

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 микроэлектроника

(код и наименование направления подготовки)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВАРСКАЯ РАБОТА)

на тему Сетевой блок питания постоянного напряжения

Обучающийся

Н.Д. Зув

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент М.В.Позднов

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

Тольятти 2024

Аннотация

Объем 75 с., 38 рис., 6 табл., 31 источник, 6 прил.

Объект исследования: Проектирование и создание блока питания для стоматологического оборудования, обеспечивающего стабильное напряжение и высокую надёжность.

Цель работы: Разработка универсального и модульного блока питания, соответствующего требованиям для современного источника питания.

Задачи: Разработка схемотехники блока питания на основе поиска схем аналогичных устройств. Отбор компонентов с учётом их доступности и технических характеристик. Моделирование работы схемы для предотвращения проблем на раннем этапе. Проектирование печатной платы с использованием САД-систем.

Методы исследования: В работе имеется 3 основных раздела, где при использовании программного обеспечения для расчёта и моделирования электрических схем (Pi expert, TINA-TI 9, KiCad), а также программной среды Компас для оформления чертежей происходит выполнение поставленных задач.

Результаты: Создан блок питания с регулируемым выходным напряжением от 1.5 до 30 В и током до 5 А, обеспечивающий безопасность и эффективность в широком спектре стоматологических приложений.

Содержание

Введение.....	4
1 Постановка задачи	5
1.1 Поиск и анализ технических параметров аналогичных устройств.....	6
1.1.1 Основные виды топологий регулируемых источников питания	6
1.1.2 Линейный (Непрерывные) источники питания	8
1.1.2.1 Линейный стабилизатор LM338.	11
1.1.2.2 Трансформаторный блок питания на TL494	14
1.1.3 Источники питания с импульсным регулированием	17
1.1.3.1 Прямоходовой преобразователь	20
1.1.3.3 Прямоходовой преобразователь со снабберной цепочкой ...	21
1.1.3.4 Обратногоходовой преобразователь.....	22
1.1.3.4 Импульсный стабилизатор напряжения.	23
1.2 Выбор микросхем для реализации проекта.....	25
1.3 Разработка структурной схемы.....	30
2 Конструкторское проектирование блока питания.....	34
2.1 Разработка электрической принципиальной схемы	34
2.1.1 Разработка схемы обратногоходового преобразователя	34
2.1.2 Разработка схемы импульсного регулятора напряжения	36
2.2 Подбор и расчёт компонентов схемы	39
2.2.1 Расчёт и подбор компонентов схемы обратногоходового преобразователя.....	39
2.2.2 Расчёт и подбор компонентов схемы регулятора напряжения.	57
2.3 Моделирование работы TPS5450	59
3 Технологический раздел	64
3.1 Моделирование печатной платы	64
Заключение	72
Список используемой литературы и используемых источников	74
Приложение А Спецификация на блок на микросхеме TOP261EN	77
Приложение Б Описание функций микросхемы TOP261 EN	85
Приложение В Описание функций микросхемы TPS5450.....	89
Приложение Г Рисунки анализа из программы Tina-Ti 9.....	91
Приложение Д Расчёт размеров платы.....	93
Приложение Е Расчёт параметров платы и дорожек	96

Введение

В современной стоматологии, где точность и надёжность являются ключевыми, качество электропитания не может быть предметом компромисса. Именно поэтому проектирование блоков питания для стоматологического оборудования, такого как установки для лечения зубов, устройства для отверждения композитных материалов и электрические микромоторы, требует особого внимания.

Основная задача такого проекта – создание блока питания, который не только соответствует высоким стандартам эффективности и надёжности, но и способен адаптироваться к разнообразию стоматологических устройств. Это должен быть источник питания, который обеспечивает стабильное напряжение без колебаний и помех, что критично для деликатных медицинских процедур.

Проектный подход включает в себя следующие шаги:

- Разработка схмотехники: Определение и создание схемы, которая будет основой для блока питания.
- Выбор компонентов: Тщательный отбор элементов, которые будут использоваться в схеме, с учетом их доступности и технических характеристик.
- Моделирование: Использование программного обеспечения для моделирования работы схемы, что позволяет предвидеть и устранить потенциальные проблемы на раннем этапе.
- Проектирование печатной платы: Перенос схемы в физическую форму с помощью САД-систем для дальнейшего производства.
- Таким образом, проект направлен на создание универсального и модульного блока питания.

1 Постановка задачи

Технические характеристики и требования, предъявляемые к разрабатываемому блоку электропитания, определяются заданием на выпускную квалификационную работу и спецификациями, связанными с использованием данного устройства для питания или зарядки различных аппаратов или систем, используемых в стоматологии. В документации, помимо прочего, приводятся исходные данные для проведения расчётов. Следующая классификация основана на источнике [6]:

Цель создаваемого блока питания: Предназначен для питания и подзарядки мобильного стоматологического оборудования, такого как микромоторы, апекслокаторы, устройства для полимеризации и галогеновые лампы в стоматологических комплексах.

Стандартное напряжение и частота электросети:

- Напряжение в сети составляет 220 В с допуском в 10%, при частоте тока 50 Гц.
- Диапазон регулирования выходного постоянного напряжения от 1.5 до 30 В.
- Максимальная сила тока на выходе до 5 А.

Конструктивные и эксплуатационные особенности:

Необходимо обеспечить разделение между высоковольтной и низковольтной частями для предотвращения риска поражения электрическим током высокого напряжения.

1.1 Поиск и анализ технических параметров аналогичных устройств

1.1.1 Основные виды топологий регулируемых источников питания

Для реализации проекта необходимо определить какое схмотехническое решение наиболее подходящее для реализации сетевого источника питания с указанными параметрами. Для этого обратимся к книге [2] и рассмотрим перечень схмотехнических решений из неё, а так же проанализируем сравнительные характеристики данных решений.

«Внутри системы питания можно рассматривать следующие три основные технологии построения источника питания[2]:

- Линейные стабилизаторы.
- Импульсные источники питания с широтно-импульсной модуляцией (pulse width modulation, PWM).
- Резонансная технология импульсных источников питания с высоким КПД.»

Основные архитектуры систем электропитания, применяемые в конструкции блоков питания, а также их важнейшие характеристики для анализа, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение четырёх технологий источников питания

Параметр	Линейный стабилизатор	Импульсный стабилизатор с ШИМ	Импульсный стабилизатор с резонансным переходом	Квазирезонансный импульсный стабилизатор
Стоимость	низкая	высокая	высокая	очень высокая
Масса	большая	небольшая	небольшая	небольшая
RF-шум	отсутствует	высокий	средний	средний
КПД	35-50%	80-90%	90-95%	90-97%
Несколько выходов	нет	есть	есть	есть

Оценка разнообразных подходов к созданию источников питания может быть выполнена на основе нескольких критических параметров, но выбор подходящего решения зависит от специфических потребностей проекта, включая бюджет, весовые ограничения, требования к эффективности и уровень допустимого шума. Линейные стабилизаторы идеально подходят для ситуаций, где приоритетны низкая стоимость и отсутствие помех, в то время как импульсные стабилизаторы предпочтительнее для приложений, нуждающихся в высокой эффективности и малом весе. Квазирезонансные модели являются лучшим выбором для высокотехнологичных проектов, где критичны максимальная эффективность и минимальные помехи.

Несмотря на то что импульсные стабилизаторы с резонансным переходом и квазирезонансные стабилизаторы являются наиболее эффективными, их сложность делает их менее подходящими для начинающих разработчиков. Поэтому для дальнейшего рассмотрения предлагается остановиться на линейных стабилизаторах и импульсных стабилизаторах с ШИМ, как на более простых в освоении и реализации.

1.1.2 Линейный (Непрерывные) источники питания

Традиционные линейные источники питания сохраняют свою актуальность благодаря высокой надёжности и устойчивости к перепадам напряжения. Они обеспечивают стабильный выходной ток с минимальными пульсациями и шумом, что делает их предпочтительным выбором в приложениях, где эти характеристики критичны. Кроме того, они могут быть эффективно использованы в устройствах с небольшим энергопотреблением, где их размер и вес становятся сопоставимы с импульсными источниками. Несмотря на то что импульсные источники питания более сложны в конструкции и требуют использования фильтров для подавления электромагнитных помех, при уменьшении мощности их преимущества по размеру и весу уменьшаются, что делает линейные источники более привлекательными в определённых ситуациях. На рисунке 1[12] показана блок-схема компоновки линейного источника питания.

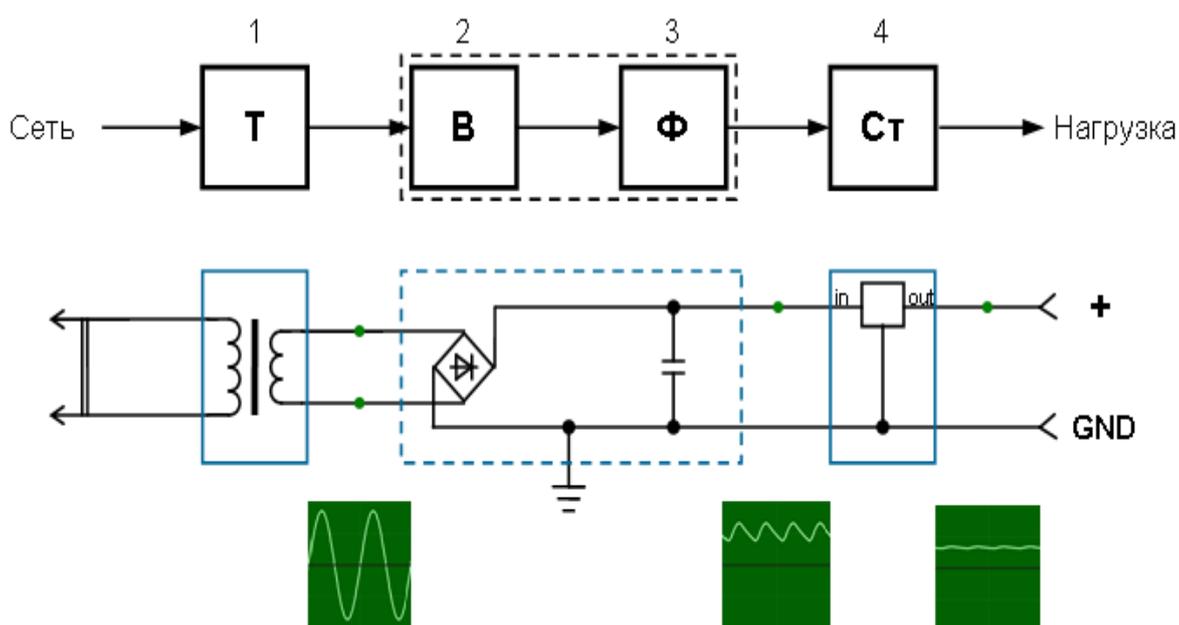


Рисунок 1 — Блок-схема линейного источника питания.

На верхней части рисунка 1 представлена блок-схема источника питания, а под ней находится возможная схематическая реализация. В

нижней части показаны идеализированные осциллограммы, характерные для различных точек схемы: первая осциллограмма снята с вторичной обмотки трансформатора, а следующие две - в точках, отмеченных зелёными кружками, относительно общего провода. На приведённой схеме выходное напряжение положительно по отношению к общему проводу, однако схему можно модифицировать для получения отрицательного напряжения. Также возможно объединение двух таких схем для создания двухполярного источника питания.

Описание компонентов блок-схемы:

- Трансформатор (Т) - Этот элемент служит для преобразования входящего сетевого напряжения до уровня, необходимого для функционирования блока питания. Он также предоставляет гальваническую изоляцию между сетью и устройством, что повышает безопасность эксплуатации.
- Выпрямитель (В) - Осуществляет превращение переменного тока, полученного от трансформатора, в постоянный ток однонаправленного действия, используя для этого мостовую схему выпрямления.
- Фильтр (Ф) - Снижает пульсации напряжения, применяя конденсаторы большой емкости или более сложные конструкции с катушками индуктивности и дополнительными конденсаторами, чтобы обеспечить более гладкое напряжение.
- Стабилизатор (Ст) - Поддерживает стабильность выходного напряжения, компенсируя колебания входящего напряжения и изменения нагрузки, а также устраняя остаточные пульсации после фильтрации. Стабилизаторы могут быть как с возможностью регулировки выходного напряжения, так и с фиксированным значением.

Далее рассмотрим схемы устройств которое содержат в своём составе низкочастотный трансформатор для реализации подходящие по характеристикам проектируемого источника питания. При этом необходимо учитывать что $P_{вых.макс.}$ (мощность на выходе источника питания) будет равна 150 Вт, а $P_{вх макс.}$ (мощность на входе источника питания) так же как и подбираемого трансформатора должна быть:

$$P_{вх макс.} = P_{вых.макс.} \backslash КПД = 150 Вт \backslash 0.5 = 300 Вт \quad (1)[5]$$

Вторичная обмотка трансформатора должна обеспечивать напряжение, необходимое для регулирования выходного напряжения в пределах от 0 до 30 В. Для этого необходимо произвести расчет $U_{выпр.}$ Напряжения, которые возникают после выпрямителя перед стабилизатором. В данном случае напряжение должно быть выше 30 В, но не ниже 40 В. Для примера возьмём трансформатор с напряжением вторичной обмотки 25 В.

$$U_{выпр.} = U_{тр.вых} * 1.41 = 25 В * 1.41 = 35.2 В \quad (2)[5]$$

Зная какие значения характеристик трансформатора необходимо учитывать найдём примеры: Трансформатор тороидальный ТТП400, ТТП250 рисунок 2[17]. Основные параметры трансформаторов указаны в Таблице 2.



Рисунок 2 — Фото трансформатора ТТП400

Таблица 2 – Параметры трансформатора ТТП400,ТТП250

Модель	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	Мощность, Вт	Вес, Кг	Размеры, мм
ТТП400	220	25	14	400	3.67	124x42x67
ТТП250	220	25	8	250	2.1	124x41x48

Исходя из полученных данных поиска видно что при использовании трансформатора, без учёта схемы стабилизации вес устройства будет составлять от 2.1 до 3.67 кг. , что в свою очередь сделает устройство неудобным для транспортировки, а так же создаст проблемы при проектирование закрытого корпуса устройства.

1.1.2.1 Линейный стабилизатор LM338.

LM338 — это регулируемый трёхвыводной стабилизатор положительного напряжения. Он используется для обеспечения стабильного напряжения в электронных схемах и может быть настроен на выходное напряжение от 1,25 до 32 В. Основные технические характеристики микросхемы LM338 указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики LM338[20]

Параметр	Полярность	Тип выхода	Количество выходов	Выходное напряжение, В	Максимальный ток нагрузки, А	Максимальное входное напряжение, В	Рабочая температура, °С	Корпус	Вес, г
Значение	Положит.	Регулир.	1	1.2...32	5	40	0...+125	to-220	2.5

Исходя из полученных данных технической документации LM338 можно сделать вывод что данное устройство можно использовать для реализации проекта. Рассмотрим схему построения блока питания с использованием данного регулятора рисунок 3.

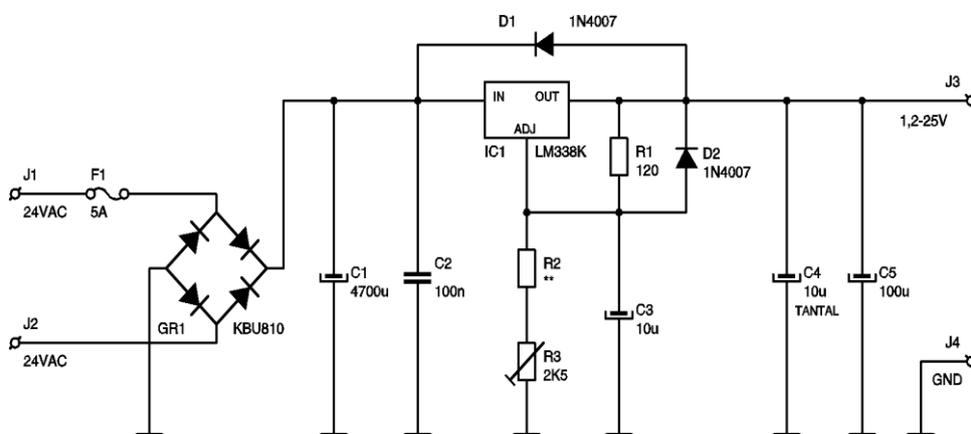


Рисунок 3 – Схема на LM338

В данной схеме, микросхема LM338 играет роль интегрального стабилизатора IC1. Настройка выходного напряжения осуществляется через изменение сопротивления на потенциометре R3. Диоды D1 и D2 служат для защиты от возможных перенапряжений. Электролитические конденсаторы

C1 и C5 действуют как фильтры на входе и выходе, сглаживая колебания напряжения.

Опорное напряжение (U_{ref}) стабилизатора поддерживается на уровне 1,25 В благодаря резистору R1. Когда регулятор R3 перемещается в верхнее положение, на выходе стабилизатора устанавливается опорное напряжение 1,25 В. Увеличение сопротивления R3 приводит к повышению выходного напряжения. LM338 контролирует выходное напряжение, сравнивая его с опорным напряжением через делитель напряжения, и корректирует его в соответствии с изменениями сопротивления.

В документации к микросхеме указана формула, описывающая связь между выходным напряжением (U_{out}) и током подстройки (I_{ADJ}):

$$U_{out} = U_{ref}(1 + R2/R1) + I_{ADJ}R2 \quad (3) [7]$$

Где:

U_{out} - выходное напряжение;

I_{ADJ} - ток подстройки.

Максимальная величина тока нагрузки, которую может обеспечить стабилизатор, составляет 5 А.

1.1.2.2 Трансформаторный блок питания на TL494

TL494 микросхема, которая используется для создания импульсных источников питания. Это генератор импульсов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), то есть устройство, которое может генерировать прямоугольные импульсы с изменяющейся длительностью.

Микросхема TL494 имеет два независимых канала, каждый из которых может генерировать ШИМ-сигналы. Она также содержит два компаратора, которые могут сравнивать напряжение на входах с внутренними опорными уровнями и выдавать сигналы переключения, которые используются для управления транзисторами. Кроме того, микросхема имеет несколько дополнительных функций, таких как защита от перегрева и возможность подключения внешнего источника синхронизации.

TL494 относится к ШИМ контроллерам но рассмотрим его в данном разделе так как первичное преобразование напряжение будет производится с помощью понижающего низкочастотного трансформатора рисунок 4.

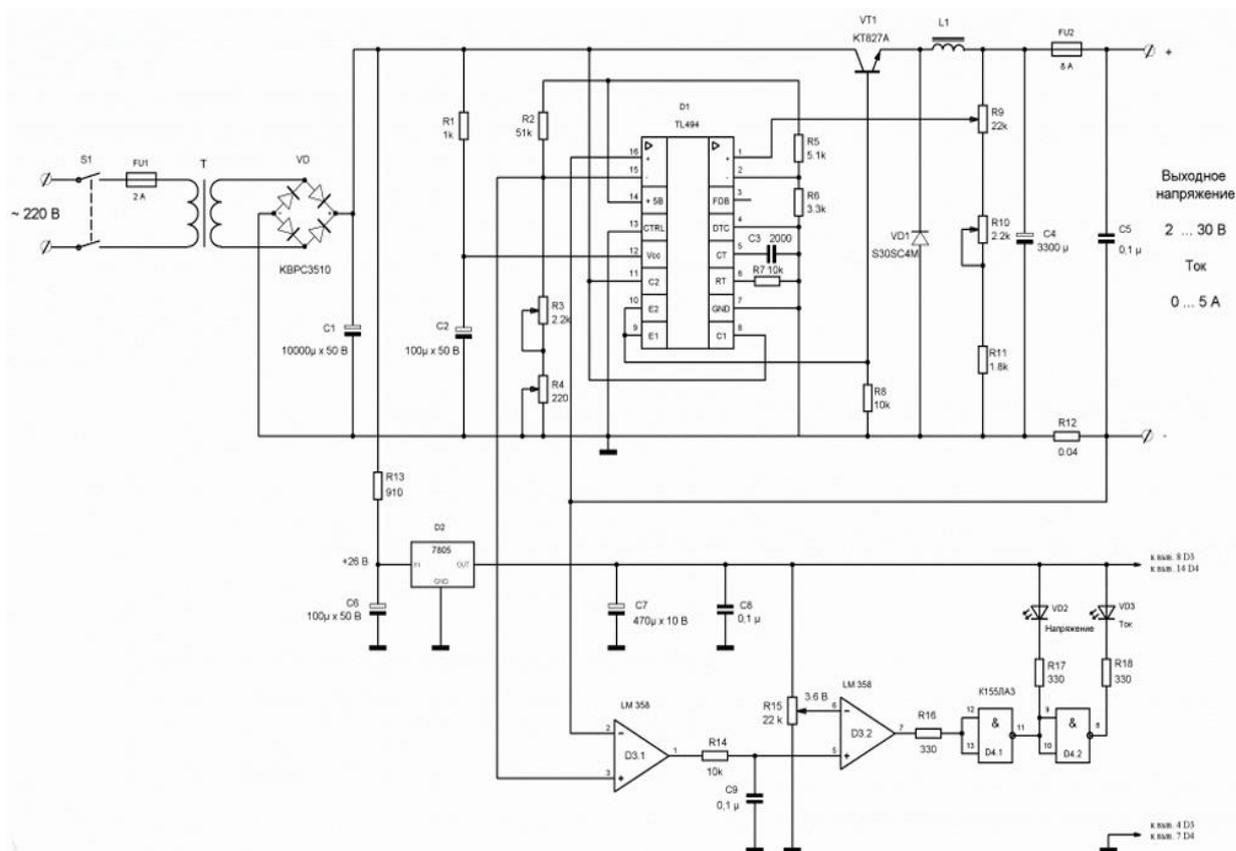


Рисунок 4 — Схема на TL494

На рисунке 4 представлена схема управляемого источника питания, способного выдавать напряжение до 30 В и контролировать ток до 5А.

Основой гальванической развязки является трансформатор с понижающим коэффициентом. На вторичной обмотке (или их комплексной группе) должно формироваться около 40В.

Ключевые элементы схемы:

- L1 тороидальный дроссель.
- D1 диод Шоттки, установленный на радиаторе, так как участвует в выпрямлении.

Пара резисторов R9 и R10, а также R3 и R4, предназначены для подстройки напряжения и силы тока.

Дополнительно к диоду VD1 на радиаторе следует разместить:

- Диодный мост (например, КВРС 3510);
- Транзистор (используется транзистор КТ827А или аналог);
- Шунт (обозначенный на схеме как R12);
- Дроссель (индуктивность L1).

Аналогичная схема применена при устройстве блока управления микро-моторным коллекторным наконечником NSK VOLVERE Vmax35RV рисунок 5.

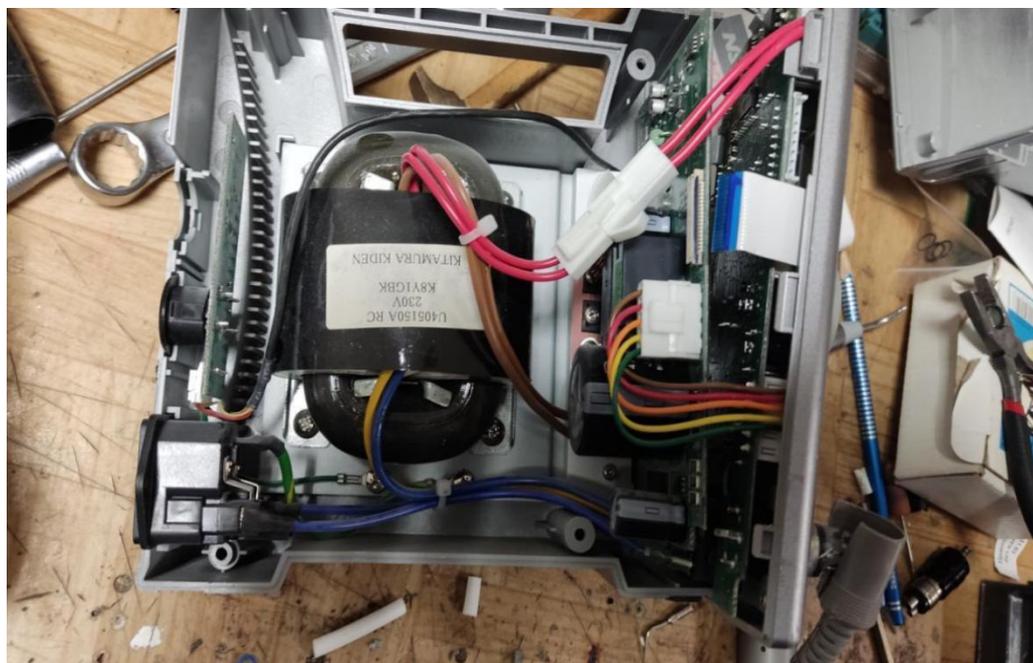


Рисунок 5 — фото NSK VOLVERE Vmax35RV

Данный блок управляет микро-мотором с коллектором двигателем. Управление скоростью двигателя осуществляется за счет изменения уровня напряжения от 1.2 до 30 В. Уровень напряжения меняется за счёт поворота ручки на корпусе, которая является переменным резистором. Первоначальное понижение напряжение сделано на низкочастотном трансформаторе. При мощности двигателя в 71 Вт вес блока управления составляет 2.1 кг.

