

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

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(институт)

Кафедра «Промышленная электроника»

(кафедра)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника

(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАРЯДА ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ

Студент(ка)

Е. А. Киселев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент М. В. Позднов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2017

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена разработке устройства заряда емкостного накопителя и состоит из пояснительной записки объемом 71 листов и графической части объемом 8 листов формата А1.

Целью работы является разработка устройства заряда емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) от автономного источника энергии путем исследования режимов заряда ЕНЭ и создания математической модели зарядного устройства (ЗУ).

Задачами являются разработка принципиальной схемы устройства для заряда емкостного накопителя энергии от автономного источника питания, конструкторский расчет, включая обоснованный выбор элементов устройства, моделирование работы устройства для проверки ее работоспособности.

В первом разделе рассматривается состояние вопроса и приводятся общие сведения об устройствах заряда, а также анализ разрабатываемой установки с выработкой структурного решения и задач на разработку.

Во втором разделе производится разработка зарядного устройства, выбор его элементов и моделирование режимов работы в системе Matlab/Simulink.

В третьем разделе конструкторско-технологические методы изготовления печатной платы и результат разработки печатной платы.

Содержание

АННОТАЦИЯ	2
СОДЕРЖАНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	6
1.1 Анализ известных решений зарядных устройств емкостных накопителей энергии и обоснование выбора структуры и блоков силовой части зарядных устройств емкостных накопителей.....	6
1.2 Анализ решений автономных источников энергии	9
1.3 Анализ схемных решений преобразователя постоянного тока в переменный	13
1.4 Анализ схемных решений схем повышения напряжения.....	20
1.5 Анализ схем получения постоянного напряжения.....	21
1.6 Выводы о структурных решениях в работе.....	23
2 РАСЧЕТНЫЙ РАЗДЕЛ	26
2.1 Анализ режимов заряда ЕНЭ.....	26
2.2 Оценочный расчет силовой части ЗУ.....	28
2.3.Выбор силовых элементов и коэффициента трансформации.....	30
2.4.Расчет радиатора VD,VT	34
2.5. Расчет дроссель-трансформатора.....	38
2.6 Разработка и расчет системы управления.....	44
2.7 Моделирование ЗУЕНЭ	52
3 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	70

Введение

Ряд технологий требует получения коротких по длительности и больших по мощности импульсов тока. Например, импульсные невзрывные сейсмоисточники, импульсные источники света, импульсные рентгеновские установки, устройства импульсной конденсаторной сварки, импульсные намагничивающие устройства, устройства накачки лазеров, электрогидравлические установки для обработки материалов.

Важное место в данных системах отводится емкостным накопителям энергии (ЕНЭ), так как процесс хранения электромагнитной энергии в электрическом поле осуществляется практически без потерь. Поскольку емкостной накопитель по мере заряда достаточно резко изменяет свои параметры: в начале заряда ведет себя как нагрузка, близкая к короткому замыканию, в конце как нагрузка, к холостому ходу, то зарядное устройство должно учитывать эти особенности. С учетом того, что в автономных системах источниками энергии являются аккумуляторные батареи (АКБ) с довольно низким напряжением (12-24 В), актуальной является проблема разработки высоковольтных систем заряда, необходимо также учитывать то, что АКБ являются источниками с ограниченной мощностью, в связи с этим к режиму заряда предъявляются особые требования по повышению коэффициента его использования.

Основные требования, предъявляемые к зарядным устройствам:

- обеспечение более равномерным потреблением энергии от источника постоянного напряжения, чем это обусловлено нагрузкой;
- обеспечение гальванической развязки нагрузки от источника питания;
- точность заряда емкостного накопителя до заданного напряжения;
- скорость заряда накопителя энергии;
- управляемость от системы управления;
- отключение емкостного накопителя энергии от системы энергоснабжения на время его разряда;

- высокий КПД;
- небольшие массогабаритные показатели;
- высокие показатели надежности.

1 Состояние вопроса

1.1 Анализ известных решений зарядных устройств емкостных накопителей энергии и обоснование выбора структуры и блоков силовой части зарядных устройств емкостных накопителей

При рассмотрении систем питания на импульсную нагрузку, в которых используются ЕНЭ и ЗУ к ним, была найдена наиболее подходящая структурная схема, представленная в [1,2] и изображенная на рисунке 1.1.

