Схема расположения элементов

«На сборочном чертеже указывается точное местоположение каждого компонента (микросхемы, резисторы, конденсаторы и другие элементы) на поверхности печатной платы. Помимо самих координат, определяется ориентация компонентов относительно базовой линии или заданных реперных точек. Также регламентируются расстояния между отдельными компонентами с целью предотвращения помех, улучшения теплового режима и обеспечения удобства при монтаже» [21].

2.Маркировка и обозначения компонентов

Каждый элемент на сборочном чертеже сопровождается уникальным позиционным обозначением, полностью соответствующим электрической принципиальной схеме устройства. Маркировка позволяет однозначно идентифицировать компоненты и обеспечивает удобство поиска нужного элемента во время сборки, контроля качества или ремонта устройства.

3.Размерные параметры и ограничения

Чертёж содержит чётко указанные габаритные размеры самой платы и размещённых на ней компонентов. Важную роль играет указание минимальных допустимых расстояний между элементами, что обеспечивает надёжность электрических соединений, защиту от тепловых и механических повреждений, а также предотвращает возможные конфликты при монтаже. Кроме базовых размеров, могут быть предложены альтернативные варианты установки элементов для различных конфигураций или условий эксплуатации.

4.Рекомендации по пайке компонентов

На сборочном чертеже чётко определяется способ монтажа компонентов, указывается, какие элементы предназначены для поверхностного монтажа с

применением паяльной пасты (SMD-компоненты), а какие должны быть припаяны традиционным способом. Также указывается тип используемого припоя и рекомендуемая марка «паяльной пасты, что обеспечивает соблюдение технологических требований производства и стабильность качества соединений» [22].

5.Дополнительные монтажные указания

Сборочный чертёж, при необходимости, может содержать специальные указания, относящиеся к особенностям монтажа отдельных элементов. Такие указания касаются ориентации некоторых компонентов, специфики их закрепления на плате, порядка установки и фиксации для обеспечения надёжной работы устройства. Подобные инструкции существенно облегчают процесс производства и снижают вероятность ошибок при выполнении монтажных операций.

Представленная структура сборочного чертежа обеспечивает полное соответствие нормам и требованиям, предъявляемым к качественной технической документации. Это позволяет значительно упростить и ускорить производственные процессы, повысить надёжность и долговечность конечных электронных устройств

Сборочный чертеж печатного узла блока питания (фрагмент) представлен на рисунке 42.

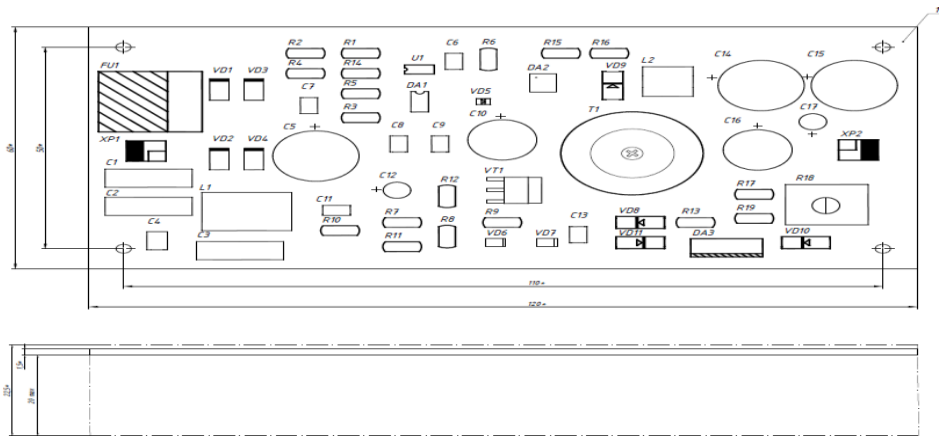


Рисунок 42 – Сборочный чертеж печатного узла адаптера

Все электронные компоненты, предусмотренные принципиальной электрической схемой, смонтированы на специально разработанной печатной плате. Размеры полученной платы составляют 120 х 60 мм, для закрепления её в корпусе предусмотрены четыре технологических отверстия под крепёжные стойки. Подключение адаптера к сети переменного тока 220 В (частота 50 Гц) осуществляется посредством внешнего соединительного шлейфа, который подводится к разъёму XP1. Другой разъём, XP2, предназначен для подключения шлейфа, через который выходное стабилизированное постоянное напряжение подаётся на нагрузку. В конструктивном плане указанные шлейфы обеспечивают удобную коммутацию печатной платы с внешними контактными клеммами, размещёнными на корпусе устройства. Регулировка выходного напряжения осуществляется с помощью переменного резистора, установленного непосредственно на самой плате.

В технологическом разделе работы рассмотрен процесс проектирования печатного узла адаптера с использованием программных комплексов Altium Designer версии 17 и AutoCAD 2023. В ходе проектирования были выполнены предварительные расчёты, позволившие определить оптимальные ширины проводников для различных участков схемы, а также задать соответствующие размеры переходных отверстий. Материалом печатной платы был выбран фольгированный стеклотекстолит марки СФ-2-35-1.5, отвечающий заданным параметрам по прочности и электрическим характеристикам.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы осуществлена разработка адаптера питания с регулируемым и стабилизированным выходным напряжением в пределах от 3 до 9 В и нагрузочной способностью до 1 А. Регулирование уровня выходного напряжения реализовано с помощью плавного изменения параметров, задаваемых установленным на плате переменным резистором. В основу спроектированного адаптера заложен обратноходовой импульсный преобразователь. В качестве управляющего элемента был применён специализированный интегральный контроллер UC3842B, а роль ключевого силового компонента выполняет MOSFET-транзистор типа 2N60. Для повышения точности и стабильности выходных параметров устройства дополнительно включён компенсационный линейный стабилизатор на основе микросхемы LM317.