После изучения двух схем, использующих низкочастотные трансформаторы — схемы с линейным стабилизатором LM338 и схемы на TL494 — можно сделать следующие выводы: разработка устройств с использованием данных схем обещает простоту в плане технических решений и конструкции, а также минимальное количество помех. Однако такие устройства обладают низким КПД, а их конструкция, из-за трансформатора, может оказаться громоздкой и тяжёлой. Кроме того, в случае необходимости хорошего охлаждения элементов схем стабилизации, возникают вопросы относительно возможности создания полностью закрытого корпуса.

1.1.3 Источники питания с импульсным регулированием

Импульсные источники питания (ИИП) представляют собой современные устройства, которые трансформируют переменное напряжение электросети в стабилизированное постоянное напряжение для питания электроники. Эти устройства отличаются от классических линейных блоков питания, работающих на основе трансформатора с последующим выпрямлением, тем что они используют принцип высокочастотного переключения для более эффективного преобразования энергии. Структурная схема типичного ИИП демонстрирует сложную архитектуру, обеспечивающую этот процесс, и может быть изображена на схематических диаграммах, таких как рисунок 6 [12].

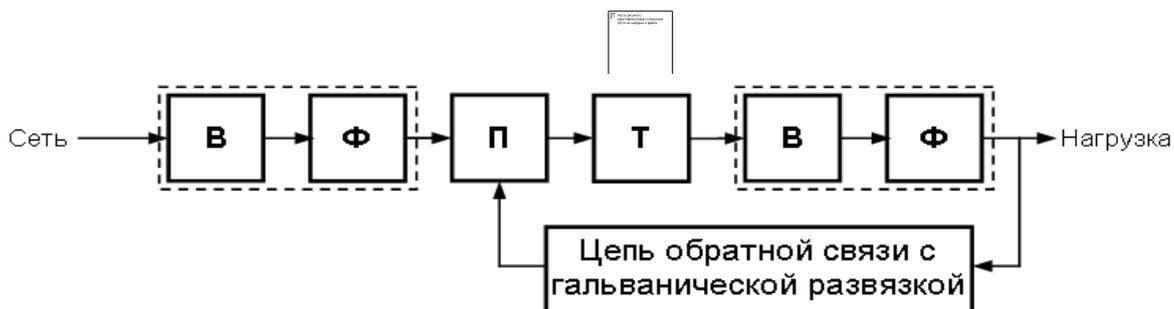


Рисунок 6 — Структурная схема ИИП

Пояснения работы ИИП:

- Выпрямление (В): Переменный ток, поступающий из сети, преобразуется в однополярный пульсирующий ток с использованием выпрямительных элементов, таких как диодный мост.
- Сглаживание (С): Для уменьшения пульсаций напряжения применяются фильтрующие конденсаторы, которые аккумулируют энергию в моменты пиковых значений и отдают её при снижении напряжения.
- Преобразование (П): Далее, посредством ключевых транзисторов, сглаженное напряжение превращается в серию высокочастотных импульсов.
- Трансформация (Т): Эти импульсы подаются на трансформатор, который изменяет их параметры, снижая напряжение и повышая ток.
- Выпрямление (В): После трансформации импульсы снова выпрямляются, возвращаясь к постоянному току.
- Сглаживание (С): Наконец, вторичное сглаживание обеспечивает стабилизацию выходного напряжения.

Цель обратной связи: В блоке питания присутствует система контроля и защиты, которая регулирует параметры выходного тока и напряжения, а также предотвращает возможные перегрузки и другие аварийные ситуации.

Преимущества ИИП:

- Малый вес и габариты: За счет использования высокочастотных компонентов ИИП значительно меньше и легче линейных источников питания с такой же мощностью.
- Высокий КПД: ИИП более эффективны, чем линейные источники питания, что означает, что они генерируют меньше тепла и потребляют меньше энергии.

- Широкий диапазон выходного напряжения: ИИП могут выдавать широкий диапазон выходных напряжений, что делает их универсальными для использования в различных приложениях.
- Быстрое время реакции: ИИП могут быстро реагировать на изменения нагрузки, что делает их идеальными для питания чувствительных электронных устройств.

Недостатки ИИП:

- Более высокая стоимость: Как правило, ИИП дороже, чем линейные источники питания.
- Генерация электромагнитных помех: ИИП могут генерировать электромагнитные помехи (ЭМИ), которые могут влиять на работу других электронных устройств.
- Сложность конструкции: ИИП имеют более сложную конструкцию, чем линейные источники питания, что требует более высокой квалификации для их конструирования.

Далее рассмотрим какие топологии ИИП бывают используя таблицу 4 из литературы [2] и произведём их сравнение.

Таблица 4 – Основные топологии ИИП

Топология	Диапазон мощностей, Вт	Диапазон напряжений, Vin(дс)	Изоляция вход/выход	Типичный КПД, %	Относительная стоимость элементов
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
Полномостовые	400..2000	5..1000	да	73	2,5

Исходя из таблицы 4 возьмём для рассмотрения схемы с топологией прямоходовых и обратноходовых преобразователей, так как они подходят по характеристикам, обладают наиболее большим КПД, а так же выгоднее всего при производстве, так как в них используется меньшее количество компонентов.

1.1.3.1 Прямоходовой преобразователь

Прямоходовой преобразователь — это устройство, которое играет центральную роль в электронике, выполняя функцию понижения напряжения. Его отличительная черта — это способность силового ключа и выпрямительного диода на разных сторонах устройства проводить ток одновременно, что позволяет осуществлять передачу напряжения через трансформатор в однополярном режиме. Для обеспечения оптимальной работы преобразователя и избежания насыщения трансформатора, коэффициент заполнения должен быть ограничен значением 0,5.

1.1.3.3 Прямоходовой преобразователь со снабберной цепочкой

Анализ представленной схемы прямоходового преобразователя, иллюстрированной на рисунке 7[4], открывает иную стратегию регулирования напряжения. В этой схеме используется демпфирующая цепь, включающая диод (D_s), резистор (R_s) и конденсатор (C_{clamp}), что позволяет избежать применения обмотки размагничивания. Это приводит к уменьшению размеров трансформатора и снижению затрат на его производство. Тем не менее, следует учесть, что энергия, сохраняемая в магнитопроводе, теперь рассеивается через резистор R_s , что может повлиять на энергетическую эффективность системы.

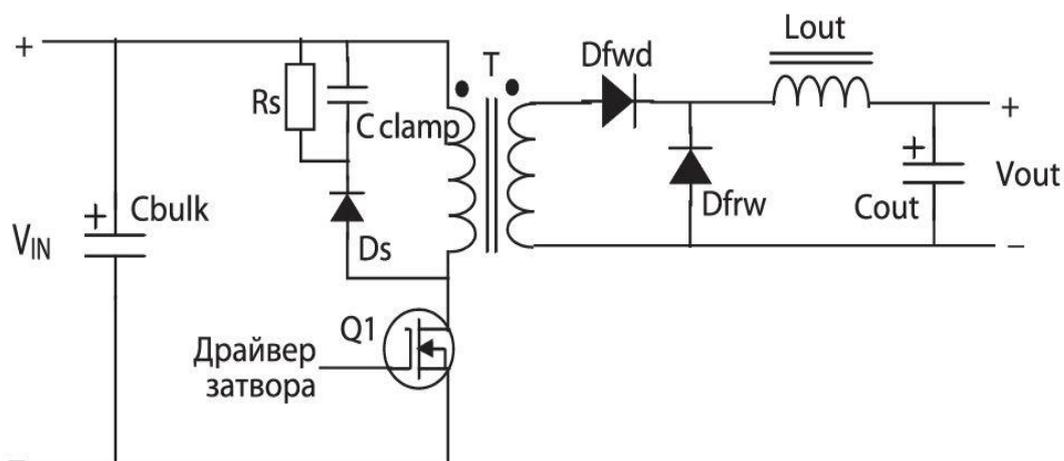


Рисунок 7 — Прямоходовой преобразователь со снабберной цепочкой

Демпфирующая цепь, совмещённая с первичной обмоткой, формирует квазирезонансную конфигурацию. При проектировании такой схемы крайне важно точно рассчитать ёмкость конденсатора C_{clamp} для ограничения максимального напряжения на силовом транзисторе и достижения эффективного гашения тока. Это способствует повышению коэффициента заполнения и улучшению работы преобразователя. Подобные конструкции особенно эффективны в устройствах с выходной мощностью до 100 Вт,

поскольку при большей мощности потери на резисторе R_s могут оказаться существенными.

1.1.3.4 Обратногоходовой преобразователь.

Обратноходовые преобразователи, рисунок 8, известные своей схематической простотой, часто используются в системах мощностью до 1 кВт. Они основаны на трансформаторе, который выполняет двойную функцию: аккумулирует энергию и действует как дроссель. В момент, когда силовой ключ закрыт, энергия, сохраненная в трансформаторе при открытом ключе и подключении к источнику питания, передается в нагрузку через вторичную обмотку.

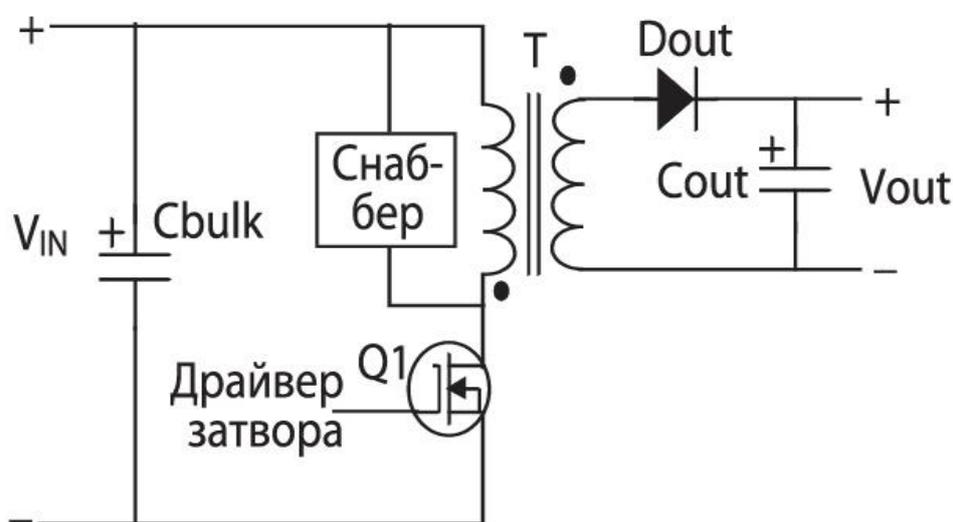


Рисунок 8 — Основная схема обратноходового преобразователя

Эти преобразователи ценятся за возможность обеспечения гальванической развязки между первичной и вторичной сторонами, а также за способность вырабатывать высокое напряжение при низком токе. Однако при работе на низком напряжении с высоким током возможно увеличение пульсаций и пиковых токов, что может привести к повышению стоимости фильтрации. Значительные пульсации напряжения требуют тщательного выбора сглаживающего фильтра типа "пи".

При коэффициенте заполнения 50%, амплитуда пульсаций тока через выходной конденсатор увеличивается в 1,6 раза по сравнению с выпрямленным током нагрузки, что делает критически важным выбор конденсатора с низким ESR. Часто рекомендуется использовать несколько электролитических конденсаторов параллельно или керамические конденсаторы для обеспечения стабильности. В ситуациях, когда необходимы высокие выходные токи, например, 5 В и 10 А, предпочтительнее использовать электролитические конденсаторы с минимальным ESR, хотя иногда более целесообразно выбирать прямоходовые преобразователи.

Важно также минимизировать индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора, чтобы избежать перенапряжений при закрытии ключа. Для этого используются ключи с высоким допустимым напряжением и снабберные цепи, хотя это может повлиять на энергоэффективность.

Обратноходовые преобразователи характеризуются высоким соотношением пиковых токов к среднему значению, что требует использования мощных ключей с высоким допустимым током, увеличивая их стоимость. Ток в ключе может быть в 1,5–2 раза выше, чем у других типов преобразователей, а ток в выпрямительном диоде — в 3–4 раза больше среднего тока. Это следует учитывать при проектировании системы.

1.1.3.4 Импульсный стабилизатор напряжения.

Импульсные стабилизаторы напряжения, также известные как DC-DC преобразователи, представляют собой устройства, которые регулируют энергию, передаваемую к выходу, и поддерживают стабильность выходного напряжения даже при колебаниях нагрузки. Основой их работы является ключевой элемент — это может быть биполярный транзистор, MOSFET или IGBT. Этот элемент управляется так, чтобы он переключался между активным (ON) и пассивным (OFF) состояниями, в зависимости от текущего уровня выходного напряжения.

Эти стабилизаторы подразделяются на несколько типов:

– Понижающие (или buck-converters), которые используются, когда необходимо снизить входное напряжение до более низкого уровня выходного напряжения.

– Повышающие (или boost-converters), применяемые для увеличения входного напряжения до более высокого уровня выходного.

– Инвертирующие (или buck-boost converters), способные как повышать, так и понижать напряжение.

В основе работы импульсных стабилизаторов лежит принцип управления потоком энергии через индуктивность (дроссель) и нагрузку, что позволяет достигать необходимой стабильности выходного напряжения. Например, понижающие преобразователи идеально подходят для ситуаций, когда есть необходимость снизить колеблющееся входное напряжение в диапазоне от 8 до 25 В до стабильного выходного напряжения в пределах от 0,5 до 5 В. Кроме того, с помощью регулировки работы ключевого элемента можно точно настраивать уровень выходного напряжения, обеспечивая его соответствие требованиям нагрузки.

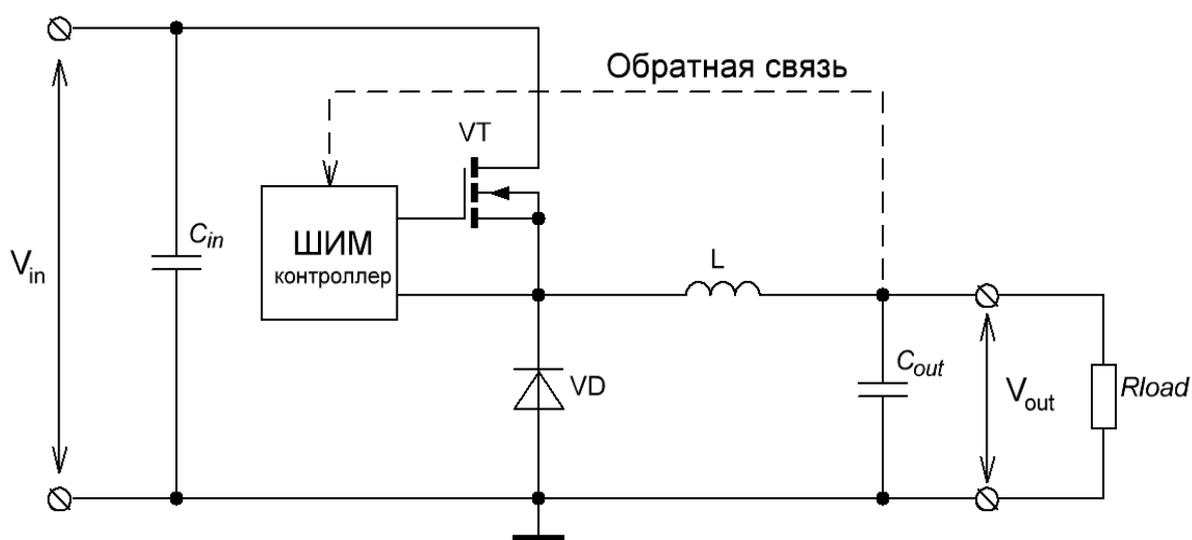


Рисунок 9 — Схема импульсного стабилизатора напряжения

Изображение 9[4] иллюстрирует работу импульсного стабилизатора. Принцип функционирования этого устройства следующий: когда основной транзистор находится в открытом положении, электрический ток идет от источника питания через силовой дроссель L к нагрузке R_{load} , заряжая выходной конденсатор C_{out} . Затем, когда транзистор закрывается, сохранённый индуктивностью дросселя L ток проходит через диод VD . Такой цикл повторяется. В данном контексте ключевой роль принимает транзистор VT , который регулирует время, в течение которого устройство потребляет энергию от источника питания.

После изучения различных топологий импульсных преобразователей, мне удалось выбрать оптимальную - топологию обратноходового преобразователя. Она идеально соответствует требованиям нашего проекта, способна формировать выходное напряжение на уровне 30 В при токе 5 А, обладая при этом лучшим коэффициентом полезного действия. В случае необходимости регулировки выходного напряжения от 0 до 30 В, если управление микросхемой преобразователя окажется невозможным для регулирования, можно воспользоваться схемой понижающего импульсного стабилизатора.

1.2 Выбор микросхем для реализации проекта

При построении схемы обратноходового преобразователя можно переменить несколько типов микросхем[4].

Первый тип микросхем ШИМ - контроллеры которые генерируют импульсы для управления силовым полевым транзистором с изолированным затвором (МОП-транзистор). Пример такой схемы показан на рисунке 10[4].

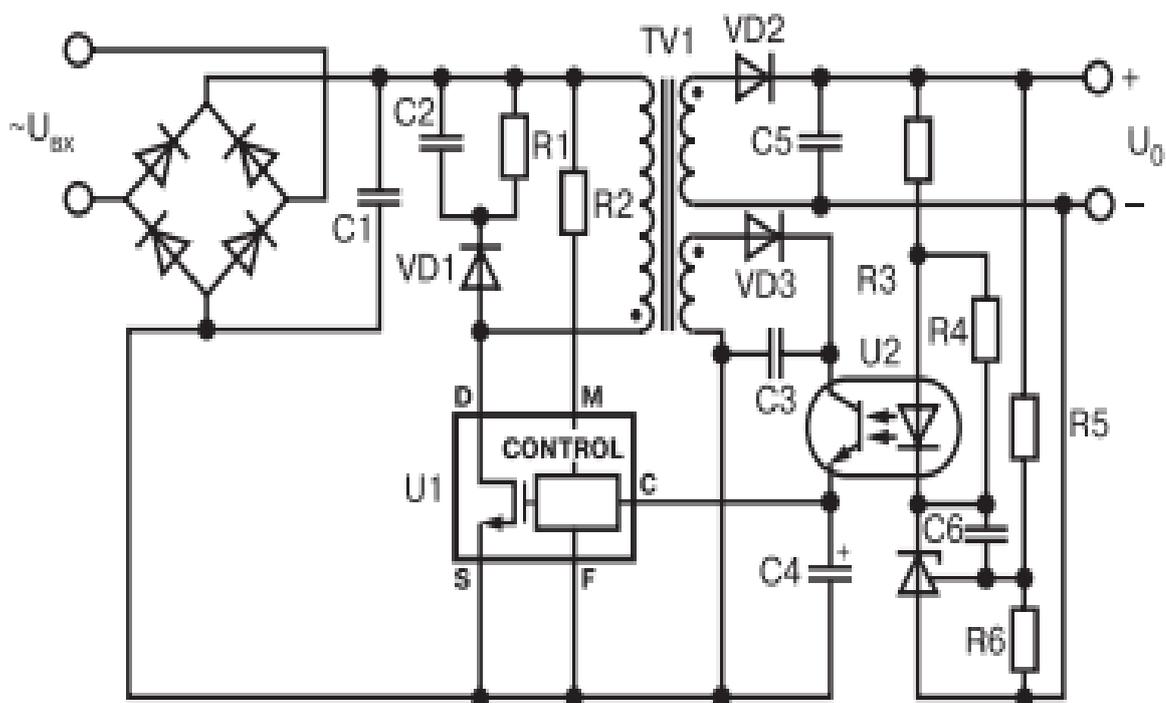


Рисунок 11 — Схема управления с микросхемой TOPSwitch

На рисунке 11 U1 микросхема объединяющая в себе функции управления, контроля и защиты и обеспечивает энергией трансформатор TV1 через встроенный МОП - транзистор.

Для реализации проекта будем использовать микросхемы второго типа со встроенным МОП-транзистором, так как это позволит уменьшить количество элементов в схеме обратноходового преобразователя.

В результате анализа и поиска готовых решений в сети интернет были найдены следующие микросхемы для реализации проекта удовлетворяющие по характеристикам и параметрам проектируемого устройства. Данные поиска представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Микросхемы для обратноходовых преобразователей

Марка, модель	Тип преобразователя	Максимальное напряжение силового ключа, В:	Номинальная мощность, Вт	Максимальная частота преобразователя, кГц	Максимальная скважность преобразователя, %	Наличие изоляции выхода	Наличие внутреннего коммутатора
TOP261EN Power Integrations [21]	flyback	700	333	132	78	Да	Да
ON Semiconductor FSCQ1565 RTYDTU [22]	flyback	650	210	20	95	да	да
STR-W6700San ken[23]	flyback	650	240	25	65	да	да

Самым современным решением из найденных микросхем является TOP261EN. Приблизительная схема подключения представлена на рисунке 12. Так же данная микросхема обладает наилучшими характеристиками для реализации проекта, а именно имеет запас по мощности, а значит и по силе тока внутреннего силового транзистора что является важным параметром для схемы обратноходового преобразователя. Так же имеется запас по напряжению работы силового ключа и более высокую частоту работы схемы преобразователя.

Функции микросхемы TOP261EN:

- Многорежимная работа микросхемы обеспечивает максимальную эффективность при изменении нагрузки.
- Низкое тепловое сопротивление переход-корпус (2 °C на ватт).
- Защита от перенапряжения на выходе (OVP)

- Обнаружение пониженного напряжения в сети (UV)
- Отключение линии из-за перенапряжения (OV)
- Частота 132 кГц снижает размер трансформатора и блока питания
- Минусом данной микросхемы является отсутствие возможности регулирования выходного напряжения в режиме реального времени.

Для регулирования выходного напряжения блока питания используем дополнительную микросхему импульсного понижающего DC-DC стабилизатора TPS5450DDAR[24]. Основные технические данные микросхемы представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики TPS5450DDAR

Параметр	Топология	Тип выхода	Количество выходов	Входное напряжение (Макс), В	Выходное напряжение (Мин/Фикс), В	Выходное напряжение (Макс), В	Выходной ток, А	Частота переключения, кГц
Значение	Buck	Регулируемый	1	36	1.221	31.32	5	500

Схема включения микросхемы от производителя представлена на рисунке 12. Делитель на резисторах R1 и R2 отвечает за установку уровня выходного напряжения. Для создания регулятора потребуется заменить постоянный резистор R2 на переменный резистор по формуле из [24].

$$R2 = R1 * 1.221/Vout - 1.221 \quad (4)$$

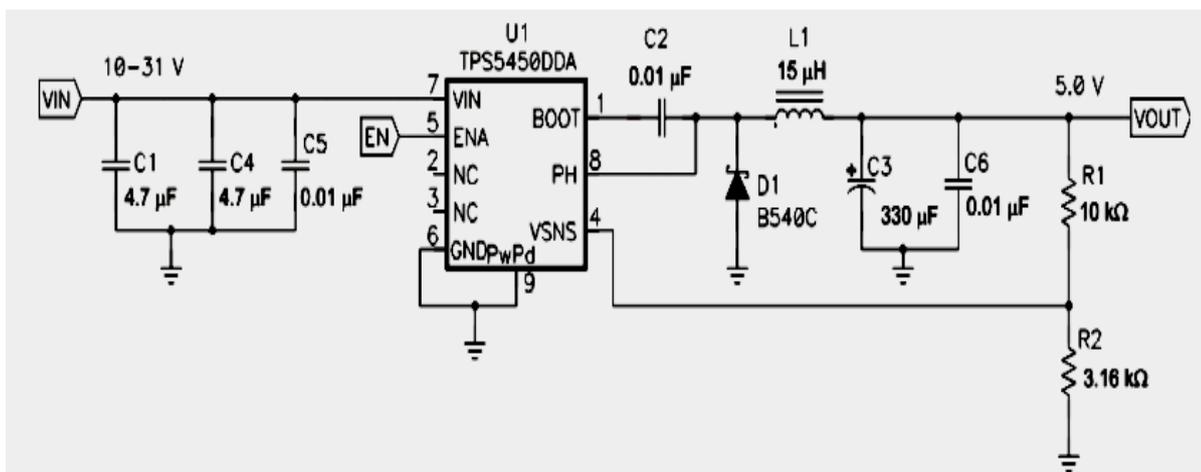


Рисунок 12 — Схема управления с микросхемой TPS5450DDAR

Для реализации проекта блока питания будет использована схема обратного преобразователя построенная на базе микросхемы TOP261EN. Для регулирования напряжения на выходе блока питания будет использована микросхема импульсного понижающего DC-DC стабилизатора TPS5450DDAR.