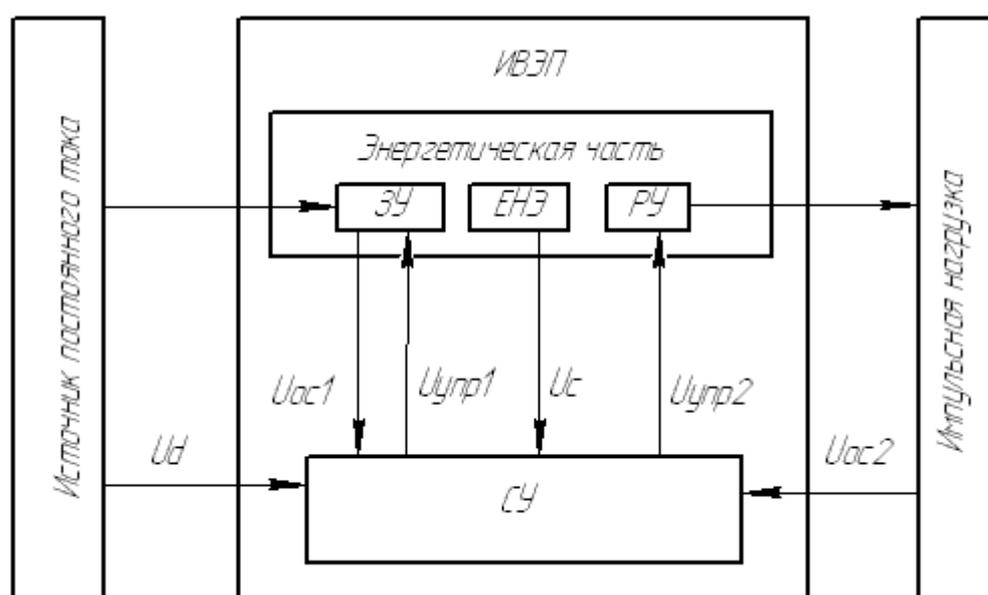


Рисунок 1.1 - Структурная схема системы электропитания импульсной нагрузки

Так как характеристики импульсной нагрузки и системы электроснабжения не согласованы, существует необходимость в создании источника вторичного электропитания (ИВЭП). В него входят энергетическая часть и система управления (СУ). В энергетическую часть входят три функциональные части: емкостный накопитель энергии, зарядное устройство, и разрядное устройство. Система управления обрабатывает сигналы, поступающие по четырем каналам входной информации (U_d , U_{oc1} , U_c , U_{oc2}) и формирует управляющие сигналы на входах двух блоков энергетической части – ЗУ и РУ. Первый входной канал несет

информацию о входном напряжении U_d . Сигнал U_{oc1} информирует о том, в каком состоянии на данный момент времени находится ЗУ. Сигнал U_c содержит информацию о количестве энергии, запасенной в емкостном накопителе, на данный момент времени для корректировки работы ЗУ. И сигнал U_{oc2} обеспечивает СУ информацией о состоянии нагрузки и предназначен для блокировки ЗУ на время разряда емкостного накопителя энергии. На основании полученной информации СУ формирует согласованные управляющие воздействия $U_{упр1}$ и $U_{упр2}$, определяющие все параметры зарядного процесса. Из структурной схемы видно, что основным элементом системы заряда емкостных накопителей энергии является зарядное устройство.

Наиболее распространенные ЗУЕНЭ с индуктивно-емкостными преобразователями и линейными токоограничивающими дросселями не в полной мере удовлетворяют этим требованиям, так как реализуют только закон зарядки с неизменным током ЕНЭ и имеют пониженный коэффициент использования источника напряжения. Рассматриваемые в работе ЗУЕНЭ с регулируемым инвертором наиболее полно удовлетворяют указанным требованиям, однако в теоретическом плане они являются наименее изученными, что не позволяет в полной мере реализовать их положительные качества - способность работы с первичными источниками питания постоянного, возможность реализации различных законов зарядки.

При разработке устройства выбрали подход, основанный на детальном анализе и выборе отдельных блоков, составляющих в целом готовое изделие.

Необходимость заряда накопительных конденсаторов до напряжений, значительно превышающих номинальное напряжение источника, предопределяет использование трансформаторов. Так как используется источник постоянного тока трансформация напряжения возможна после преобразования постоянного тока в переменный. В качестве преобразователей, исходя из условий малых массогабаритных и высоких энергетических показателей, целесообразно использовать инверторы или прерыватели на тиристорах или транзисторах, работающих в режиме переключения. Различные варианты реализации этого звена и

определяют методы преобразования энергии, являясь одновременно основой для классификации зарядных устройств емкостных накопителей. На рисунке 1.2 изображена наиболее общая структурная схема зарядного устройства.