На основании выполненного анализа сформулированы ключевые критерии, позволившие обосновать выбор обратноходовой импульсной топологии как наиболее рационального и эффективного варианта схемного построения адаптера. Согласно выбранной концепции была создана структурная схема устройства, которая полностью удовлетворяет заданным техническим требованиям, обеспечивая высокую стабильность и точность регулировки выходных характеристик.

Следующий этап проектных работ включал формирование детальной принципиальной схемы разрабатываемого адаптера, сопровождаемой подробным пояснением функционирования каждого входящего в её состав узла. В рамках данного этапа были выполнены точные аналитические расчёты электрических характеристик всех элементов, входящих в конструкцию схемы, с последующим выбором соответствующих компонентов. Выбор производился с учётом строгого соблюдения заданных технических требований и обязательного резервирования по критическим параметрам – напряжению и мощности, что позволило обеспечить необходимый запас прочности и

надёжности устройства.

Обоснованность и точность принятых решений были тщательно проверены путём моделирования разработанной схемы в специализированной среде Multisim 12.0, обеспечивающей высокую степень приближения виртуальных результатов к реальным эксплуатационным условиям. Отдельные тесты были проведены для наиболее ответственных модулей, включая регулирующий стабилизатор на основе интегральной микросхемы LM317. Дополнительно выполнено моделирование поведения импульсного трансформатора в условиях воздействия прямоугольных сигналов различной частоты и длительности, что позволило подтвердить выбранные конструктивные и схемотехнические решения.

Комплекс выполненных мероприятий способствовал созданию функционально завершённого, устойчиво работающего и практически применимого источника питания с регулируемым напряжением, отличающегося оптимальными техническими показателями. Проведённые виртуальные испытания и расчётные исследования однозначно подтвердили правильность реализованных подходов и эффективность выбранных схемных решений, что позволяет рекомендовать разработанный адаптер к широкому применению в практической деятельности.

В третьем разделе работы подробно рассмотрена технология проектирования и разработки печатной платы, реализованная посредством программного комплекса Altium Designer версии 17. В рамках данного этапа предварительно выполнены необходимые расчёты, позволившие определить оптимальные параметры ширины печатных проводников и диаметры переходных отверстий. По итогам проектирования получен комплект технической документации. Все элементы расположены и закреплены с одной стороны двухсторонней печатной платы, изготовленной из фольгированного стеклотекстолита марки СФ-2-35-1.5.

Список используемой литературы

1. Блок питания с защитой от перегрузок [Электронный ресурс] URL: https://kiloom.ru/sxema/blok-pitaniya-s-zashhitoj-ot-peregruzok.html
2. Браун, М. Источники питания. Расчет и конструирование / М.Браун.- К.: МК-Пресс, 2017. – 288 с.
3. ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции [Электронный ресурс] URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294830/4294830398.pdf
4. ДиодES2J.Datasheet [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/379/DOC026379243.pdf
5. Диоды SS14 Datasheet [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/285/DOC000285541.pdf
6. ДиодыBA157…BA159.Datasheet [Электронныйресурс]URL:https://static.chipdip.ru/lib/652/DOC001652523.pdf
7. Конденсаторы К10-17Б [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/056/DOC000056282.pdf
8. Конденсаторы Epcos. Каталог. [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/279/DOC000279577.pdf
9. Мартынов, А.А. Проектирование вторичных источников питания. Учеб, пособие/ А. А. Мартынов. – СПбГУАЛ. СПб., 2000. – 108 с.
10. Микросхема TL431 Datasheet [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/374/DOC018374770.pdf
11. Переменный резистор PTV09A-4225F-B102 [Электронный ресурс] URL:https://static.chipdip.ru/lib/854/DOC014854908.pdf
12. Расчет импульсного источника вторичного электропитания: учеб-метод. пособие по курсовому проектированию / Б. С. Сергеев,В.А.Сисин.- Екатеринбург:Изд-воУрГУПС.2011.-53с.
13. Регулируемый лабораторный блок питания [Электронный ресурс] URL: https://kazus.ru/shemes/showpage/0/1335/1.html
14. Регулируемый лабораторный блок питания [Электронныйресурс]

URL:https://www.radioradar.net/radiofan/power_supply/regulated_power_supply_automatic_voltage.html

15. Сидоров Н Н, Иванов А. В., Колосов В. А и др. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: справочник. - М.: Радио и связь. 1989. - 236с.

16. Стеклотекстолит фольгированный СФ-2-35Г–1,5мм [Электронный ресурс] URL: https://oboronkontrakt.ru/steklotekstolit/steklotekstolit-folgirovannyi/steklotekstolit-folgirovannyi-sf-2-35g%E2%80%9315-mm

17. Транзистор 2N60G [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/304/DOC021304045.pdf

18. Шипанов, Ю. Регулируемый стабилизатор напряжения/ Ю. Шипанов// Радио. - 2020 г. - №1. С.21-23.

19. AltiumDesigner. Проектирование плат [Электронный ресурс] URL: https://resources.altium.com/ru/p/overview-pcb-design-output-files

20. LM317 datasheet [Электронный ресурс] URL: https://www.st.com/resource/en/datasheet/lm217.pdf

21. SnapEDA [Электронный ресурс] URL: https://www.snapeda.com/home/

22. UC3842 datasheet [Электронный ресурс] URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/149/uc3843-309322.pdf