1.3 Разработка структурной схемы

Создадим структурную схему устройства используя схемы производителей для включения подобранных микросхем. Структурная схема представлена на рисунке 13.

Описание структурной схемы:

В данной схеме центральное место занимает микросхема со встроенным транзистором TOP261EN (блок 5). Первоначально переменный ток фильтруется (блок 1), затем выпрямляется (блок 2), создавая постоянное напряжение, которое активизирует работу TOP261EN. После небольшой задержки, вызванной механизмом мягкого старта, микросхема начинает работать, получая питание от дополнительной обмотки трансформатора.

Силовой ключ TOP261EN, управляемый контроллером, переключает напряжение в первичной обмотке импульсного трансформатора Т1 (блок 4), что приводит к возникновению импульсов ЭДС на его вторичных обмотках. Эти импульсы затем выпрямляются и фильтруются, обеспечивая стабильное выходное напряжение.

Гальваническая развязка обеспечивает электрическую изоляцию между управляющими сигналами и высоковольтной частью схемы. Система контроля сравнивает выходное напряжение с эталонным и формирует управляющий сигнал, который передаётся обратно через развязку.

Замкнутая система регулирования обеспечивает стабильность выходного напряжения, которое с вторичной обмотки трансформатора Т1 поступает на входной выпрямитель (блок 8), проходит через выходной фильтр (блок 9), и направляется на вход DC-DC стабилизатора TPS5450DDAR (блок 10). Последний этап — фильтрация напряжения (блок 11) перед подачей к нагрузке, что гарантирует эффективное преобразование и стабилизацию напряжения.

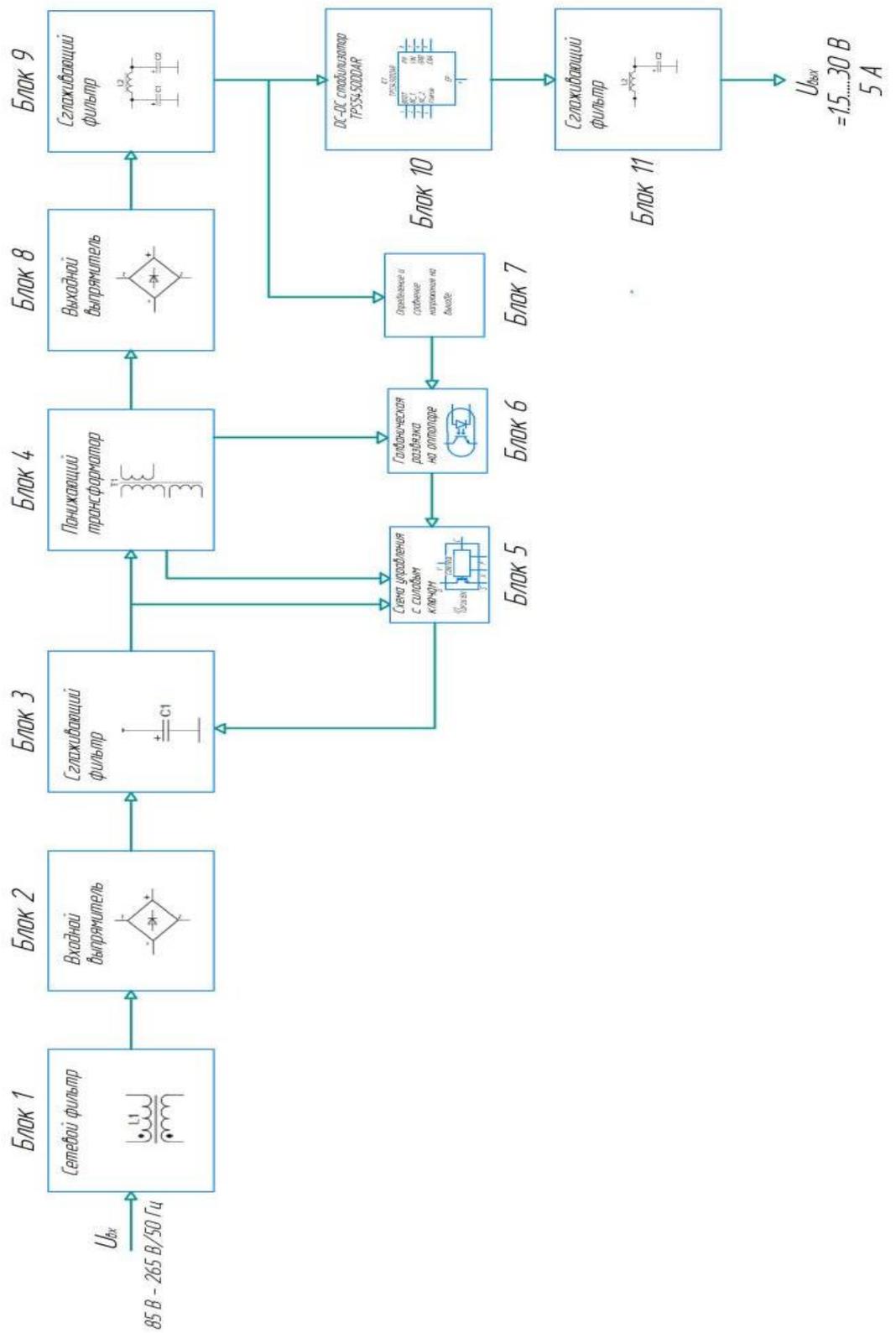


Рисунок 13 — Структурна схема блока питания Э1

В первой главе данного проекта был проведён тщательный анализ технических параметров, что позволило выбрать наилучшие схемотехнические решения для линейных и импульсных источников питания. В ходе исследования были изучены различные способы стабилизации выходного напряжения. Основываясь на анализе ведущих топологий, было принято решение использовать обратноходовую схему на начальном этапе преобразования электроэнергии, а также импульсный понижающий преобразователь для финальной настройки напряжения. Для создания структурной схемы источника питания были выбраны контроллер обратноходового преобразователя TOP261EN с интегрированным ключом и DC-DC преобразователь TPS5450DDAR, разработка которой основывалась на стандартных схемах подключения этих микросхем.

2 Конструкторское проектирование блока питания

2.1 Разработка электрической принципиальной схемы

2.1.2 Разработка схемы обратноходового преобразователя

Для разработки схемы обратноходового блока питания на микросхеме TOP261EN будет использовано стандартное приложение Pi Expert от производителя микросхем. Оно позволяет подобрать оптимальные варианты комплектующих для схемы преобразователя, а так же задать необходимые параметры схемы при этом получить готовый пакет документации в которой будет содержаться схема преобразователя, подобранные элементы схемы с наименованием компонентов, расчёт и схема намотки трансформатора, а так же рекомендации производителя по созданию и размещению компонентов на плате. Так же при создании схемы блока питания необходимо изучить руководство по проектированию от производителя [19] и руководство программы Pi Expert[13] .

Прежде чем перейти к этапу моделирования, важно определить параметры входного напряжения для блока питания. Ожидается, что блок будет функционировать при переменном напряжении в 230 В и частоте в 50 Гц. С учётом того, что микросхема рассчитана на работу в диапазоне входных напряжений от 85 до 265 В, целесообразно настроить блок питания на универсальный входной диапазон. Это позволит устройству адаптироваться к различным условиям электросети. После задания необходимых параметров следует продолжить работу, нажав кнопку "Далее". Иллюстрация интерфейса с этими настройками представлена на рисунке 14.

Спецификация

Вход

AC / DC вход

Входное напряжение Мин., V <input type="text" value="85"/> Макс., V <input type="text" value="265"/>	AC / DC вход <input checked="" type="radio"/> Переменный ток <input type="radio"/> Постоянный ток <input type="radio"/> Низковольтный ИП
Частота Частота, Hz <input type="text" value="50"/>	Входная спецификация Универсальный (85 - 265 V) Диап. 100V (85 - 115 V) Диап. 115V (98 - 135 V) Диап. 230V (190 - 265 V) Тип входного напряжения Пользовательский

Рисунок 14 — окно выбора параметров входного напряжения.

В следующем окне программы вводим параметры выхода блока питания, а именно напряжение 30 В и ток 5 А.

После внесения всех основных параметров в программу получаем готовую схему обратноходового преобразователя и справочную документацию со всеми характеристиками и компонентами схемы приложение А.

В приложении А на рисунке А.1 показана схема обратноходового преобразователя на микросхеме TOP261EN от Power Integrations полученная с помощью программного обеспечения. Y-конденсатор С6 вместе с дросселем L1 осуществляют фильтрацию синфазных помех. Дифференциальные помехи фильтруются X-конденсатором С1 и электролитическим полярным конденсатором С2. Фильтрованное переменное напряжение выпрямляется диодным мостом BR1. Термистор RT1 ограничивает ток нарастания в момент подачи переменного напряжения для снижения пускового тока зарядки конденсатора С2, а варистор RV1 защищает схему от превышения уровня входного напряжения сети свыше 280 В.

DA1 регулирует уровень выходного напряжения путем изменения рабочего цикла ШИМ контроллера, который управляет встроенным силовым ключом.

Цепь рассеяния высоковольтного выброса (D1, C3, R1, R2, R3, VR1) ограничивает напряжение на стоке MOSFET ключа в момент его запираания.

Диод VD1 возвращает часть энергии обратно в шину постоянного напряжения. R3 ограничивает обратный ток на диоде и подавляет высокочастотный звон.

Диод VD3 выпрямляет напряжение со вторичной обмотки. Резистор R7 и конденсатор C7 подавляют помехи на диоде VD3. Сглаженное напряжение диодом D3 фильтруется конденсаторами C9, C10 и C11 (класса LowESR). Фильтр второго порядка на элементах L2 и C12 обеспечивает дополнительную фильтрацию выходного напряжения.

Резисторы R10 и R11 служат как делитель напряжения для снятия информации о выходном напряжении. DA2 управляет оптопарой U2 через резистор R8 для отправки этой информации на вывод C микросхемы DA1.

Резисторы R4 и R5 формируют цепь защиты от высокого и низкого входного напряжения.

Для описания выходов и логики работы микросхемы TOP261EN создадим приложение Б где используя техническую документацию [21] и функциональную схему рисунок Б.1 будет дано подробное объяснение принципов её работы.

2.1.2 Разработка схемы импульсного регулятора напряжения

Для создания принципиальной схемы воспользуемся технической документацией [24]. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 15.

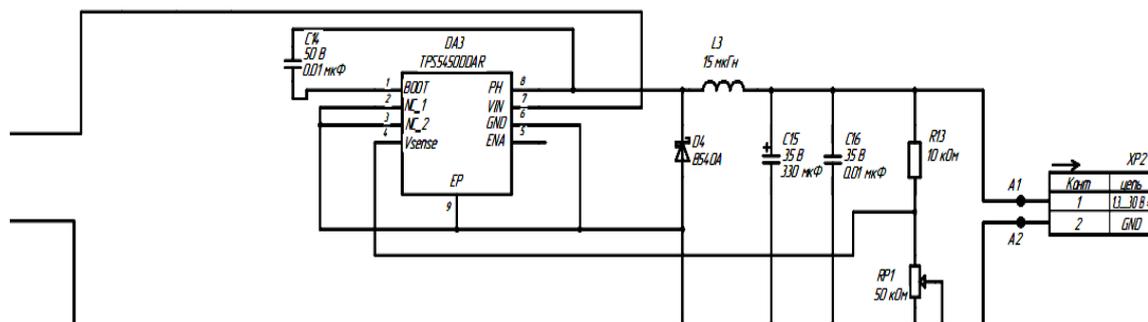


Рисунок 15 — Схема на TPS5450.

Для описания выходов и логики работы микросхемы TPS5450 создадим приложение В где используя техническую документацию [24] и функциональную схему рисунок В.1 будет дано подробное объяснение принципов её работы.

Микросхема принимает входное напряжение в диапазоне от 5.5V до 36V. Интегрированный МОП-транзистор переключается с частотой 500kHz, создавая прямоугольные импульсы напряжения. Индуктивность (L3) и выходной конденсатор (C15) сглаживают импульсы напряжения для получения стабильного выходного напряжения.

Цепь обратной связи: Состоит из резисторов (R13 и RP1) и обеспечивает стабилизацию выходного напряжения путём корректировки рабочего цикла МОП-транзистора.

Выходной фильтр (C16) уменьшают электромагнитные помехи и пульсации напряжения.

Bootstrap-конденсатор (C14): Обеспечивает необходимое напряжение для открытия МОП-транзистора.

Путём объединения схемы TOP261EN и TPS5450 получим окончательную принципиальную схему устройства ЭЗ рисунок 16.

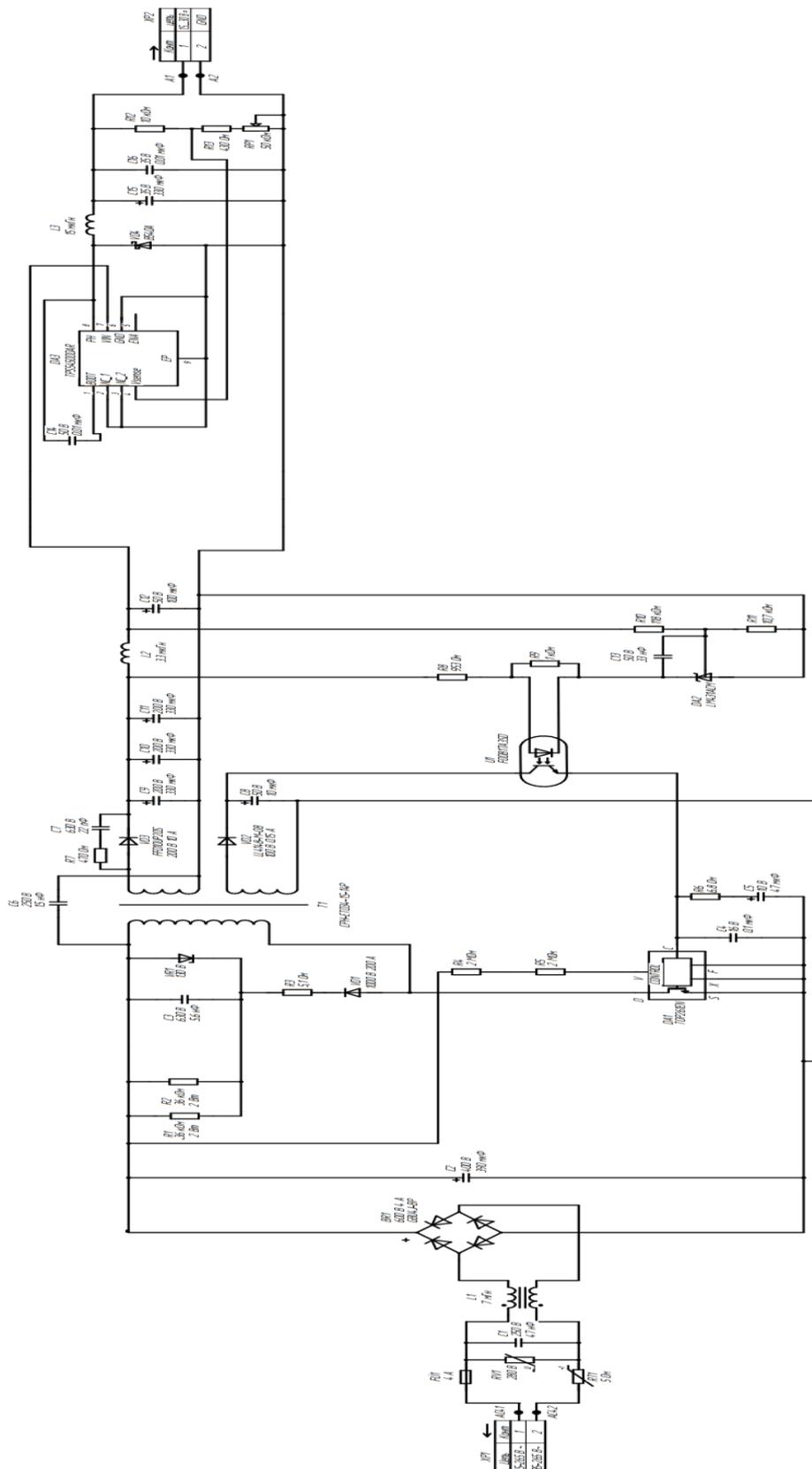


Рисунок 16 — Принципиальная схема ЭЗ.

Выполнив раздел используя для разработки программу для моделирования Pi expert, а так же документацию производителей микросхем TOP261EN и TPS5450 была составлена принципиальная схема ЭЗ, а так же показан принцип работы данных микросхем используя функциональные схемы из документации.

2.2 Подбор и расчёт компонентов схемы

2.2.1 Расчёт и подбор компонентов схемы обратноходового преобразователя.

Для того что бы проверить дизайн произведём расчёт компонентов. Методика расчёта взята из литературы [2]:

- Диапазон входного переменного напряжения: 85-265 В, 50 Гц.
- Выходы: $U_{вых.} +30$ В, номинальный ток $I_{вых.} 5$ А,
- Напряжение пульсации на выходе: $\Delta U_{OUT} 30$ В - 250 мВ (максимум)
- Выходная стабилизация: +30 В - максимум $\pm 10\%$.
- Основные параметры:
- Общая выходная мощность:

$$P_{вых} = U_{вых.} * I_{вых.} = 30 \text{ В} * 5 \text{ А} = 150 \text{ Вт}. \quad (1)$$

- Оценка входной мощности:

$$P_{вх} = P_{вых} / \text{КПД} = 150 \text{ Вт} / 0,8 = 187,5 \text{ Вт}. \quad (2)$$

Входное постоянное напряжение от линии 85-265 В:

$$U_{вх.мин} = 85 \text{ В} * 1,414 = 120 \text{ В}; \quad (3)$$

$$U_{вх.макс} = 265 \text{ В} * 1,414 = 374 \text{ В}; \quad (4)$$

Средние входные токи $I_{вх}$:

наибольшее среднее $I_{вх}$:

$$I_{вх.макс} = P_{вх} / U_{вх.мин} = 187.5 \text{ Вт} / 120 \text{ В} = 1.56 \text{ А}; \quad (5)$$

минимальное среднее $I_{вх}$:

$$I_{вх.мин} = P_{вх} / U_{вх.макс} = 187.5 \text{ Вт} / 374 \text{ В} = 0,5 \text{ А}. \quad (6)$$

расчётный пиковый ток $I_{пик}$:

$$I_{пик} = 5.5 P_{вых} / U_{вх.мин} = 5.5 * (150 \text{ Вт}) / 120 \text{ В} = 6.87 \text{ А}. \quad (7)$$

Тепловые потери:

Практическое правило для обратных преобразователей на основе MOSFET: 35% потерь в MOSFET-транзисторах и 60% потерь в выпрямителях. Предполагаемые потери = 37.4 Вт (при КПД 0.8).

МОП-транзисторы:

$$P_D = (37.4 \text{ Вт})(0,35) = 13.9 \text{ Вт} \quad (8)$$

Выпрямители на обмотках трансформатора:

$$P_{D(+30)} = (30/150)(37.4 \text{ Вт})(0,6) = 4.5 \text{ Вт} \quad (9)$$

$$P_{D(+16)} = (16/150)(37.4 \text{ Вт})(0,6) = 2.3 \text{ Вт} \quad (10)$$

Конструкция трансформатора

В конструкцию трансформатора производитель заложил сердечник ETD34/17/11 из матерьяла N87[17].

Минимальная индуктивность первичной обмотки(L_{pri}) будет составлять :

$$L_{pri} = \frac{U_{вх.мин} * \delta_{макс.}}{I_{пик} * f_{пр}} = \frac{120 \text{ В} * 0,59}{6,87 \text{ А} * 132000 \text{ Гц}} = 71 \text{ мкГн} \quad (11)$$

$\delta_{макс}$ - максимальный рабочий цикл, %

$f_{пр}$ - частота работы преобразователя, Гц

Воздушный зазор(l_{gap}), необходимый для предотвращения насыщения активной зоны, составляет

$$l_{gap} = \frac{(0,4 * \pi * L_{pri} * I_{пик}) * 10^6}{A_c * B_{max}^2} = \frac{(0,4 * 3,14 * 0,000071 * 6,872) * 10^6}{0,97 * 2600} = 0,33 \text{ мм} \quad (12)$$

A_c - эффективная площадь поперечного сечения сердечника, м²[16]

B_{max} - максимальная рабочая магнитная индукция, Тл[16]

0.33 мм~0.5 мм по документации производителя сердечника.

Максимальное количество витков(N_{pri}), необходимое для первичной обмотки, составляет

$$N_{pri} = 1000 * \sqrt{\frac{L_{pri}}{A_L}} = 1000 * \sqrt{\frac{0,078}{251}} = 17,2 \quad (13)$$

Получиное значение 17.2 приблизительно равно 17 виткам по

приложению А первичной катушки.

A_L - коэффициент индуктивного сопротивления ферритового сердечника, нГн [16]

Количество витков, необходимое для выхода +16 В обмотки смешения(N_{sek+16}), составляет:

$$N_{sek+16} = \frac{N_{pri} * (U_{o+16} + U_d) * (1 - \partial_{\max})}{U_{вх.мин} * \partial_{\max}} = \frac{17 * (16 \text{ В} + 1.2 \text{ В}) * (1 - 0.59)}{120 \text{ В} * 0.59} = 2,6 \quad (14)$$

Получившиеся значение 2,6 приблизительно равно 3 виткам по приложения А обмотки смешения.

Количество витков, необходимое для выхода +30 В вторичной обмотки(N_{sek+30}) , составляет:

$$N_{sek+16} = \frac{N_{pri} * (U_{o+30} + U_d) * N_{sek+16}}{(U_{o+16} + U_d)} = \frac{(30 \text{ В} + 1.2 \text{ В}) * 3}{16 \text{ В} * 1.2 \text{ В}} = 5,4 \quad (15)$$

Получившиеся значение 5,4 приблизительно равно 5 виткам по приложения А вторичной катушки.

Так как расчёт трансформатора совпадает с расчётом выданной программой Рі expert будем использовать данные сердечника, основы сердечника и данные намотки трансформатора из приложения А1. На рисунке 17 показаны установочные размеры каркаса сердечника СРН-ЕТD34-1S-14P[16].

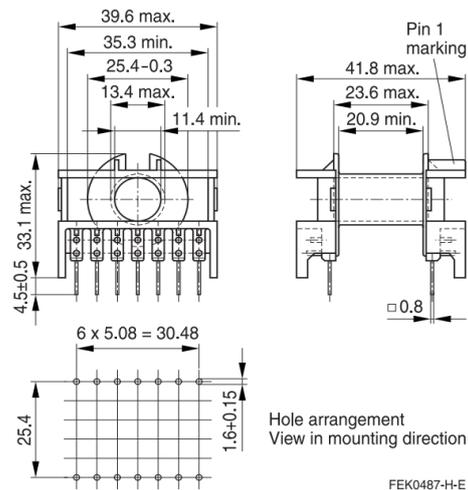


Рисунок 17 — Габариты ETD34-1S-14P.

Цена каркаса: 149 рублей

Цена сердечника: 160 рублей

Расчёт параметров TOP261EN

Для определения параметров силовой части микросхемы воспользуемся методикой из [1]:

Максимальное напряжение на встроенном транзисторе:

Максимальное напряжение на транзисторе U_{VT_max} выбирается исходя из условия:

$$U_{VT_max} > \frac{U_{вх.макс} + N_{pri}}{N_{сек} + 30 * (U_{вых} + U_d)} = \frac{374 \text{ В} + 17}{5 * (30 \text{ В} + 1.2)} = 477.7 \text{ В} \quad (16)$$

Рассчитаем максимальный ток первичной обмотки трансформатора I_{w1_max} :

$$I_{w1_max} = \sqrt{\frac{2P_{вых}}{fnL_{pri}}} = \sqrt{\frac{2 * 150 \text{ Вт}}{132000 \text{ Гц} * 0.8 * 0.000071}} = 6,32 \text{ А} \quad (17)$$

Максимальный ток через транзистор I_{VT_max} равен максимальному току первичной обмотки трансформатора:

$$I_{VT_max} = I_{w1_max} \quad (18)$$

Исходя из полученных данных расчётов встроенный транзистор микросхемы TOP261EN $U_{VT_max} = 700$ В $I_{VT_max} = 11$ А полностью подходит для применения в проекте. Посадочное место и размеры корпуса показаны на рисунке 18. Цена микросхемы 324 руб.

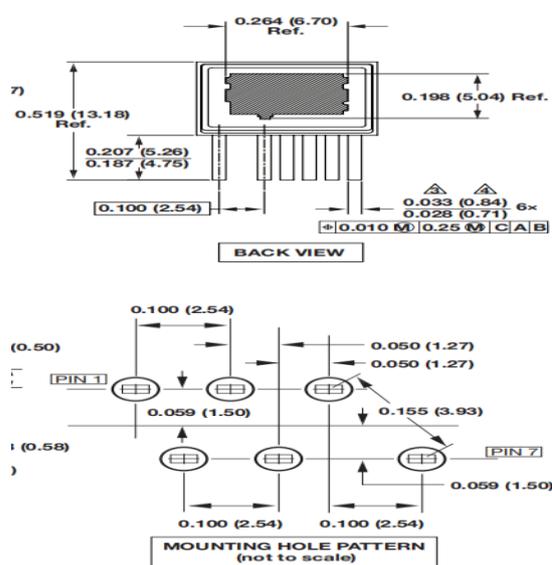


Рисунок 18 — Габариты TOP261EN.

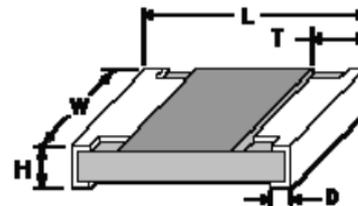
Так как расчёт трансформатора и микросхемы совпадают с дизайном созданным программой, то для подбора компонентов обвязки микросхемы TOP261EN воспользуемся технической документацией [19].

Вывод микросхемы С

Конденсатор управления С4 используется для запуска схемы вместе с внутренним источником высокого напряжения микросхемы С4 - 0,1 μ F, 16 V, Керамический, X7R . Основные размеры компонентов для монтажа на плату показаны на рисунке 19. цена 1 руб.

Основные размеры SMD - компонентов

Резисторы



Типоразмер EIA	Типоразмер метрический	L (mm)	W (mm)	H (mm)	D (mm)	T (mm)
0402	1005	1.0±0.1	0.5±0.05	0.35±0.05	0.25±0.1	0.2±0.1
0603	1608	1.6±0.1	0.85±0.1	0.45±0.05	0.3±0.2	0.3±0.2
0805	2012	2.1±0.1	1.3±0.1	0.5±0.05	0.4±0.2	0.4±0.2
1206	3216	3.1±0.1	1.6±0.1	0.55±0.05	0.5±0.25	0.5±0.25
1210	3225	3.1±0.1	2.6±0.1	0.55±0.05	0.4±0.2	0.5±0.25
2010	5025	5.0±0.1	2.5±0.1	0.55±0.05	0.4±0.2	0.6±0.25
2512	6332	6.35±0.1	3.2±0.1	0.55±0.05	0.4±0.2	0.6±0.25

Керамические конденсаторы



Типоразмер EIA	Типоразмер метрический	L (mm)	W (mm)	H (mm)
0402	1005	1.0	0.5	0.55
0603	1608	1.6	0.8	0.9
0805	2012	2.0	1.25	1.3
1206	3216	3.2	1.6	1.5
1210	3225	3.2	2.5	1.7
1812	4532	4.5	3.2	1.7
1825	4564	4.5	6.4	1.7
2220	5650	5.6	5.0	1.8
2225	5664	5.6	6.3	2.0

Танталовые конденсаторы



Типоразмер	Типоразмер метрический	L (mm)	W (mm)	H (mm)	D (mm)
A	3216	3.2	1.6	1.6	1.2
B	3528	3.5	2.8	1.9	2.2
C	6032	6.0	3.2	2.5	2.2
D	7343	7.3	4.3	2.9	2.4
E	7343H	7.3	4.3	4.1	2.4

Рисунок 19 — Типоразмеры компонентов для поверхностного монтажа.

Между выводом С и выводом S питания микросхемы необходимо подключить последовательную комбинацию из резистора R6 6,8 Ом, 0,125 Вт, толстопленочный цена 1 руб. и электролитического конденсатора С5 ёмкостью 7 мкФ, 10.0 В. Цена 15 руб. Вид электролитического конденсатора для поверхностного монтажа показан на рисунке 20.

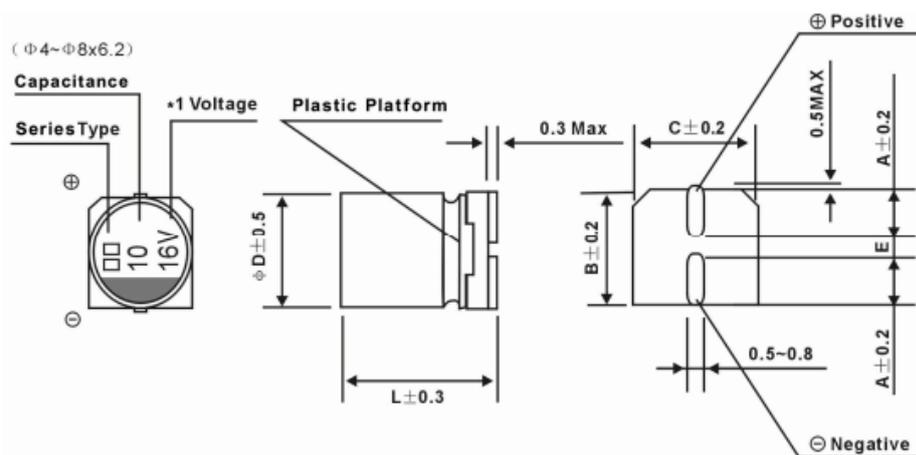


Рисунок 20 — Размеры конденсатора.

Конденсатор C5 обеспечивает синхронизацию для автоматического перезапуска и, вместе с динамическим сопротивлением Z_c [Э2-1] управляющего контакта, устанавливает доминирующий полюс для контура управления. Комбинация конденсатора C5 и последовательного резистора R6 добавляет ноль к передаточной функции контура управления, в результате увеличение фазы составляет приблизительно 200 Гц что увеличивает пропускную способность источника питания.

Вывод микросхемы V

Два последовательно соединенных резистора R4 и R5 2 МОм, 1 %, 0,25 Вт, толстоплёночных подключены после выхода сглаживающего конденсатора и к выводу микросхемы V предназначены для защиты микросхемы от высокого входного 451 В и пониженного напряжение 102 В. Цена 6 руб.

Расчёт обратной связи

Для построение обратной связи микросхемы TOP261EN применяется узел состоящий из DA2 TL431ACDR[25] в корпусе SOIC-8 цена 23 руб. и оптопары U1 FOD817A3SD[26] в корпусе 4-smd цена 37 руб.

Элементы заданные в документации[19] и имеющие стандартные параметры:

- R8 - усиление по постоянному току - 953 Ом, 0,125 Вт, Толстоплёночный цена 1 руб.
- R9 - устанавливает минимальный ток TL431 - 1 кОм, 0,125 Вт, Толстоплёночный цена 1 руб.
- C13 - конденсатор снижение пульсаций для TL431 - 33 мкФ, 50 В, Керамический, X7R цена 1 руб.
- R11 - один из резисторов делителя установки напряжения TL431 10,7 кОм, 0,125 Вт, Толстоплёночный
- R10 - рассчитываемый резистор делителя установки напряжения TL431 118 кОм, 0,125 Вт, Толстоплёночный

Проверка значения R10

$$R_{10} = U_{\text{вых}} - 2.5/2.5 * R_{11} = 30 \text{ В} - 2.5/2.5 * 10.7 \text{ кОм} = 117.8 \text{ кОм} \quad (19)$$

Округляя полученное значение R10 до стандартных получаем 118 кОм что совпадает с расчётами программы.

Фильтр L2 и C13

Для снижения высоких частот добавлен фильтр (L2 и C13) по документации[19].

L2 - 3,3 мкГн, 6,5 А цена 150 руб[21]. Габариты катушки показаны на рисунке 21.

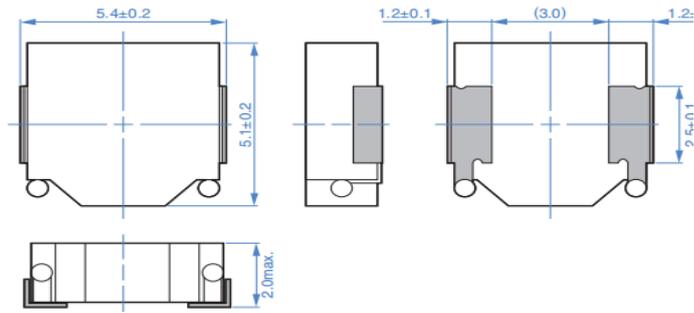


Рисунок 21 — Размеры катушки.

Размер индуктивности должен находиться в диапазоне от 1 мкГн до 3,3 мкГн при номинальном токе.

C12 - 100 мкФ, 50 В, Электролитический, (10,2 mm x 8 mm) Цена 14 руб.

Емкость C12 должна находиться в пределах от 100 мкФ до 330 мкФ при

$$U_{c12} \geq 1,25 \times U_{вых.} \quad (20)$$

$$U_{c12} \geq 1.25 * 30 \text{ В}$$

$$U_{c12} \geq 37.5 \text{ В}$$

Оптрон U1 должен быть подключён, перед катушкой индуктивности постфильтра, а измерительные резисторы DA2 - после катушки индуктивности постфильтра.

Расчёт параметров и подбор выходных диодов D2 и D3

Отношение числа витков вторичной и первичной обмоток $K_{N_{sek+16}}$ и $K_{N_{sek+30}}$ рассчитывается по соотношению[1]:

$$K_{N_{sek+16}} = N_{pri}/N_{sek+16} = 17/3 = 5.6 \quad (21)$$

$$K_{N_{sek+30}} = N_{pri}/N_{sek+30} = 17/5 = 3.4 \quad (22)$$

Максимальное обратное напряжение $U_{D2.макс}$ и $U_{D3.макс}$ на диодах D2 и D3 рассчитывается по формуле[1]:

$$\begin{aligned} U_{D2.макс} &= U_{вход.макс}/K_{Nсек+16} + U_{вых} + U_{vd2} \\ &= 374 \text{ В} / 5.6 + 30 \text{ В} + 1.2 \text{ В} = 97 \text{ В} \end{aligned} \quad (23)$$

U_{vd} - прямое падение напряжения на диоде (для кремниевых диодов можно принять равным 1,2 В, для диодов Шоттки - 0,8 В).

$$\begin{aligned} U_{D3.макс} &= U_{вход.макс}/K_{Nсек+30} + U_{вых} + U_{vd3} \\ &= 374 \text{ В} / 3.4 + 30 \text{ В} + 1.2 \text{ В} = 141 \text{ В} \end{aligned} \quad (24)$$

Максимальный ток $I_{D3.макс.}$ через диод D2 равен максимальному току вторичной обмотки трансформатора и равен:

$$I_{D3.макс.} = I_{w1_max} * K_{Nсек+30} = 6.32 \text{ А} * 3.4 = 21.4 \text{ А} \quad (25)$$

Среднее значение тока равно выходному току:

$$I_{D3.сред.} = I_{вых} = 5 \text{ А} \quad (26)$$

$$I_{D2.сред.} = I_{вых} = 0.006 \text{ А}$$

Программа подобрала следующие компоненты:

- D2 - 100 В, 0,15 А, Быстровосстанавливающийся, 8 нС, SOD-8D, LL4148-M-08 Цена: 54 руб
- D3 - 200 В, 10 А, Ультра быстровосстанавливающийся, 35 нС, D-РАК, FFD10UP20S Цена: 99 руб.[28] Размеры и посадочное место D3 показано на рисунке 22.

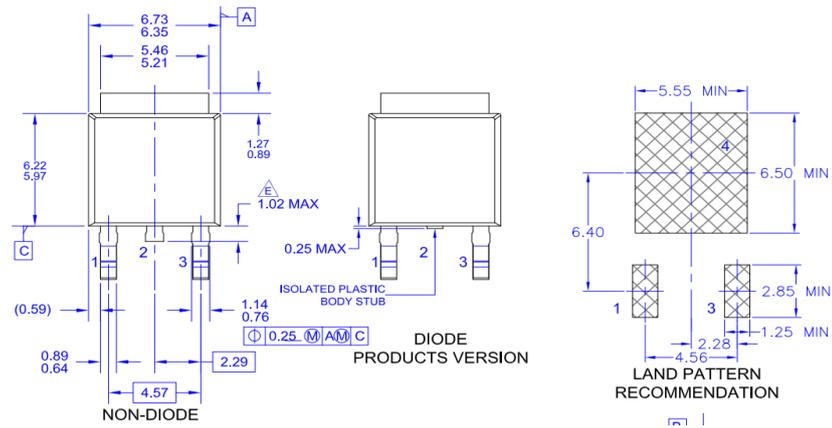


Рисунок 22 — Габариты FFD10UP20S

Подобранные компоненты программой подходят по параметрам полученных в результате вычислений.

Расчёт конденсаторов выходного фильтра C9,C10,C11 и C8

Определим максимальное напряжение на блоке конденсаторов C9,C10,C11 $U_{C9,10,11\text{макс.}}$ и конденсатора C8 $U_{C8\text{макс.}}$ [1]

$$U_{C9,10,11\text{макс.}} = 1.25 * U_{\text{вых}} = 1.25 * 30 \text{ В} = 37.5 \text{ В} \quad (27)$$

$$U_{C8\text{макс.}} = 1.25 * U_{\text{вых.смеш.}} = 1.25 * 16 \text{ В} = 20 \text{ В}$$

$U_{\text{вых.смеш}}$ - напряжение на обмотки смещения.

Составляющая пульсаций $\Delta U_{\text{Cout_disch}}$, обусловленная его зарядом-разрядом выбирается в пределах 10-50% от ΔU_{OUT} :

$$\Delta U_{\text{Cout_disch}} = (0.1 \dots 0.5) * \Delta U_{\text{OUT}} = 0.2 * 0.25 \text{ В} = 0.05 \text{ В} \quad (28)$$

Расчёт емкости выходных конденсаторов фильтра $C_{\text{вых}+30}$ и $C_{\text{вых}+16}$:

$$C_{\text{вых}+30} = I_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{Cout_disch}} * f = 5 \text{ А} / 0.05 \text{ В} * 132000 \text{ Гц} = 757 \text{ мкФ} \quad (29)$$

$$C_{\text{вых}+16} = I_{\text{вых.смеш.}} / \Delta U_{\text{Cout_disch}} * f = 0.006 \text{ А} / 0.05 \text{ В} * 132000 \text{ Гц} = 9.1 \text{ мкФ}$$

Для выходного фильтра вторичной обмотки используются 3 одинаковых конденсатора C9,C10,C11 330 мкФ, 200 В, Электролитический, полярный (40 mm x 18 mm) цена 220 руб.

Для выходного фильтра вторичной обмотки смещения используются конденсатор C8 10 мкФ, 50 В, Электролитический, (6,1 mm x 6,3 mm) цена 140 руб.

При схеме параллельного соединении конденсаторов C9,C10,C11 общая ёмкость получится 990 мкФ. Все характеристики подобранных программой элементов удовлетворяют выполненным расчётам.

Расчёт входного конденсатора C2

Определим величину максимального напряжения конденсатора $U_{C2\max}$ [1]

$$U_{C2\max} = U_{\text{вх.макс}} = 374 \text{ В.} \quad (30)$$

Расчёт составляющих выходных пульсаций $\Delta U_{\text{вх}}$

Падение напряжения вследствие разряда конденсатора ΔU_{Cin_disch} выбирается в пределах 1-2% от величины входного напряжения $U_{\text{вх}}$:

$$\Delta U_{Cin_disch} = (0.1 \dots 0.2)U_{\text{вх}} = 0.2 * 374 \text{ В} = 74,8 \text{ В} \quad (31)$$

Расчёт ёмкости входного конденсатора

Минимальное значение ёмкости входного конденсатора рассчитывается по соотношению C2:

$$C_2 = (\Delta_{\text{макс}} * \frac{I_{w1_max}}{2})^2 * \frac{L_{ps}}{\Delta U_{Cin_disch} * U_{вх.мин}} = (0.59 * \frac{6.32 \text{ A}}{2})^2 * \frac{0.00001}{74.8 \text{ В} * 120 \text{ В}} = 388 \text{ мкФ}$$

(32)

L_{PS} – индуктивность цепи питания преобразователя (индуктивность первичного источника) приложение А1;

Программой был выбран конденсатор C_2 390 мкФ, 400 В, Высоковольтный электролитический, (50 мм х 25,4 мм) цена 1800 руб.

Компоненты цепи стабилизации выброса

В схеме применено решение объединяющие в себе RCD-демпфер и TVS-демпфер. Выберем напряжение стабилизации стабилитрона $U_{VR1_{макс}}$. [1]

Максимальная величина напряжения стабилизации TVS-стабилитрона $U_{VR1_{макс}}$ выбирается исходя из условия:

$$U_{VR1_{макс}} > K_{N_{сек+30}} (U_{вых} + U_{vd}) = 3.4(30 \text{ В} + 1.2 \text{ В}) = 106.08 \text{ В} \quad (33)$$

Так как все предыдущие номиналы компонентов укладываются в произведённые расчёты и соответствуют просчитанному программой дизайну пере-числим компоненты из которых состоит данный узел.

Элементы стабилизации выброса напряжения первичной обмотки:

- Блокировочный диод D1 RGP25M-E3/54 1000 В, 2,5 А, Быстровосстанавливающийся, 500 нС, DO-201AD[29] цена 350 руб.
На рисунке 23 показаны размеры диода D1.
- Резистор R3 ограничения тока D1 5,1 Ом, 0,25 Вт, Толстоплёночный цена 2 руб.

- Стабилитрон VR1 P6SMB130CA-E3/52[30] 130 В, 5 Вт, DO-214AA, TVS Цена 140 руб. На рисунке 24 показаны размеры стабилитрона VR1.
- Параллельные резисторы R1 и R2 36 кОм, 2 Вт, Металл-оксидно плёночный. Цена 13 руб.
- Конденсатор С3 5,6 nF, 630 V, Высоковольтный керамический код размера 3216 цена 130 руб.

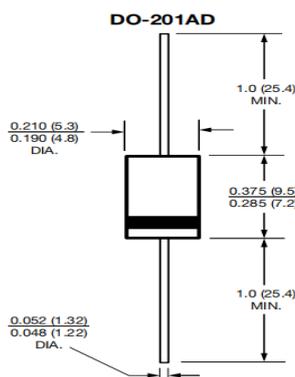


Рисунок 23 — Габариты RGP25M-E3/54

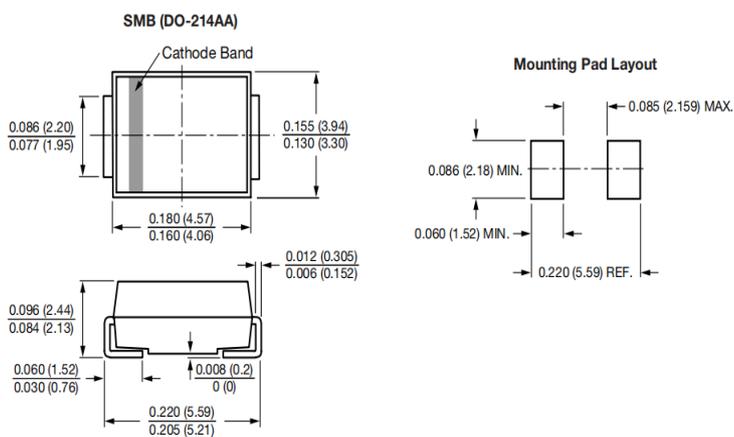


Рисунок 24 — Габариты P6SMB130CA-E3/52

Элементы стабилизации выброса напряжения в цепи диода D3:

- Резистор R7 470 Ом, 0,25 Вт, Толстоплёночны типоразмер 1005 цена 1 руб.
- Конденсатор С7 22 пФ, 630 В, Высоковольтный керамический типоразмер 5664 цена 95 руб.

Компоненты в секции входящего переменного переменного напряжения

Имея данные полученные в результате расчёта входных параметров $U_{вх.мин} = 120 \text{ В}$; $U_{вх.макс} = 374 \text{ В}$; $I_{вх.макс} = 1.56 \text{ А}$; $I_{вх.мин} = 0,5 \text{ А}$ подберём компоненты защиты в цепи входного переменного напряжения.

Диодный мост.

Выпрямительный диодный мост с параметрами BR1 GBU4J-VP 600 В, 4 А, GBU[31] цена 110 руб. Размеры и габариты BR1 показаны на рисунке 25.

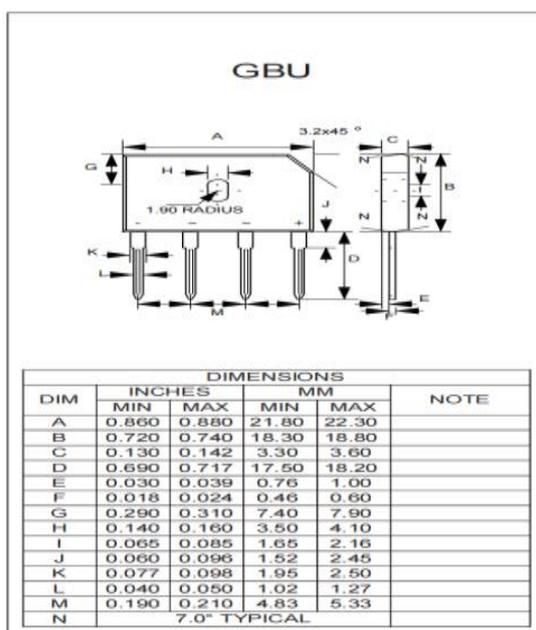


Рисунок 25— Габариты GBU4J-VP

Предохранитель

В качестве FU1 выберем предохранитель с током срабатывания 4 А 2JS 4-R с держателем Цена 100 руб. Внешний вид предохранителя FU1 с держателем показан на рисунке 26.



Рисунок 26 — Внешний вид предохранителя

Варистор

Для защиты от превышения напряжения на входе преобразователя установим варистор RV1 V275LA4 275 В, 23 J, 7 мм цена 7 руб. Внешний вид варистора RV1 показан на рисунке 27.



Рисунок 27 — Внешний вид варистора

Термистор

Для ограничение пускового тока преобразователя установим термистор RT1 NTC 5 Ом, 4,7 А CL-150 Цена 350 руб. Внешний вид термистора RT1 показан на рисунке 28.



Рисунок 28 — Внешний вид термистора

Фильтры подавления помех:

- Конденсатор С1 47 нФ, 250 В, Пленочный, Класс Х типоразмер 2220
Цена 140 руб.
- Конденсатор С6 1,5 нF, 250 VAC, Керамический, Класс Y типоразмер 2211 Цена 40 руб.
- Синфазный дроссель L1 7 мГн, 3,5 А. цена 1000 руб. Габариты дроселя показаны на рисунке 29.

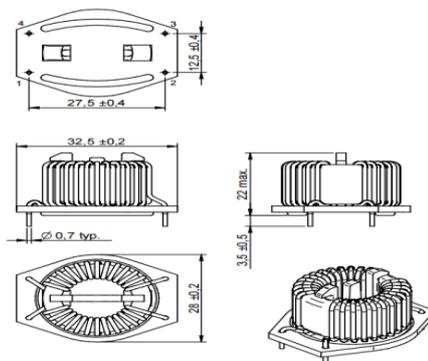


Рисунок 29 - Габариты дросселя L1

2.2.2 Расчёт и подбор компонентов схемы регулятора напряжения

Для расчёта регулятора напряжения воспользуемся документацией производителя[24].

Конденсатор управления C14 обеспечивает напряжение на затворе для МОП-транзистора на стороне высокого напряжения и имеет стандартные значения заданное производителем. C14 - 0.01 мкФ, 50 В, Керамический, X7R, типоразмер 0402, цена 1 руб.

Выходное напряжение TPS5450 устанавливается резистивным делителем (R13 и RP1) с выхода на вывод VSENSE. Резистор R13 имеет установленное значение производителем в 10,7 кОм. Резистор R13 - 10 кОм, 0,25 Вт, Толстоплёночный, типоразмер 1005 цена 1 руб. Рассчитаем значение резистора RP1 для выходного напряжения 30 В:

Максимальное значение резистор RP1 будет иметь при минимальном напряжении на выходе устройства

$$RP1 = \frac{R13 * 1.221}{U_{\text{ВЫХ}} - 1.221} = \frac{10000 \text{ Ом} * 1.221 \text{ В}}{1.5 \text{ В} - 1.221 \text{ В}} = 43571 \text{ Ом} \quad (34)$$

Возьмём ближайший по значению переменный резистор 50 кОм 3386F-1-503LF, сквозное отверстие 3/8, 0.5 Вт, цена 420 руб. На рисунке 30 показан внешний вид переменного резистора.

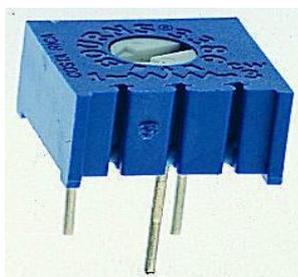


Рисунок 30 — Внешний вид RP1

Произведём расчёт параметров катушки индуктивности L3.

Минимальная индуктивность L_{min} определяется по формуле:

$$L_{min} = \frac{U_{ВЫХ} * (U_{ВХ.МАКС} - U_{ВЫХ})}{U_{ВХ.МАКС} * K_{ind} * I_{ВЫХ} * F_{SW}} = \frac{30 \text{ В}}{30\text{В} * 0.03 * 5 \text{ А} * 500000 \text{ Гц}} = 13 \text{ мкГн} \quad (35)$$

K_{ind} - коэффициент от 0.02.....0.03

F_{SW} - минимальная частота работы преобразователя, Гц

Пиковый ток катушки $I_{L(pk)}$ определяется по формуле:

$$I_{L(pk)} = I_{ВЫХ} + \frac{U_{ВЫХ} * (U_{ВХ.МАКС} - U_{ВЫХ})}{1.6 * U_{ВХ.МАКС} * K_{ind} * L_{ВЫХ} * F_{SW}} = 5\text{А} + \frac{30 \text{ В}}{1.6 * 30\text{В} * 0.000015 * 500000 \text{ Гц}} = 5,08 \text{ А} \quad (36)$$

В качестве элемента L3 выберем CDRH1127/LD-150 5.65 А, 15 мкГн, 12.3×12.3×8.0 mm, цена 79 руб. Габариты катушки и внешний вид представлены на рисунке 31.

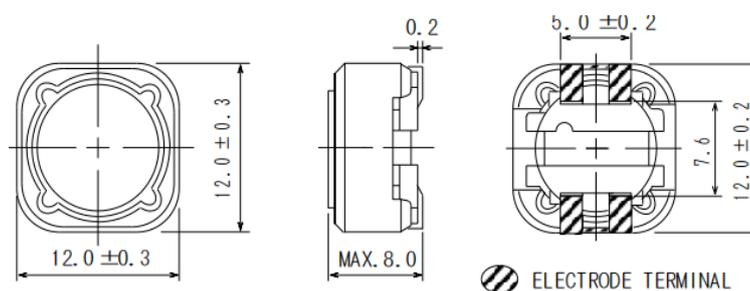


Рисунок 31 — Внешний вид L3

Произведём расчёт параметров выходного конденсатора C15.

Минимальная ёмкость C_{out} определяется по формуле:

$$C_{out} = \frac{1}{3357 * L_{out} * f_{co} * U_{вых}}, \text{ где} \quad (37)$$

$$f_{co} = \frac{f_{lc}^2}{85 * U_{вых}} = \frac{2590^2}{85 * 30 \text{ В}} = 2630, \text{ тогда}$$

$$C_{out} = \frac{1}{3357 * 0,000015 * 2630 * 30 \text{ В}} = 251 \text{ мкФ}$$

f_{lc} - значение из документации 2590[12].

C15 - 330 мкФ, 50 В, Электролитический, smd (10,2 mm x 8 mm) цена 240 руб.

C16 - 0.01 мкФ, 50 В, Керамический, X7R, типоразмер 0402, цена 1 руб.

Подберём диод D4 по рекомендациям производителя.

D4 - диод шотки B540A 40 В, 5.5 А, DO-214-AB, цена 25 руб.

Подводя итог о проделанной работе, можно сделать вывод о том что результаты моделирования принципиальной схемы в программе Pspice были подтверждены сравнительными расчётами. Кроме того, основные компоненты принципиальной схемы как обратноходового преобразователя, так и импульсного стабилизатора были успешно подобраны. Так же был составлен перечень ключевых элементов ПЭИ.

2.3 Моделирование работы TPS5450

TINA-TI 9 - это мощный инструмент, разработанный компанией Texas Instruments для моделирования и анализа электронных схем. В новой версии программы добавлены улучшения и новые функции, сделавшие ее еще более

удобной и функциональной для инженеров и разработчиков.

Особенности TINA-TI 9:

- Моделирование аналоговых и цифровых схем
- Поддержка SPICE-моделей.
- Интерактивное моделирование.
- Анализ частотных характеристик.
- Виртуальные измерительные приборы.
- Микроконтроллерное моделирование.
- Многопараметрический оптимизатор.

Для того что бы симулировать работу преобразователя TPS5450 соберём в программе схему, как показано на рисунке 32.

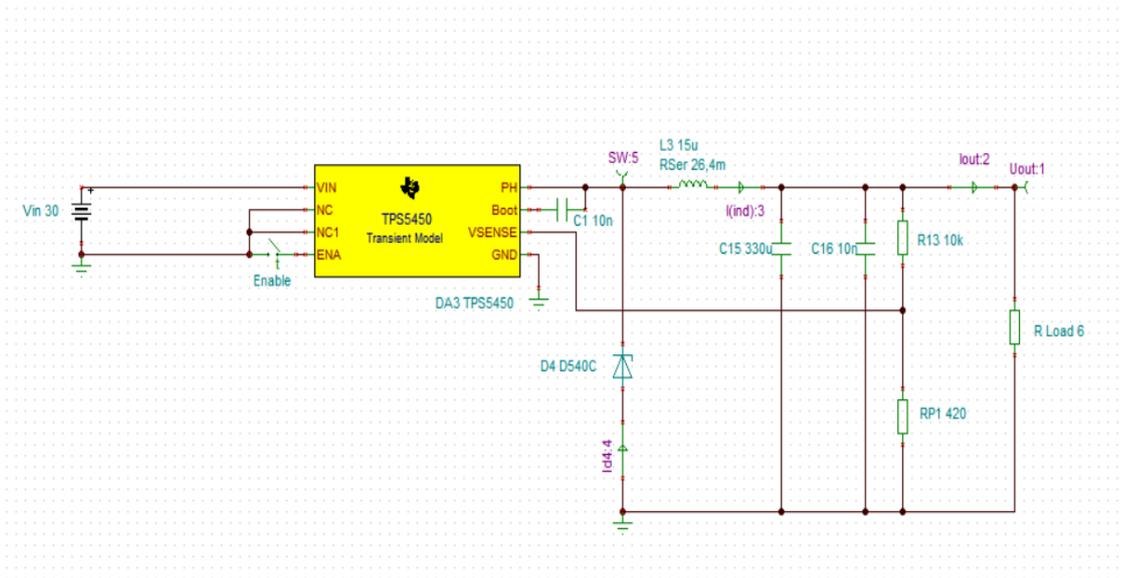


Рисунок 32 — Модель для симуляции TPS5450.

На схеме будут установлена точка показывающая выходное напряжение схемы U_{out} , а так же ток в цепи нагрузки I_{out} . Для понимания процесса работы преобразователя так же установим измерение тока на катушке L3 $I_{(ind)}$, измерение тока на диоде D4 I_{d4} и измерение уровня сигнала с выхода преобразователя SW. Для изменения параметра выходного

напряжения будем менять номинал резистора $RP1$ и производить анализ переходных процессов, нагрузку будем менять используя резистор R_{load} .

Установим сопротивление $RP1$ равным 200 Ом и сопротивление нагрузки 6 Ом. Произведём анализ переходных процессов и получим результат который представлен в приложение Г на рисунке Г.1. При анализе данного рисунка видно что напряжение U_{out} не поднимается выше 29.4 В, ток I_{out} не поднимается выше 4.94 А, а все остальные параметры имеют линейные характеристики что говорит об отсутствие работоспособности микросхемы.

Возможные причины не исправности схемы:

- Низкое входное напряжение
- Слишком низкое сопротивление $RP1$.

Так как уровень опорного напряжения TPS5450 равен 1.22 В попробуем увеличить V_{in} до 32 В в схеме симуляции, считая что входящее напряжение V_{in} больше выходящего U_{out} на уровень опорного напряжения 1.22 В.

Так же рассчитаем значение $RP1$ для для установки напряжения 30 В на выходе преобразователя по формуле 34 из 2.2.2

$$RP1 = \frac{R13 * 1.221}{U_{вых} - 1.221} = \frac{10000 \text{ Ом} * 1.221 \text{ В}}{30 \text{ В} - 1.221 \text{ В}} = 423 \text{ Ом} \quad (38)$$

Установим значения $V_{in} = 32 \text{ В}$, округлим полученное значение из расчётов и сделаем $RP1 = 430 \text{ Ом}$ и повторим симуляцию приложение Г рисунок Г.2. Исходя из полученных данных симуляции $U_{out} = 29.93 \text{ В}$, $I_{out} = 4.99 \text{ А}$. Так же появились значения других параметров, а значит схема работает правильно. Исходя из полученных данных скорректируем значения резистора R_{10} в цепи управления обратноходового преобразователя для

увеличения значения на выходе с 30 В до 32 В по формуле (19) из раздела 2.2.1

$$R_{10} = U_{\text{вых}} - 2.5/2.5 * R_{11} = 32 \text{ В} - 2.5/2.5 * 10.7 \text{ кОм} = 127 \text{ кОм} \quad (39)$$

Произведём замену номинала резистора в принципиальной схеме Э3. Так как в схеме все элементы рассчитаны с запасом, то изменение напряжения на 2 В не приведёт к выходу из строя обратного преобразователя.

Так как при первичном анализе было установлено что значения RP1 нельзя опускать ниже 430 Ом, а данный потенциометр с регулированием от 0 до 50 кОм, то с ним последовательно необходимо включить резистор R13 с номиналом 430 Ом. Так же необходимо внести изменения в принципиальную схему Э3.

Далее проверим установку минимального напряжения на микросхеме TPS5450. Установим сопротивление RP1= 43571 Ом и сопротивление нагрузки 0.3 Ом. Произведём анализ переходных процессов и получим результат который представлен в приложение Г на рисунке Г.3. Исходя из полученных данных симуляции $U_{\text{out}} = 1.54 \text{ В}$, $I_{\text{out}} = 5.13 \text{ А}$ что соответствует расчётам при выборе значения сопротивления RP1 = 43571 Ом.

Для исследования работы TPS5450 установим сопротивление RP1 равным 820 Ом при сопротивлении нагрузки $R_{\text{load}} = 8 \text{ Ом}$. Произведём анализ переходных процессов и получим результат который представлен в приложение Г на рисунке Г.4. На рисунке Г.4 участок 1 указывает на момент открытия внутреннего ключа микросхемы, при этом ток на диоде D4 падает, а в цепи индуктивности L3 растёт. Обратная ситуация происходит на 2 участке при закрытии ключа. Ток на L3 спадает, а на D4 возрастает. Данный график наглядно подтверждает принцип работы понижающего импульсного

преобразователя.

Выполнив подраздел 2.1 используя для разработки программу для моделирования Pspice, а так же документацию производителей микросхем TOP261EN и TPS5450 была составлена принципиальная схема ЭЗ, а так же показан принцип работы данных микросхем используя функциональные схемы из документации.

Выполнив подраздел 2.2 работы были подтверждены результаты моделирования схемы в программе Pspice расчетами и подобраны компоненты принципиальной схемы. Составлен перечень элементов ПЭИ.

Выполнив подраздел 2.3 используя программу TINA-TI 9 для анализа переходных процессов и модели микросхемы TPS5450 были внесены правки в принципиальную схему ЭЗ. Изменено значение резистора R10 на 127 кОм, а так же последовательно с RP1 добавлен резистор R13 на 430 Ом. Произведена проверка установки минимального и максимального выходного напряжения с помощью RP1, а так же наглядно продемонстрирован принцип работы импульсного понижающего преобразователя.

3 Технологический раздел

3.1 Моделирование печатной платы

После определения размеров площади и размеров платы приложение Д, а так же основных характеристик платы приложение Е перейдем к разработке платы в программе для моделирования. Для этих целей воспользуемся программой KiCad.

KiCad — это свободно распространяемый пакет программного обеспечения для автоматизированного проектирования электронных устройств (EDA). Он позволяет разработчикам создавать схемы и печатные платы с высокой степенью точности и эффективности. Вот некоторые из ключевых функций KiCad, которые делают его популярным выбором среди инженеров и хобби-электронщиков:

- Редактор схем
- Библиотеки компонентов:
- Редактор печатных плат (PCB)
- Проверка правил проектирования (DRC)
- 3D-просмотр
- Инструменты для создания библиотек
- Экспорт в форматы производства

Процесс моделирования печатной платы в KiCad можно разделить на несколько основных этапов:

Скачаем файлы проекта разработанного ОП из программы Pi expert, запустим KiCad и откроем редактором схем Eeschema полученную вместе с файлами проекта схему. Далее необходимо используя стандартные библиотеки программы Kikad и электронный ресурс поиска компонентов[29] и принципиальную схему ЭЗ построить схему преобразователя и объединив

компоненты двух схем получить вариант для дальнейшего моделирования платы. Далее выбираем значения компонентов и проверяем схему на наличие ошибок с помощью инструмента Electrical Rules Check (ERC). Окончательная схема для моделирования платы блока питания представлена на рисунке 33.

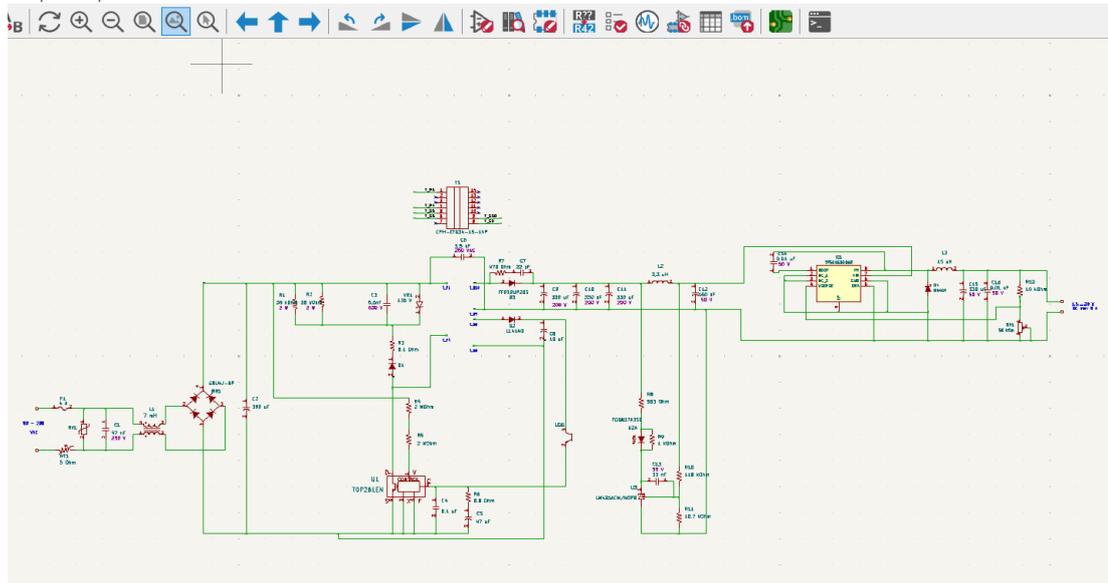


Рисунок 33 — Схема для моделирования

Далее в редакторе посадочных мест в основном окне схемы программы добавим каждой детали посадочное место для того что бы можно было сформировать рисунок платы. Окно выбора посадочных мест показано на рисунке 34.

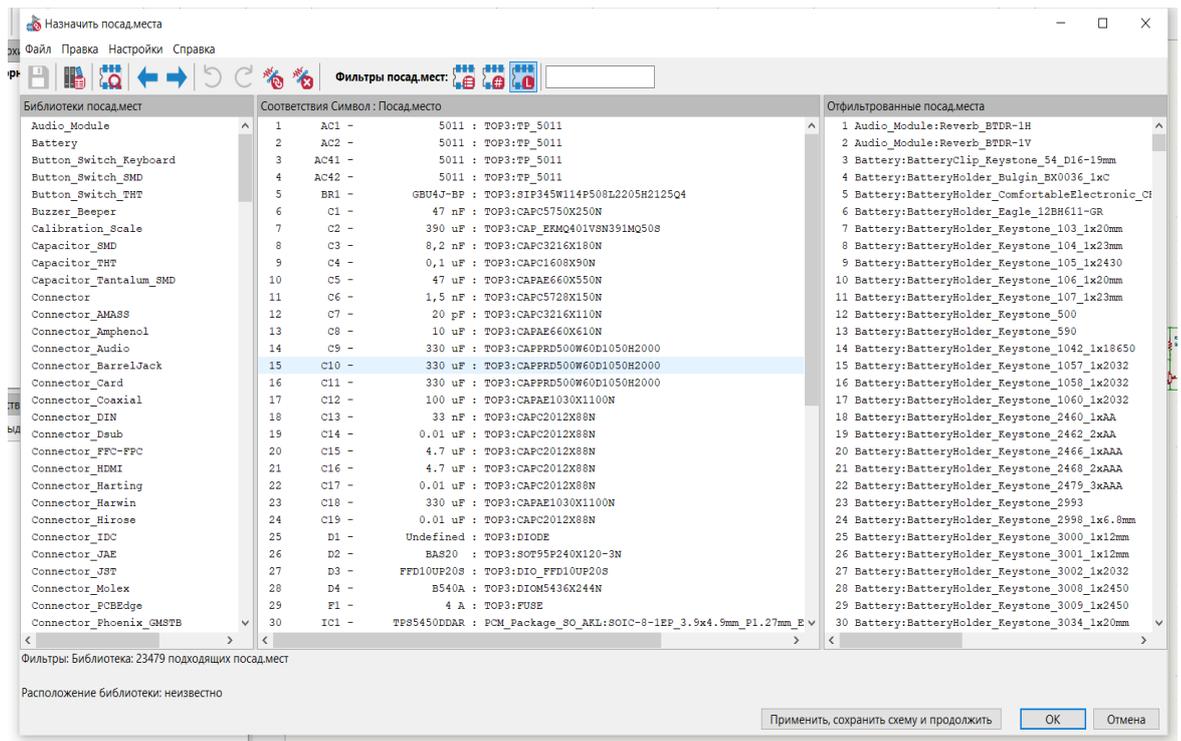


Рисунок 34 — Окно назначения посадочных мест

Далее продолжим работу в редактор плат Pcbnew. Произведём импорт списка соединений из Eeschema. Размещая компоненты на плате, необходимо учитывая требования к монтажу и тепловыделению данные в приложении А1, а так же в документации на микросхему[12]. Так же зададим размер платы рассчитанные в разделе 3.1.

Проведём трассировку печатных дорожек, соединяющих контакты компонентов используя рассчитанные значения из раздела 3.2. Проверим плату на наличие ошибок с помощью инструмента Design Rules Check (DRC).

После завершения всех необходимых этапов получаем готовую модель платы с документацией необходимой для создание чертежей. Готовая модель платы представлена на рисунке 35. 3D модель платы представлена на рисунке 36.

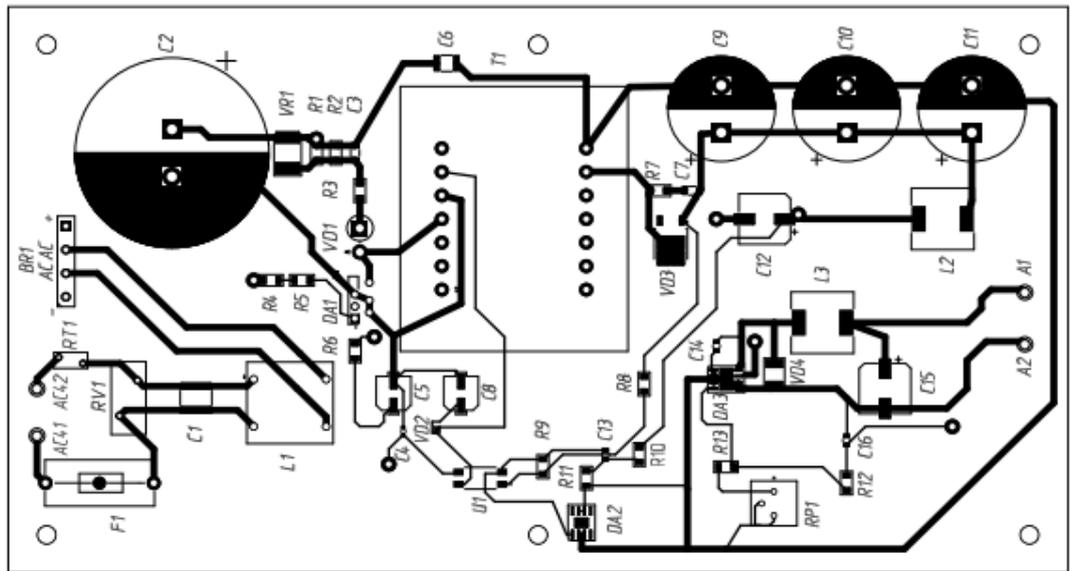


Рисунок 35 — Модель платы

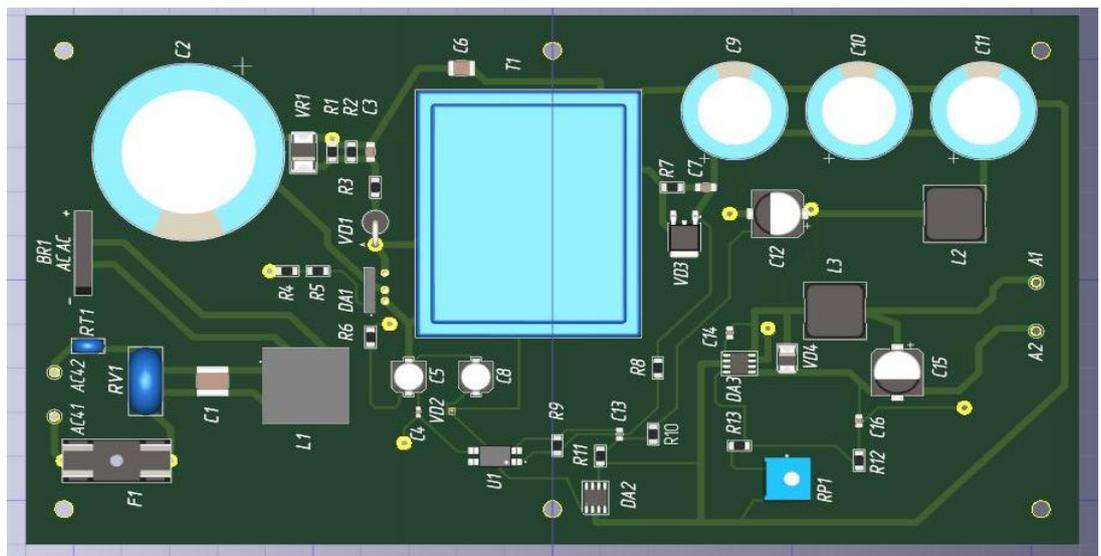


Рисунок 36 — 3D модель платы

Рабочий чертёж печатной платы и сборочный чертёж играют важную роль в производстве электронных устройств. Они обеспечивают точные инструкции для изготовления платы и монтажа компонентов.

Рабочий чертёж печатной платы включает в себя:

- Положение и размеры проводящих дорожек: Это критически важно для обеспечения правильного электрического соединения между компонентами.
- Площадки для монтажа и отверстия: Указывают места, где компоненты будут припаяны к плате.
- Слои диэлектрика и защитные покрытия: Защищают проводящие дорожки и обеспечивают изоляцию между слоями.
- Позиционные обозначения и маркировка: Помогают идентифицировать компоненты и их расположение на плате.

Эти чертежи должны быть выполнены с высокой степенью точности, так как любая ошибка может привести к неправильной работе или полному отказу устройства. Они также используются для создания программ для автоматического монтажа компонентов и контроля качества на производстве. Выполним чертежи платы в программе компас - учебная версия.

Часть подготовленного рабочего чертёжа печатной платы Э0 представлен на рисунке 37.

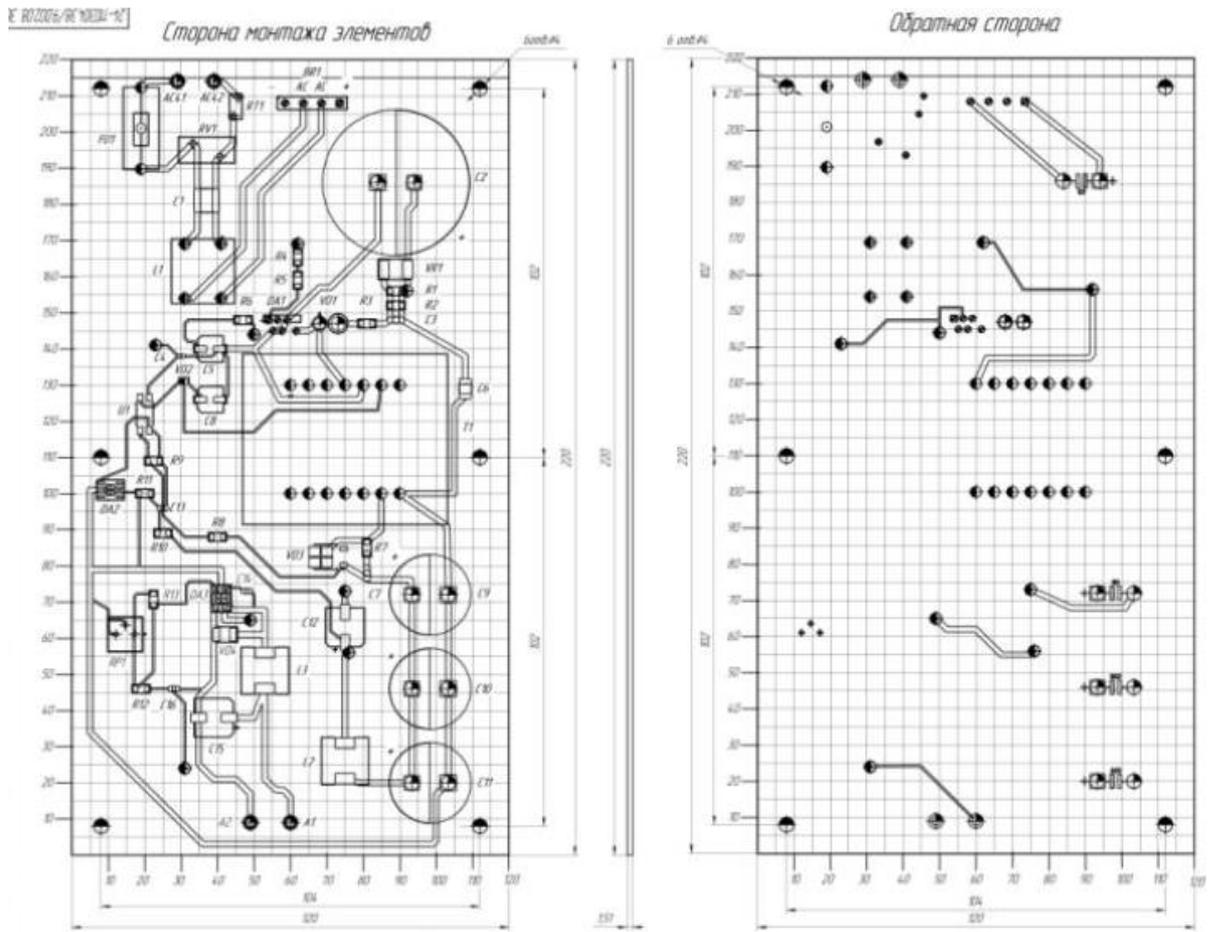


Рисунок 37 — Чертёж печатной платы Э0

Часть подготовленного сборочного чертежа с расположением элементов печатной платы представлен на рисунке 38.

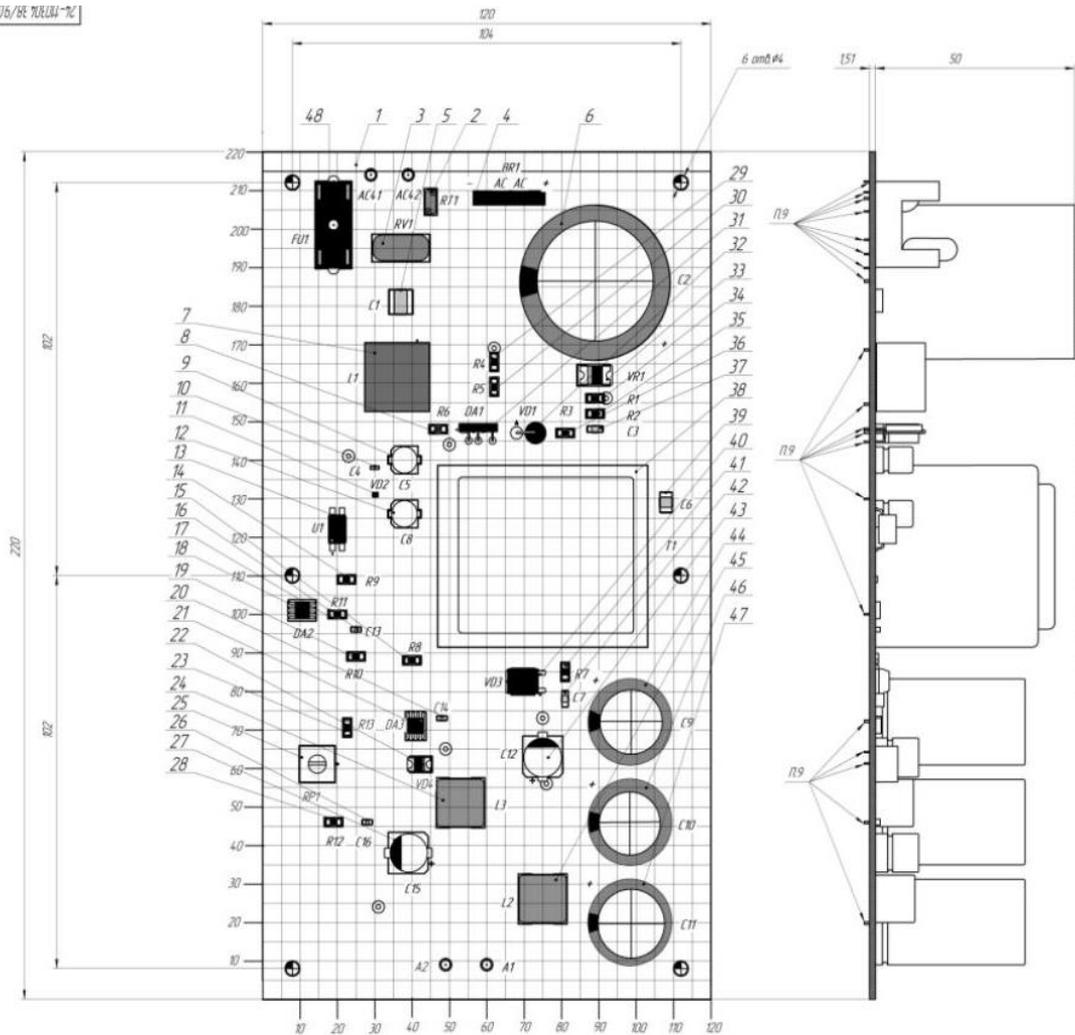


Рисунок 38 — Монтажный чертёж печатной платы

На сборочном чертеже дан шаг сетки 5 мм через одну позицию. Габаритные размеры платы даны по наиболее выступающим частям. Длина платы равна 220 мм, ширина платы 120 мм. Высота платы по самому высокому компоненту, конденсатору С2, 50 мм. 4. Монтаж элементов выполнить согласно принципиальной схеме ЭЗ, посадочные места элементов указаны в перечне ПЭ1. Отверстия на плате АС41 и АС42 место пайки провода входящий линии 220 В для вилки ХР1 - используем стандартную цельнолитую штепсельную вилку без заземления. Отверстия на плате А1 и А2 место припайки провода выхода блока питания. А1 плюс источника питания, А2 минус источника питания. Припаивается провод со штекером DC 5.5 мм x 2.5мм. Плата устанавливается в корпус и крепится к стойкам

через 6 крепёжных отверстий. Выполнит пайку элементов поверхностного монтажа пастой ППК-63-3-89А ГОСТ Р 59681 - 2021[10] согласно ГОСТ Р мэк 61192- 2-2010[9]. Выполнит пайку штыревых соединений элементов припоем ПОС-61 ГОСТ Р 59681 -2021[10] согласно ГОСТ Р мэк 61192- 3-2010 [9].

В процессе работы над проектом печатной платы был проведён тщательный анализ и расчёты, начиная с определения площади компонентов и заканчивая выбором материала и программы для проектирования - KiCad. Были учтены все необходимые параметры, включая монтажные размеры компонентов, размеры монтажных отверстий и общую площадь платы. При выборе материала платы был сделан выбор в пользу фольгированного стеклотекстолита FR4 TG 135. Расчёты минимальной ширины проводников позволили определить оптимальные параметры трассировки, учитывая максимальный ток и плотность тока.

Использование KiCad дало возможность эффективно спроектировать плату, воспользовавшись всеми необходимыми инструментами, от редактора схем до 3D-просмотра. Все компоненты платы корректно размещены и трассировка выполнена без ошибок, что подтверждается проверкой правил проектирования. Подготовленный рабочий и сборочный чертеж содержат необходимую информацию для изготовления платы и монтажа компонентов.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы было разработано устройство источника питания, которое обеспечивает стабильное выходное напряжение в широком диапазоне от 1.5 до 30 В и с максимальным током в 5 А. Это достигается за счет использования обратного преобразователя и импульсного понижающего преобразователя, что позволяет точно регулировать напряжение в зависимости от потребностей подключённой нагрузки используя переменный резистор.

В первой главе был проведён анализ технических характеристик и выбраны оптимальные схемотехнические решения для линейных и импульсных источников энергии. Были рассмотрены различные методы стабилизации выходного напряжения, что привело к выбору контроллера обратного преобразователя TOP261EN и DC-DC преобразователя TPS5450DDAR в качестве основы для структурной схемы.

Вторая глава была посвящена разработке принципиальной схемы с использованием программы Pspice и документаций по микросхемам. Результаты моделирования были подтверждены расчётами, и были подобраны компоненты для схемы. Также был составлен перечень элементов, составлена принципиальная схема устройства и проведён анализ переходных процессов с помощью программы TINA-TI 9.

Третья глава посвящена проектированию печатной платы. Был проведён тщательный анализ и расчёты, начиная с определения площади компонентов и заканчивая выбором материала и программы для проектирования - KiCad. Были учтены все необходимые параметры, включая монтажные размеры, расположение элементов и дорожек. В результате выполнения главы была выполнена трассировка печатной платы и изготовлены чертежи для её воспроизводства.

Использование программного обеспечения было ключевым моментом при выполнении работы. Pspice помог в разработке схемы, TINA-TI 9 использовалась для анализа переходных процессов, а KiCad был неоценим при проектировании печатной платы. Так же оформление чертежей выполнялось в программной среде Компас - учебная версия.

В целом, все задачи обозначенные в техническом задании были выполнены в полном объёме, устройство получилось эффективным и универсальным для питания широкого круга приборов работающих на постоянном токе, а так же безопасным для использования благодаря гальванической развязке схемы обратноходового преобразователя.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Алфавит силовой электроники. Расчёт обратноходового преобразователя. [Электронный ресурс] URL:<https://fresh-web-studio.github.io/artemsdobnikov/math/flyback.html#17>(Дата обращения 01.04.2024)
2. Браун М. Б87 Источники питания. Расчет и конструирование.: Пер. с англ. - К.: "МК-Пресс", 2007. - 288 с., ил. ISBN 966-8806-01-8 (рус.)
3. Б. С. Сергеев, Расчет импульсного источника вторичного электропитания : учеб,- метод. пособие по курсовому проектированию
4. Выбор топологии преобразователя [Статья] URL:<https://russianelectronics.ru/vybor-topologii-preobrazovatelya/>(Дата обращения 01.04.2024)
5. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 3-е изд. стер. / М. : Додэка-XXI, 2011. — 528 с. : ил. — (Серия «Схемотехника»). — ISBN 978-5-94120-254-6.
6. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. Учебное пособие. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2016. — 448 с. (Серия — «Библиотека инженера») ISBN 978-5-91359-025-1
7. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции[Электронныйресурс]URL:<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293824/4293824336.pdf> (Дата обращения 17.04.2024)
8. ГОСТ Р 55693— 2013 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ ЖЕСТКИЕ Технические требования [Электронный ресурс] URL: <https://ao-kvartz.ru/wp-content/uploads/2021/08/GOST-R-55693-2013.pdf>(Дата обращения 11.04.2024)
9. ГОСТ Р мэк 61192- 2-2010 ПЕЧАТНЫЕ УЗЛЫ. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ URL:https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2018/10/25/gost_r_m_k_61192-2-2010.pdf (Дата обращения 12.04.2024)
10. ГОСТ Р 59681 - 2021 Сборка и монтаж электронных модулей ПРИПОИ, ФЛЮСЫ ДЛЯ ПАЙКИ, ПРИПОЙНЫЕ ПАСТЫ [Электронный ресурс] URL:<https://files.stroyinf.ru/Data/763/76342.pdf> (Дата обращения 12.04.2024)

11. Проектирование электронных устройств. Аналитический расчёт размера печатной платы [Электронный ресурс] URL:<http://m-elek.h1n.ru/edo/edo-peu/calculation-pcb.html>(Дата обращения 15.04.2024)
12. Ресурс о блоках питания [Электронный ресурс] URL:<https://www.rot.r.info/electronics/practical/network/power/index.htm#pls>(Дата обращения 19.04.2024)
13. Руководство по программе Pi expert [Электронный ресурс] URL:<https://piexpertonline.power.com/help/piexpert/ru/index.htm#topics/introduction.htm>(Дата обращения 01.04.2024)
14. Расширенный справочник инженера - конструктора Резонит
15. Расчёт элементов печатного монтажа [Электронный ресурс] URL:<https://printedboards.ru/pcbcalculation>(Дата обращения 20.04.2024)
16. Сердечник трансформатора ETD 34/17/11 Core and accessories [Электронный ресурс] URL:https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1713889452&tld=ru&lang=en&name=etd_34_17_11.pdf&text=ETD34%2F17%2F11-3F3&url=https%3A%2F%2Fwww.tdk-electronics.tdk.com%2Finf%2F80%2Fdb%2Ffer%2Fetd_34_17_11.pdf&lr=10871&mime=pdf&lon=ru&sign=55a3efec8ef750ff727653c564fe2(Дата обращения 20.04.2024)
17. ТТП400 (25В, 14А), Трансформатор тороидальный, 25В, 14А [Электронный ресурс] URL:<https://www.chipdip.ru/product/ttp400-25v>(Дата обращения 20.04.2024)
18. Electronic Component Search Engine [Электронный ресурс] URL:<https://componentsearchengine.com/>(Дата обращения 20.04.2024)
19. AN-43 - TOPSwitch-HX Design Guide [Электронный ресурс] URL:<https://www.power.com/design-support/application-notes/an-43-topswitch-hx-design-guide>(Дата обращения 24.04.2024)
20. Datasheet LM338 [Электронный ресурс] URL:<https://static.chipdip.ru/lib/173/DOC013173219.pdf>(Дата обращения 24.04.2024)

21. Datasheet TOP261EN [Электронный ресурс] URL:<https://static.chipdip.ru/lib/911/DOC012911571.pdf>(Дата обращения 24.04.2024)
22. Datasheet FSCQ1565RTYDTU [Электронный ресурс] URL:<https://static.chipdip.ru/lib/422/DOC004422677.pdf>(Дата обращения 24.04.2024)
23. Datasheet STR-W6756 [Электронный ресурс]URL:<https://static.chipdip.ru/lib/046/DOC003046758.pdf>(Дата обращения 27.04.2024)
24. Datasheet TPS5450DDAR [Электронный ресурс]URL: <https://static.chipdip.ru/lib/928/DOC012928978.pdf>(Дата обращения 27.04.2024)
25. Datasheet TL431ACDR [Электронный ресурс]URL:<https://static.chipdip.ru/lib/627/DOC012627011.pdf>(Дата обращения 28.04.2024)
26. Datasheet FOD817A3SD [Электронный ресурс] URL:<https://static.chipdip.ru/lib/142/DOC011142131.pdf>(Дата обращения 28.04.2024)
27. Datasheet SPM5020T-3R3M-LR[Электронный ресурс] URL:<https://static.chipdip.ru/lib/140/DOC012140291.pdf>(Дата обращения 28.04.2024)
28. Datasheet FFD10UP20S[Электронный ресурс] URL:<https://www.promelec.ru/fs/sources/d8/c9/23/30/9d5fd287de47387bae1d530e.pdf>(Дата обращения 29.04.2024)
29. Datasheet RGP25M-E3/54[Электронный ресурс] URL:<https://static.chipdip.ru/lib/320/DOC012320351.pdf>(Дата обращения 30.04.2024)
30. Datasheet P6SMB130CA-E3/52[Электронный ресурс] URL:<https://cdn.zener.ru/media/PDF/1545290.pdf>(Дата обращения 29.04.2024)
31. Datasheet GBU4J-VP[Электронный ресурс] URL:<https://static.chipdip.ru/lib/704/DOC011704182.pdf>(Дата обращения 29.04.2024)

Приложение А

Спецификация на блок на микросхеме TOP261EN

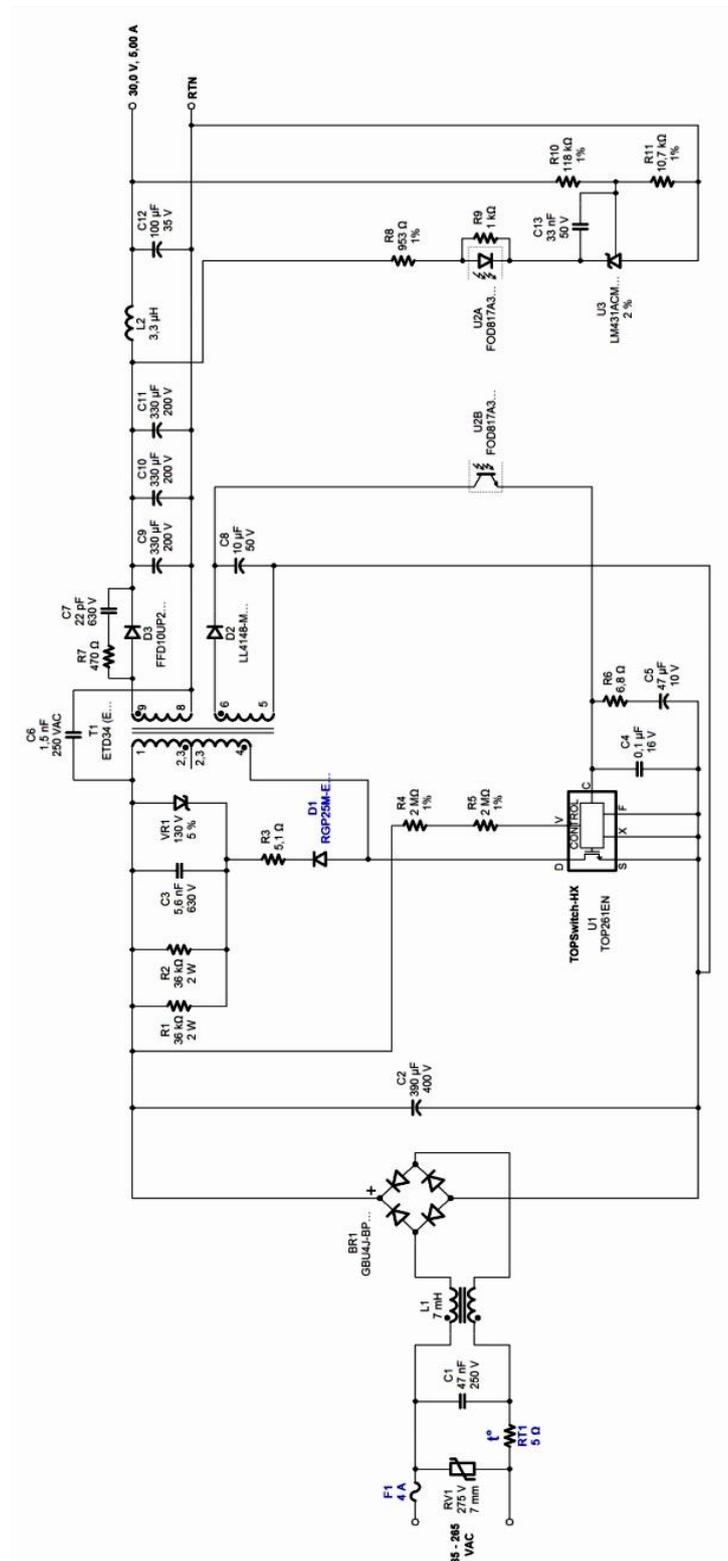


Рисунок А.1 — Схема подготовленная в Pi expert

Таблица А.1 - Параметры спроектированного в программе рi expert обратного преобразователя на микросхеме TOP261EN

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
VACMIN	85	V	Минимальное входное переменное напряжение
VACMAX	265	V	Максимальное входное переменное напряжение
FL	50	Hz	Частота питающей сети
TC	2,69	ms	Время проводимости входного выпрямителя
Z	0,63		Кэффициент потерь
η	78,0	%	Расчетная эффективность (цель)
VMIN	85,1	V	Минимальное постоянное входное напряжение
VMAX	374,8	V	Максимальное постоянное входное напряжение

Входной каскад

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
Fuse	4,00	A	Номинальный ток входного предохранителя (Изменено пользователем)
I _{AVG}	2,26	A	Средний ток через диодный мост (входной ток)
Thermistor	5,00	Ω	Входной термистор (Изменено пользователем)
MOV_VRATED	275	V	Номинальное напряжение металл-оксидного варистора

Параметры микросхемы

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
Микросхема	TOP261EN		Название микросхемы PI
BVDSS	700	V	Напряжение пробоя сток-исток
Current Limit Mode	По умолчанию		Режим ограничения тока микросхемы
OVP_FLAG	Выкл.		Включена защита от перенапряжения по выходу (Изменено пользователем)
P _O	150,09	W	Общая выходная мощность
V _{DRAIN Estimated}	582,81	V	Расчетное напряжения стока
V _{DS}	12,15	V	Открывающее напряжение сток-исток
FS	132000	Hz	Рабочая частота преобразования
K _P	0,839		Непрерывный/Прерывистый коэффициент использования (При V _{MIN} и полной нагрузке)
D _{MAX}	0,590		Максимальный рабочий цикл (при V _{MIN} и полной нагрузке)
K _I	1,00		Кэффициент ограничения тока
I _{LIMITTEXT}	6,88	A	Запрограммированное ограничение тока
I _{LIMITMIN}	6,882	A	Нижний порог ограничения тока
I _{LIMITMAX}	7,918	A	Верхний порог ограничения тока
PLIM_FLAG	Выкл.		Разрешить ограничение по мощности (Изменено пользователем)

Продолжение таблицы А1

IP	6,602	A	Пиковый ток первичной обмотки (При VMIN и полной нагрузке)
IRMS	3,190	A	Среднеквадратический ток в первичной обмотке (При VMIN и полной нагрузке)
RTH_DEVICE	3,49	°C/W	Максимальное термическое сопротивление для микросхемы PI
DEV_HSINK_TYPE	Прессованный алюминий		Тип радиатора микросхемы PI
DEV_HSINK_PN	6400B-P2G		Шифр радиатора микросхемы PI

Цель ограничителя уровня

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
Clamp Type	RCD + стабилитрон		Тип цепи ограничения выброса на первичной обмотке
VCLAMP	102,98	V	Среднее фиксированное напряжение смещения
Ожидаемые потери в ограничителе уровня	2,405	W	Полные потери мощности ограничителя
VC_MARGIN	120,16	V	Предел безопасности фиксатора по напряжению

Параметры первичного смещения

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
VB	15,0	V	Напряжение смещения
IB	0,006	A	Ток смещения
PIVB	82	V	Максимальное пиковое обратное напряжения выпрямителя обмотки смещения
NB	3		Количество витков первичной обмотки смещения

Параметры конструкции трансформатора

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
Тип сердечника	ETD34 (ETD34/17/11-3F3)		Тип сердечника
Материал сердечника	3F3		Материал сердечника
Первичные выводы	6		Число задействованных выводов с первичной стороны катушки
Вторичные выводы	2		Число задействованных выводов со вторичной стороны катушки
USE_SHIELDS	Выкл.		Использовать экранные обмотки
LP_nom	67	μH	Номинальная первичная индуктивность
LP_Tol	10,0	%	Точность индуктивности первичной обмотки
NP	16,9		Расчетное число витков первичной обмотки
NSM	5		Число витков "главной" вторичной обмотки
Плотность первичного тока	3,33	A/mm ²	Плотность тока в первичной обмотке
VOR	105,07	V	Напряжение обратного хода
BW	20,90	mm	Ширина обмоток катушки
FF	54,91	%	Фактический коэффициент заполнения трансформатора. 100% означает, что все окно под обмотку заполнено

Продолжение таблицы А1

AE	97,10	mm ²	Площадь поперечного сечения сердечника
ALG	213	nH/T ²	Эффективная индукция сердечника с зазором
BM	244	mT	Максимальная магнитная индукция
BP	293	mT	Пиковая магнитная индукция
BAC	103	mT	Магнитная индукция потерь в сердечнике
LG	0,524	mm	Расчетная величина немагнитного зазора
L_LKG	1,01	μH	Расчетная индукция рассеяния первичной обмотки
LSEC	20	nH	Индуктивность проводников вторичной обмотки

Первичная обмотка, секция 1

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
NP1	9		Количество витков первичной обмотки в первой секции первичной обмотки
L	0,98		Первичная обмотка - число слоев
DC Copper Loss	0,11	W	Потери в 1-й секции первичной обмотки

Первичная обмотка, секция 2

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
NP2	8		Округленное до целого число витков второй секции первичной обмотки
L2	0,87		Число слоев во второй секции первичной обмотки

Выход 1

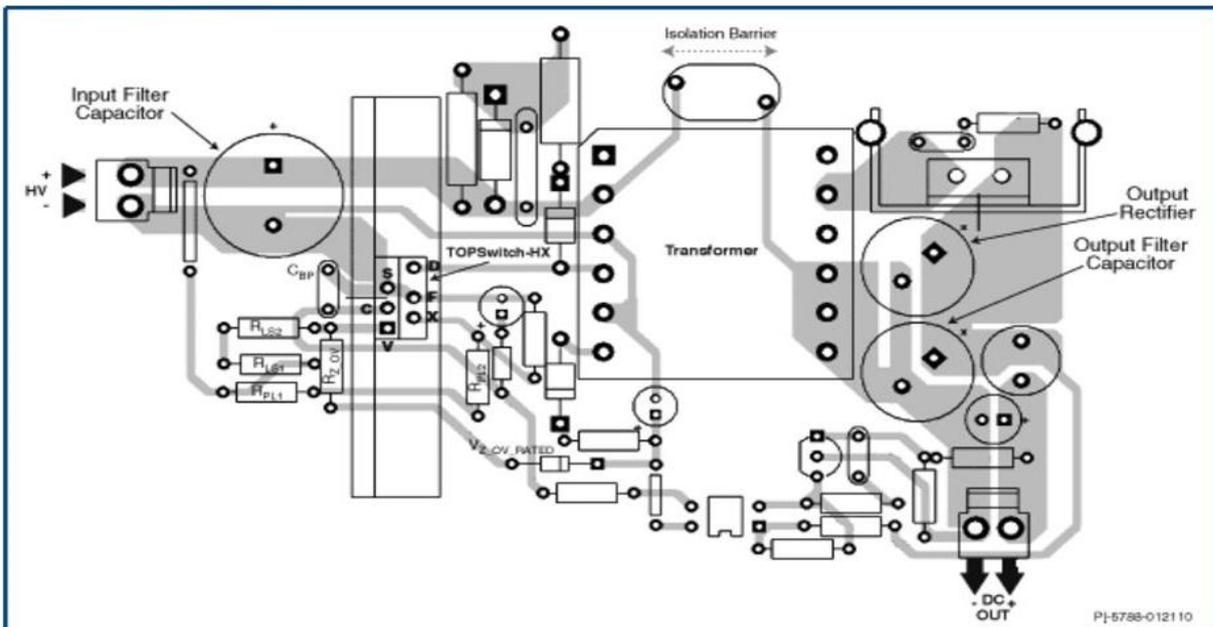
Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
VO	30,00	V	Стандартное выходное напряжение
IO	5,00	A	Выходной ток
VOUT_ACTUAL	30,00	V	Фактическое выходное напряжение
NS	5		Число витков вторичной обмотки
L_S_OUT	5,00		Число слоев вторичной выходной обмотки
DC Copper Loss	0,10	W	Потери в меди вторичной обмотки
VD	1,15	V	Прямое падение на диоде выходной обмотки
VD	1,15	V	Прямое падение на диоде выходной обмотки
PIVS	140,23	V	Пиковое обратное напряжение на выходном выпрямителе
ISP	22,255	A	Пиковый ток вторичной обмотки
ISRMS	8,959	A	Среднеквадратический ток вторичной обмотки
ISRMS_WINDING	8,959	A	Среднеквадратичный ток вторичного смещения
CDS_FOIL	85,73	A/mm ²	Плотность тока вторичной обмотки

Продолжение таблицы А1

RTH_RECTIFIER	8,74	$^{\circ}C/W$	Максимальное тепловое сопротивление радиатора выходного выпрямителя
OR_HSINK_TYPE	Прессованный алюминий		Тип радиатора выходного выпрямителя
OR_HSINK_PN	7025BG		Шифр компонента радиатора (прессованный алюминий) выходного выпрямителя
CO	330 x 3	μF	Выходная емкость
IRIPPLE	7,434	A	Выходная емкость - среднеквадратичный ток пульсации
Expected Lifetime	85244	hr	Выходной конденсатор - ожидаемый срок службы

Цепь обратной связи

Переменная	Значение	Единицы измерения	Описание
DUAL_OUTPUT_FB_FLAG	Выкл.		Получает обратную связь с 2-ух выходов
SF_FLAG	Выкл.		Использовать цепь плавного выключения
TYPE_3CTRL_FLAG	Выкл.		Использовать цепь опережения фазы



Щелкните на значке Показать, чтобы выделить фрагмент печатной платы, относящийся к тексту рекомендации.

	Описание	Показать
1	Минимизируйте цепь, сформированную стоком, цепью рассеяния высоковольтного выброса и трансформатором	
2	Обмотка смещения и конденсатор смещения это силовые соединения и соответственно они выводятся на вывод SOURCE	
3	Площадки выводов V и X - минимизированы, элементы регулирования выходного напряжения (R1 & R2) и мощности (R3 & R4) расположены близко к устройству. Соединения V и X должны быть расположены далеко от "шумных" частей схемы (сток, цепь смещения, цепь рассеяния высоковольтного выброса)	
4	Расположите развязывающий конденсатор вывода CONTROL как можно ближе к выводам CONTROL и SOURCE	
5	Помехоподавляющий конденсатор типа Y присоединяется между выводами RTN и B+	
6	Минимизируйте цепь, сформированную вторичной обмоткой, выходным выпрямителем и выходным фильтрующим конденсатором	
7	Соединение Кельвина на выводы SOURCE: сигнальные и силовые токи идут раздельно	
8	Резисторы RLS или RPL должны быть подключены к конденсатору для предотвращения проникновения шумов переключения	

Рисунок А.2 - рекомендации по расположению элементов

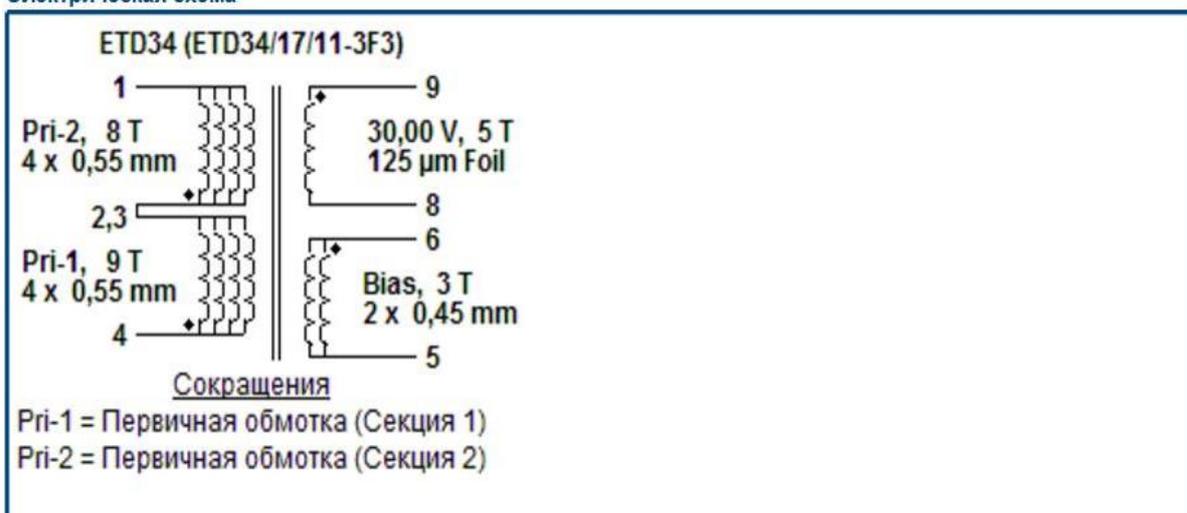
Таблица А.2 - Спецификация из Рі Expert

Спецификация

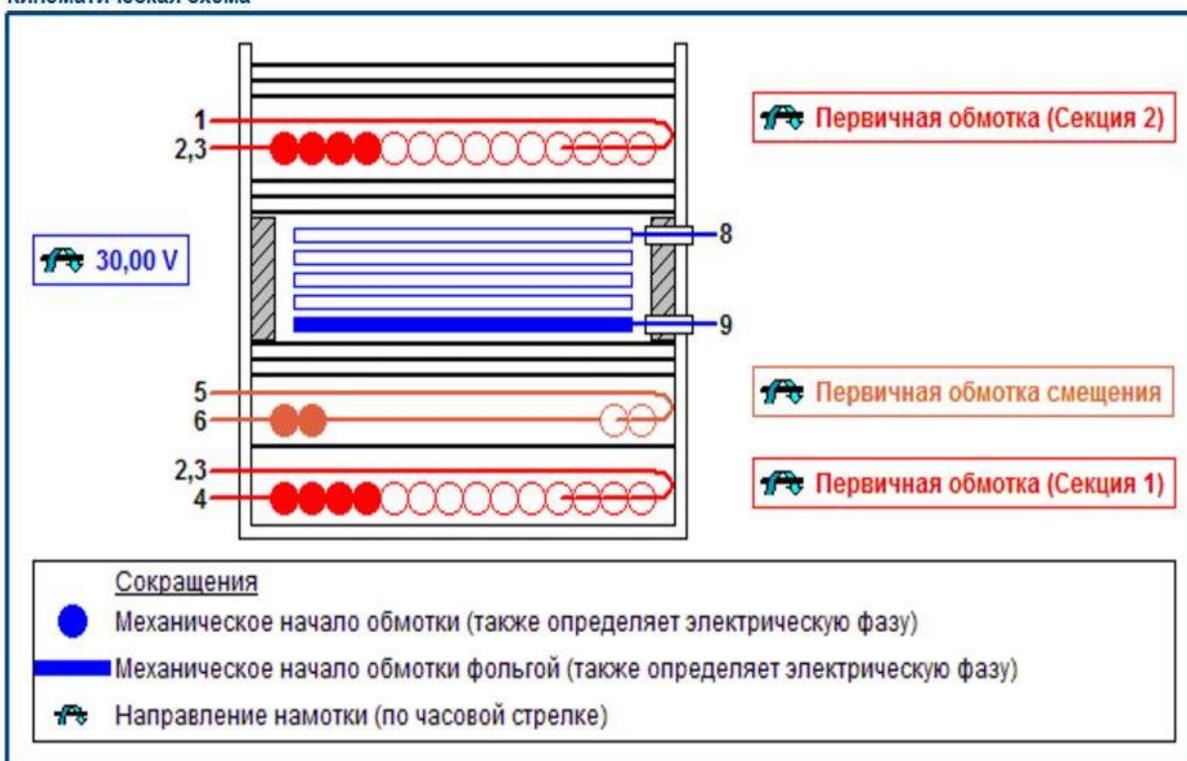
Номер п/п	Количество	Компонент	Значение	Описание	Изготовитель	Шифр компонента
1	1	BR1	GBU4J-BP	600 V, 4 A, Выпрямительный диодный мост, GBU	MCC	GBU4J-BP
2	1	C1	47 nF	47 nF, 250 V, Пленочный, Класс X	Murata	GA355ER7GB473KW01L
3	1	C2	390 µF	390 µF, 400 V, Высоковольтный электролитический, (50 mm x 25,4 mm)	United Chemi-Con	EKM401VSN391MQ50S
4	1	C3	5,6 nF	5,6 nF, 630 V, Высоковольтный керамический	TDK	CGA6L4C0G2J562J160AA
5	1	C4	0,1 µF	0,1 µF, 16 V, Керамический, X7R	AVX Corp	0603YC104K4T4A
6	1	C5	47 µF	47 µF, 10,0 V, Электролитический, Общ. Назначения, 1000 mΩ, (5,2 mm x 6,3 mm)	United Chemi-Con	EMVY100ADA470MF55G
7	1	C6	1,5 nF	1,5 nF, 250 VAC, Керамический, Класс Y	Murata	GA352QR7GF152KW01L
8	1	C7	22 pF	22 pF, 630 V, Высоковольтный керамический	Murata	GRM31A5C2J220JW01D
9	1	C8	10 µF	10 µF, 50 V, Электролитический, Общ. Назначения, 1000 mΩ, (6,1 mm x 6,3 mm)	Rubycon	50TRV10M6.3X6.1
10	3	C9, C10, C11	330 µF	330 µF, 200 V, Электролитический, Низкий ЭПС, 600 mΩ, (40 mm x 18 mm)	Panasonic	EEUEE2D331
11	1	C12	100 µF	100 µF, 35 V, Электролитический, Низкий ЭПС, 80 mΩ, (10,2 mm x 8 mm)	Panasonic	EEE-FP1V101AP
12	1	C13	33 nF	33 nF, 50 V, Керамический, X7R	Kemet	C0805C333K5RACTU
13	1	D1	RGP25M-E3/54	1000 V, 2,5 A, Быстроосстанавливающийся, 500 ns, DO-201AD	Vishay	RGP25M-E3/54
14	1	D2	LL4148-M-08	100 V, 0,15 A, Быстроосстанавливающийся, 8 ns, SOD-80	Vishay	LL4148-M-08
15	1	D3	FFD10UP20S	200 V, 10 A, Ультра быстроосстанавливающийся, 35 ns, D-PAK	ON Semiconductor	FFD10UP20S
16	1	F1	4 A	350 VAC, 4 A, Glass Cartridge, Инерционный	Bel Fuse Inc.	2JS 4-R
17	1	HS1	6400B-P2G	2,7 °C/W TO-220. Радиатор микросхемы PI U1.	Aavid	6400B-P2G
18	1	HS2	7025BG	6,8 °C/W TO-220. Радиатор диода D3.	Aavid	7025BG
19	1	L1	7 mH	7 mH, 3,5 A	Würth Elektronik	744834407
20	1	L2	3,3 µH	3,3 µH, 7,6 A	Bourns Inc.	PM5022-3R3M-RC
21	2	R1, R2	36 kΩ	36 kΩ, 5 %, 2 W, Металл-оксидно плёночный	Типовой	
22	1	R3	5,1 Ω	5,1 Ω, 5 %, 0,25 W, Толстоплёночный	Типовой	
23	2	R4, R5	2 MΩ	2 MΩ, 1 %, 0,25 W, Толстоплёночный	Типовой	
24	1	R6	6,8 Ω	6,8 Ω, 5 %, 0,125 W, Толстоплёночный	Типовой	
25	1	R7	470 Ω	470 Ω, 5 %, 0,25 W, Толстоплёночный	Типовой	
26	1	R8	953 Ω	953 Ω, 1 %, 0,125 W, Толстоплёночный	Типовой	
27	1	R9	1 kΩ	1 kΩ, 5 %, 0,125 W, Толстоплёночный	Типовой	
28	1	R10	118 kΩ	118 kΩ, 1 %, 0,125 W, Толстоплёночный	Типовой	
29	1	R11	10,7 kΩ	10,7 kΩ, 1 %, 0,125 W, Толстоплёночный	Типовой	
30	1	RT1	5 Ω	Термистор NTC 5 Ω, 4,7 A	Thermometrics	CL-150
31	1	RV1	V275LA4P	275 V, 23 J, 7 mm, RADIAL, MOV	Littelfuse	V275LA4P
32	1	T1	ETD34 (ETD34/17/11-3 F3)	3F3 Материал сердечника Refer to Manufacturer datasheet for a number of parts to purchase	Ferroxcube	ETD34/17/11-3F3
33	1	T1 Bobbin	ETD34/17/11 - 3 (P7-S7)	Bobbin Material : Polybutyleneterephthalate (PBT)	Ferroxcube	CPH-ETD34-1S-14P
34	1	T1 Core Acc.1	CLI-ETD34	Mounting clip . Stainless steel	Ferroxcube	CLI-ETD34
35	1	U1	TOP261EN	TOPSwitch-HX, TOP261EN, eSIP-7C	Power Integrations	TOP261EN
36	1	U2	FOD817A3SD	Оптрон FOD817A3SD , 70 V, CTR 80 - 160 %, 4-SMD	ON Semiconductor	FOD817A3SD
37	1	U3	LM431ACM/NOPB	2,495 V, Параллельный стабилизатор, 2 %, SOIC-8	Texas Instruments	LM431ACM/NOPB
38	1	VR1	P6SMB130CA-E3/52	130 V, 5 W, 5 %, DO-214AA, TVS	Vishay	P6SMB130CA-E3/52

Таблица А.3 - Рекомендации по изготовлению трансформатора.

Электрическая схема



Кинематическая схема



Инструкции по намотке

Первичная обмотка (Секция 1)

Начать с вывода(ов) 4 и намотать 9 витков (4 жильным проводом) [5], в 1 слое(ях) слева направо. Направление намотки - по часовой стрелке. При формировании последнего слоя распределить обмотку равномерно по всей ширине катушки. Завершить обмотку на выводе(ах) 2,3.

Добавить 1 слой пленки [3] для изоляции.

Первичная обмотка смещения

Начать с вывода(ов) 6 и намотать 3 витков (2 жильным проводом) [6]. Направление намотки - по часовой стрелке. Распределить обмотку равномерно по ширине катушки. Завершить обмотку на выводе(ах) 5.

Добавить 3 слоя пленки [3] для изоляции.

Вторичная обмотка

Продолжение таблицы А.3

Использовать 3 мм зазор (элемент [8]) с левой стороны и 3 мм зазор с правой стороны. Используйте 3 слоя ленты для изоляции фольги с обеих сторон вокруг краев, которые вместе с зазорами в целом обеспечат 6,40 мм минимальный изоляционный промежуток до любой части первичной стороны.

Начать с вывода(ов) 9 и сделать 5 витка [7]. Направление намотки - по часовой стрелке. Завершить обмотку на выводе(ах) 8.

Добавить 3 слоя пленки [3] для изоляции.

Первичная обмотка (Секция 2)

Начать с вывода(ов) 2,3 и намотать 8 витков (4 жильным проводом) [5], в 1 слое(ях) слева направо. Направление намотки - по часовой стрелке. При формировании последнего слоя распределить обмотку равномерно по всей ширине катушки. Завершить обмотку на выводе(ах) 1.

Добавить 3 слоя пленки [3] для изоляции.

Сборка сердечника

Собрать и закрепить половинки сердечников [1].

Покрытие лаком

Покрыть [4] лаком равномерно. Не применять вакуумную пропитку.

Комментарии

1. Выводы 2 и 3 соединены друг с другом медной дорожкой на печатной плате.
2. Использование закороченного витка вокруг сердечника улучшит показатели ЭМИ.
3. В трансформаторах без защитного зазора для всех вторичных обмоток использовать провод с тройной изоляцией.
4. Длина оплетки должна соответствовать требованиям безопасности (минимум 6,40 мм)

Материалы

Элемент	Описание
[1]	Сердечник: ETD34 (ETD34/17/11-3F3), 3F3, с зазором для ALG - 213 нГн/Т².
[2]	Катушка: Generic, 7 pri. + 7 sec.
[3]	Барьерная пленка: Полиэстеровая лента [толщина 1 мил (25 мкм)] шириной 20,90 мм.
[4]	Лак.
[5]	Эмалированный провод: 0.55 mm, с двойной изоляцией.
[6]	Эмалированный провод: 0.45 mm, с двойной изоляцией.
[7]	Медная фольга: 125 μm толщина, 14,90 мм ширина, покрытая одним слоем экранирующей ленты. Выводы к фольге: 2 x 0.6 mm обмоточного провода в оплетке.
[8]	Лента: Полиэстеровая полоса шириной 3 мм.

Техническое описание проведения электрических испытаний

Параметр	Условие	Спецификация
Электрическая прочность, VAC	60 Гц 1 секунда, с выводов 1,2,3,4,5,6 на выводы 8,9.	3000
Номинальная первичная индуктивность, мкГн	Замерено при амплитуде 1 В на стандартной рабочей частоте, между выводами 1 и 4, при разомкнутых выводах остальных обмоток.	67
Допуск, ±%	Допуск индуктивности первичной обмотки	10,0
Индукция рассеяния первичной обмотки, мкГн	Замерено между выводами 1 и 4, при закороченных выводах остальных обмоток.	1,01

Приложение Б Описание функций микросхемы TOP261 EN

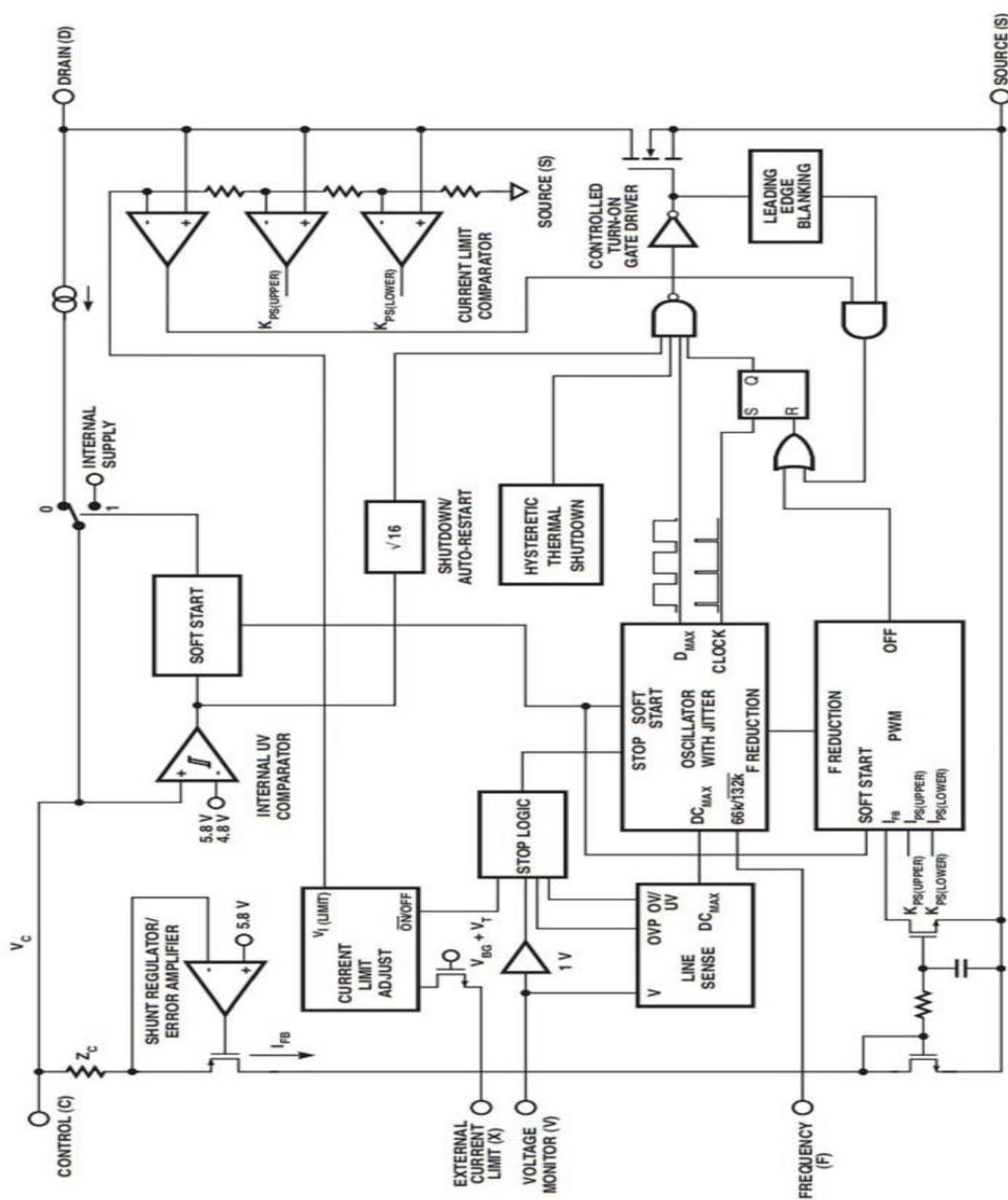


Рисунок Б.1 – Функциональная схема TOP261EN.

В контексте высоковольтных MOSFET-транзисторов, вывод D (Drain) служит каналом для стока тока и играет центральную роль в подаче энергии

на микросхему при её активации, благодаря встроенному источнику тока. Этот же вывод используется для подключения к цепи измерения тока.

Вывод С (Control) отвечает за передачу сигнала об ошибке в ШИМ-усилитель и активацию защитного триггера. К нему подсоединяется внешний конденсатор, который задействуется для функции автоматического перезапуска и коррекции сигнала.

Вывод F (Frequency) позволяет выбирать частоту преобразования, которая может быть установлена на 132 кГц при соединении с выводом S (Source) или 66 кГц при соединении с выводом C (Control).

Вывод S (Source) представляет собой исток тока для MOSFET-транзистора и является общим узлом для схемы управления и опорного напряжения.

Дополнительные контакты включают в себя:

Вывод X (External Current Limit), который используется для установки предела тока и дистанционного управления включением и выключением. Подключение этого вывода к источнику питания приведёт к деактивации всех функций.

Вывод V (Voltage Monitor) обеспечивает контроль за напряжением, включая защиту от его чрезмерного повышения или понижения, а также функции удалённого управления и сброса.

В начале работы электронной схемы, транзистор MOSFET остаётся в выключенном состоянии. Конденсатор, подсоединённый к управляющему выводу С, заряжается через регулируемый источник тока, соединяющий управляющий вывод С и сток D. Когда напряжение на выводе С достигает порогового значения в 5,8 Вольт, начинается процесс активации схемы,

который включает постепенное возрастание ширины управляющего импульса от минимального до максимального значения в течение приблизительно 17 миллисекунд. После этого периода, источник тока отключается, и управление схемой переходит к обратной связи.

Система управления поддерживает стабильное напряжение в 5,8 Вольт, регулируя ток через вывод С для обеспечения энергией микросхемы. Динамическое сопротивление на выводе С взаимодействует с внешними резистором и конденсатором, формируя частотную коррекцию обратной связи схемы. ШИМ-модулятор контролирует напряжение, изменяя ширину управляющего импульса для транзистора MOSFET, что зависит от текущего значения напряжения на выводе С. Регулятор создаёт сигнал ошибки, который после отделения от основного тока проходит через RC-фильтр с частотой среза 7 кГц, снижая уровень шума. ШИМ-модулятор генерирует управляющий сигнал, сравнивая отфильтрованный сигнал ошибки с эталонным пилообразным напряжением. Транзистор MOSFET открывается и закрывается в ответ на сигналы от генератора и ШИМ-модулятора. Минимальная ширина импульса модулятора составляет 1,5%, что гарантирует стабильное потребление тока.

Если напряжение на выводе С падает ниже 4,8 Вольт, схема переходит в режим ожидания, отключая транзистор MOSFET, и начинается новый цикл зарядки конденсатора. Как только напряжение снова достигает 5,8 Вольт, схема возобновляет работу, и транзистор MOSFET вновь включается.

Автоматический перезапуск играет ключевую роль в обеспечении стабильности устройства. Используя компаратор с гистерезисом, он поддерживает напряжение V_c в пределах от 4,8 до 5,8 Вольт, переключая источник тока в зависимости от нужд схемы. Встроенный таймер блокирует активацию транзистора MOSFET на время 16 циклов разрядки конденсатора, снижая частоту импульсов до 4% и уменьшая тепловые потери. Процесс

повторяется, пока схема не восстановит нормальную работу.

Приложение В Описание функций микросхемы TPS5450

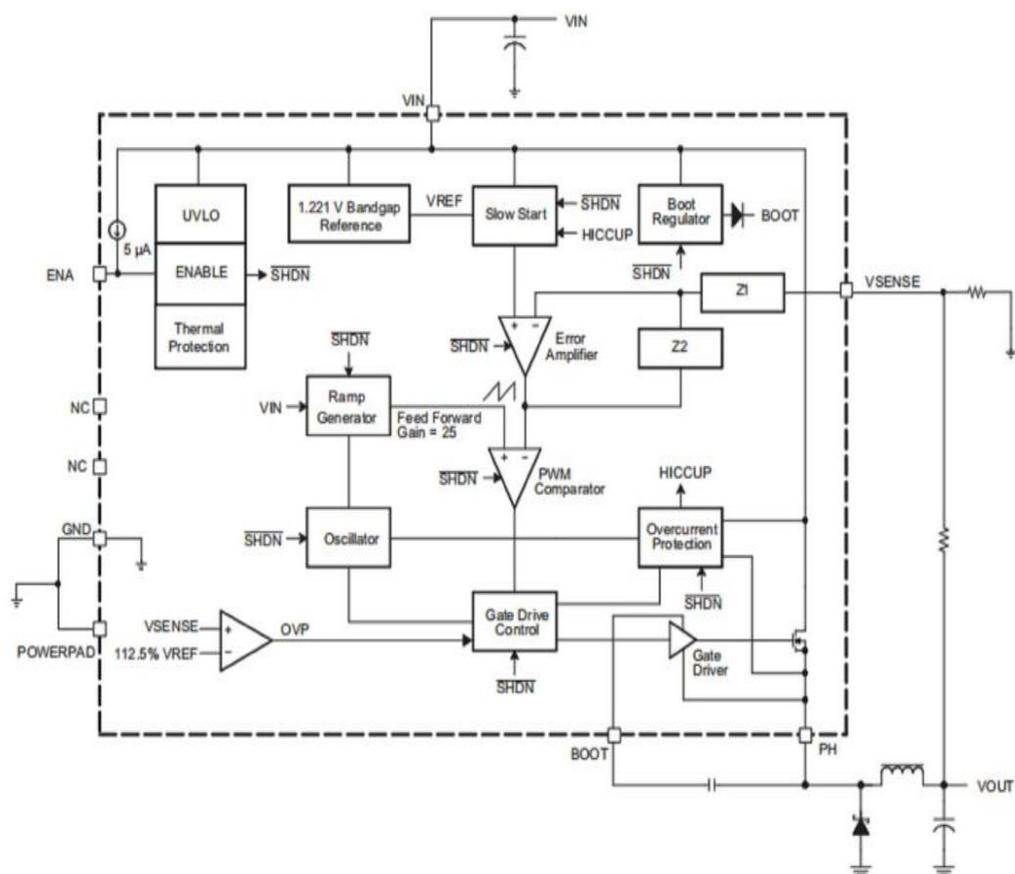


Рисунок В.1 — Функциональная схема TPS5450.

VIN (входное напряжение) - Подключается к источнику входного напряжения.

GND (земля) - Общий заземляющий вывод.

BOOT (загрузка) - Подключается к конденсатору, который обеспечивает дополнительное напряжение для затвора МОП-транзистора.

PH (фаза) - Соединён с узлом дросселя и диода, отражает фазу переключения.

ENA (включение) - Вывод управления включением, может быть

подключён к логическому сигналу для управления работой микросхемы.

VSENSE (регулировка напряжение) - Измеряет выходное напряжение для обратной связи.

VOUT (выходное напряжение) - Вывод выходного напряжения, к которому подключаются нагрузка и выходные фильтрующие конденсаторы.

Функция плавного старта (SS/TR): Управляет скоростью нарастания выходного напряжения при включении, чтобы минимизировать пусковые токи.

Защита от перегрузки (OCP) и термическая защита (TSD): Предотвращают повреждение микросхемы при чрезмерном токе или перегреве.

Блок управления (COMP, FB, EN): Регулирует работу преобразователя, включая включение/выключение и стабилизацию выходного напряжения.

Приложение Г Рисунки анализа из программы Tina-Ti 9

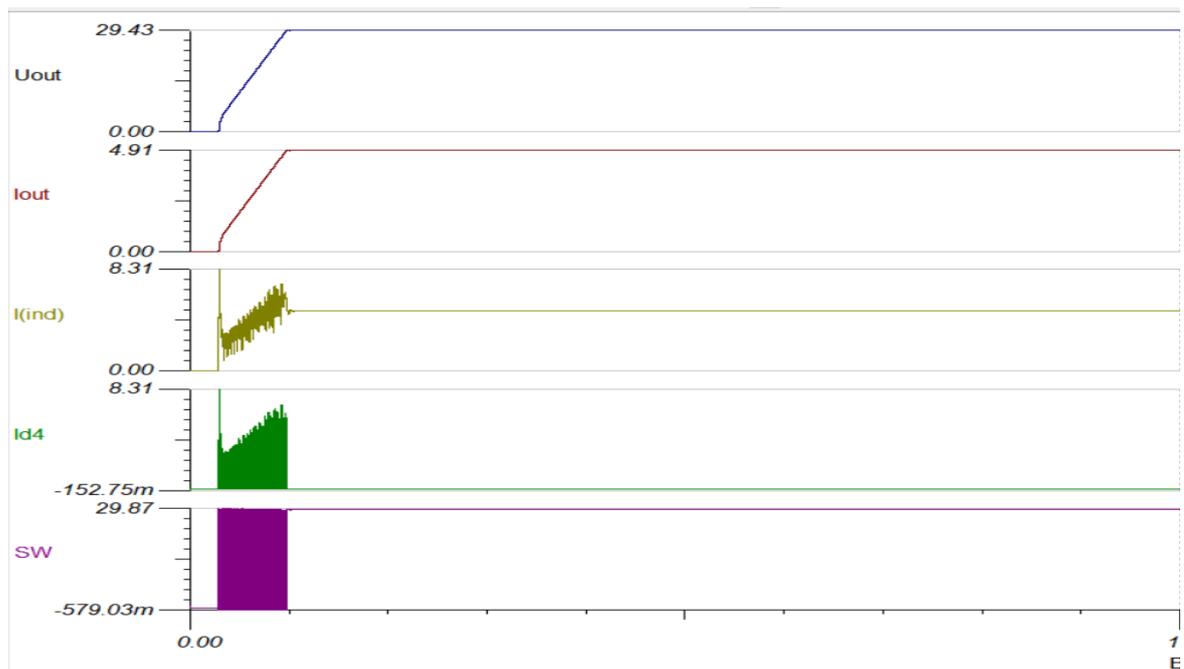


Рисунок Г.1 — Значение графиков при $V_{in} = 30$ В, $R_{T1} = 200$ Ом и $R_{load} = 6$ Ом.

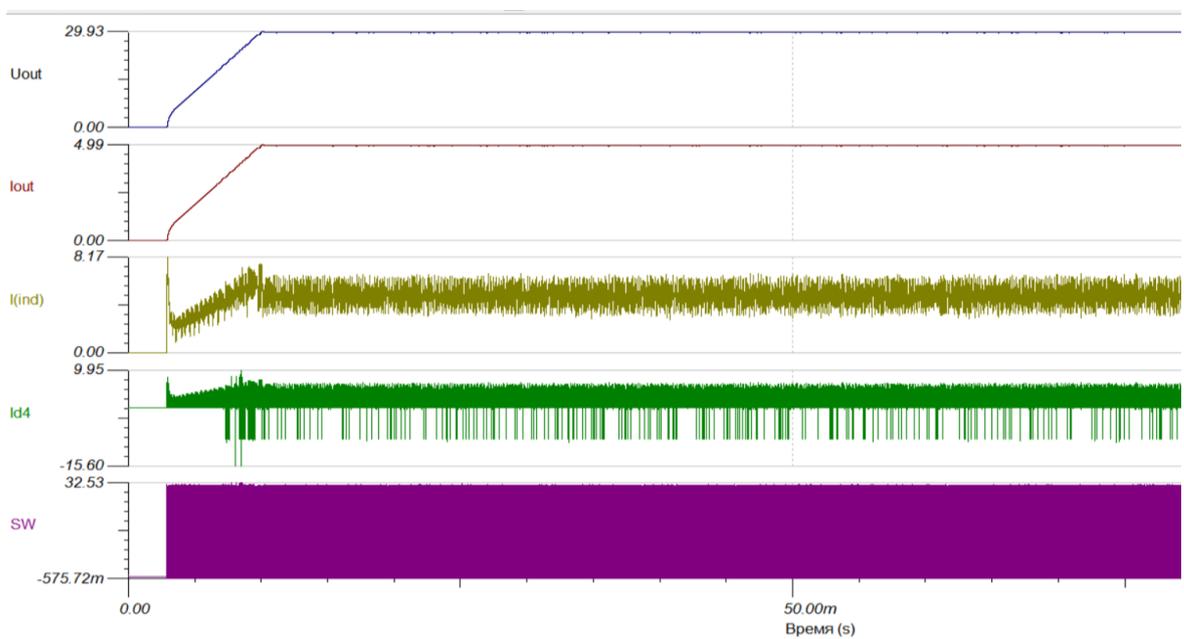


Рисунок Г.2 — Значение графиков при $V_{in} = 32$ В, $R_{T1} = 430$ Ом и $R_{load} = 6$ Ом.

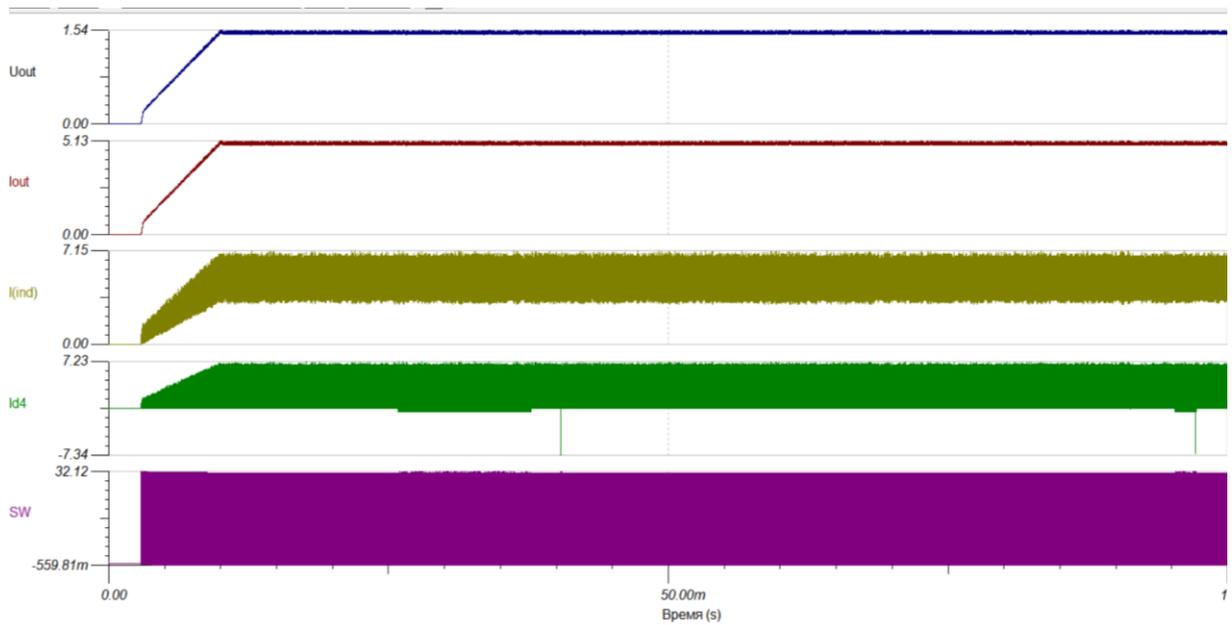


Рисунок Г.3 — Значение графиков при $V_{in} = 32$ В, $R_{T1} = 43571$ Ом и $R_{load} = 0.3$ Ом.

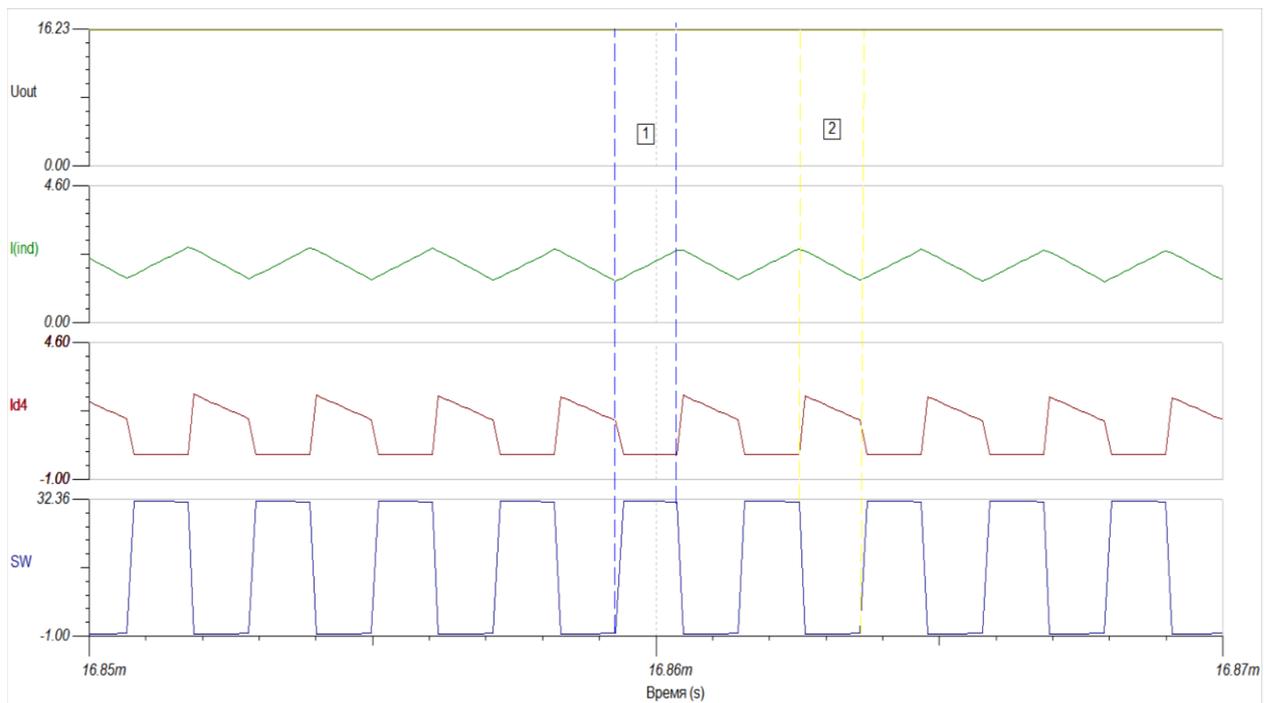


Рисунок Г.4 — Значение графиков при $V_{in} = 32$ В, $R_{T1} = 820$ Ом и $R_{load} = 8$ Ом.

Приложение Д Расчёт размеров платы

Для того что бы рассчитать размеры платы необходимо высчитать её площадь, а что бы высчитать ее площадь на начальном этапе требуется подсчитать площади всех компонентов которые будут размещаться на плате, а так же подсчитать площадь монтажных отверстий для крепления платы к корпусу[11]. Для удобства подсчёта площади компонентов составим таблицу Д.1.

Таблица Д.1 — Расчёт площади компонентов.

Наименование	Монтажные размеры, мм	Установочная площадь, мм ²	Кол-во	Общая площадь, мм ²
SMD R1..R12	1*0.5*0.35	0.65	12	7.8
Мост BR1	18.8*22.3	544	1	544
C1	5.7 * 5 * 2.5	37	1	37
C2	50 * 25,4	2551	1	2551
C3,C7	3.2*2.5*1.7	10.4	2	21
C4	1.6*0.8*0.9	1.6	1	2
C5,C8	6,1*6,3*4	50	2	100
C6	5.6*6.3*2	46	1	46
C7	3.2*1.6*1.5	6.7	1	7
C9,C10,C11	40*18	1633	3	4900
C12,C15	10.2*8*4	107	2	214
C13,C14,C16	2.0*1.25*1.3	4	3	12
D1	9.5 * 5.3 * 5.3	65	1	65
D2	3.7*2.4*2	12	1	12
D3	10.4*6.35*3	86	1	86
D4,VR1	6.22*6.11*2.5	50	2	100
L1	28*32*22	1164	1	1164
L2,L3	12*12*8	188	2	375
FU1	20*15*20	390	1	390
RT1,RV2	8.33*4.57*13	50	2	100
T1	39.6*41.8*33. 1	2152	1	2152
DA1	10.24*2.06*7. 3	28	1	28

DA2	7*5.1*3	7	1	7
U1	3,04*2,64*3	10	1	10
DA3	5,57*6*3	44	1	44
			Итого	12980

Рассчитываем установочные площади каждого из элементов схемы по формуле для прямоугольных элементов:

$$S_{уст.эл.прям.} = 1,3LB, \text{ где} \quad (1)$$

L - Длина, мм

M - ширина, мм

Рассчитываем установочные площади каждого из элементов схемы по формуле для круглых элементов :

$$S_{уст.эл.круг.} = 1.3*n*d^2 / 4(2)$$

Для произведения дальнейших расчётов необходимо рассчитать площадь монтажных отверстий платы $S_{кр}$ для ее крепления к корпусу. Будем крепить плату винтами М3 диаметр винта равен 3 мм в количестве 6 штук. Диаметр отверстий на плате выберем с запасом и сделаем равным 4 мм.

$$S_{кр} = 6*4*4 = 100 \text{ мм}^2 \quad (3)$$

Расчитаем площадь поверхности платы $S_{пп}$ используя следующую формулу:

$$S_{пп} = (S_{кр} + S_{оо}) * K_{и}, \text{ где} \quad (4)$$

Собщ.эл - сумма площади всех элементов таблице 7;

$K_{и}$ - коэффициент использования , выбирается $K_{и} = 2 \dots 3$.

$$S_{nn} = (100 + 12980) * 2 = 26000 \text{ мм}^2$$

Определим подбором длину L печатной платы и её ширину B.

Для этого сделаем ширину B равной 120 мм. Тогда длина L будет равна:

$$L = S_{nn}/B = 2600 \text{ мм}/120 \text{ мм} = 216 \text{ мм}. \quad (5)$$

В ГОСТ Р 53429-2009[7] прописано условие что шаг размера платы при длине до 350 мм должен быть кратным 5 мм. Тогда сделаем длину L = 220 мм.

После обновления значений платы рассчитаем повторно ее площадь:

$$S_{nn} = L * B = 120 \text{ мм} * 220 \text{ мм} = 26400 \text{ мм}^2 \quad (6)$$

Приложение Е Расчёт параметров платы и дорожек

Согласно ГОСТ Р 55693 — 2013[8] печатные платы подразделяются на 6 видов по основным конструктивным особенностям. Из за большого количества элементов и для облегчения трассировки будет использован Тип-2 печатная плата двусторонняя.

Согласно ГОСТ Р 53429-2009[7] печатные платы подразделяются на 7 видов по классу точности. Для выполнения проекта подходит класс точности 7.

Выполним расчёт минимальной ширины проводника для определения правил трассировки. Так же это даст возможность проверить материал какой толщины необходим для подбора оптимальных параметров дорожек печатной платы . Минимальная ширина определяется $b_{\text{мин}}$, мм:

$$b_{\text{мин}} = I_{\text{макс.}}/j_{\text{доп.}} * t \quad (1)$$

где $I_{\text{макс.}}$ – рассчитанный максимальный ток , А;

$j_{\text{доп}}$ – плотность тока, выбор зависит от метода изготовления ПП, А/мм² ;

t – толщина медного слоя дорожек, мм.

Согласно справочнику российского производителя [14] многослойных печатных плат их производство происходит с использованием методики сквозной металлизации. Используя ресурс [15] с таблицей методов изготовления и характерных параметров полученных печатных плат определим что $j_{\text{доп}}$ изготовленной платы методом сквозной металлизации равен от 60 до 100 А/мм².

$$b_{\text{мин}} = 5 \text{ A} / 60 \text{ A/мм}^2 * 0.035 = 2.38 \text{ мм.} \quad (2)$$

Значение ширины дорожки в 2.38 мм слишком большое, так как у микросхемы TPS5450 слишком близко расположены выводы и будет затруднительно выполнить подключение. Для решение этой проблемы увеличим толщину медного слоя до 0.070 мм.

$$b_{\min} = 5 \text{ A} / 60 \text{ A/мм}^2 * 0.070 = 1.19 \text{ мм.} \quad (3)$$

С запасом выберем ширину проводника для трассировки силовых линий равную 1.5 мм. Для трассировки сигнальных линий будем использовать ширину дорожек равную 0.5 мм.

Для создание печатной платы выберем матерьял фольгированный стеклотекстолит FR4 TG 135 толщиной 1.5 мм и толщиной печатных проводников 0.070 мм.