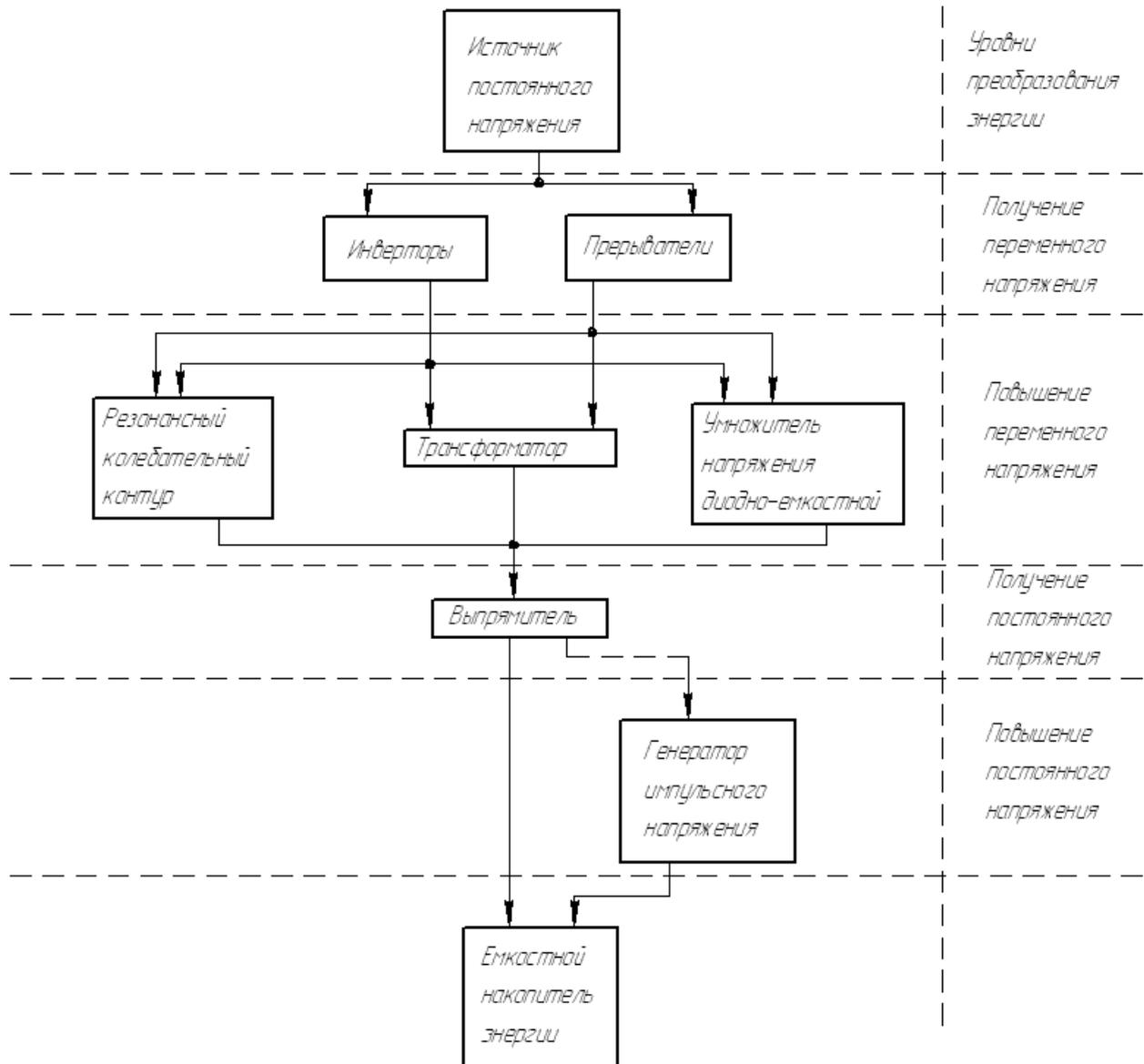


Рисунок 1.2 – Структурная схема преобразования энергии в ЗУ ЕНЭ

Поскольку получение высоких напряжений непосредственно на выходе, и прерывателей и инверторов, затруднено, на структурной схеме приведены методы повышения переменного напряжения, которые осуществляются с помощью резонансных контуров, трансформаторов и диодно-емкостных умножителей напряжения. Все перечисленные методы повышения переменного напряжения для

передачи энергии емкостному накопителю требуют применения выпрямителей. В случае если величина полученного после выпрямителя напряжения недостаточна, в схеме в качестве блока повышения постоянного напряжения применяется генератор импульсного напряжения (ГИН). В ряде случаев для увеличения коэффициента усиления зарядного устройства по напряжению возможно каскадное включение некоторых элементов рассматриваемой структурной схемы.

Таким образом, для построения системы заряда необходимо произвести критический анализ элементов системы заряда:

- автономные источники энергии,
- схем получения переменного напряжения из постоянного,
- схем повышения напряжения,
- схем получения постоянного напряжения (выпрямителей).

1.2 Анализ решений автономных источников энергии

Одним из основных элементов зарядной системы емкостного накопителя является первичный источник энергии. В соответствии с техническим заданием таким источником является аккумуляторная батарея. Современные аккумуляторные батареи отличаются большим набором технических параметров и среди требований предъявляемым к ним можно отнести: удельную емкость, максимальное количество циклов перезаряда за время жизни аккумуляторной батареи, температурный диапазон эксплуатации, массогабаритные характеристики, возможность ускоренной зарядки и т.д.

Современные аккумуляторные батареи могут быть интеллектуальным и содержать в своем составе дополнительные электронные контроллеры, которые обеспечивают ограничения режима заряда и разряда. Тем самым обеспечивается работа аккумуляторной батареи в пределах разрешенных параметров питания. Каждый производитель аккумуляторных батарей имеет свою технологию или по крайней мере особенности изготовления аккумуляторов. Это влияет на эксплуатационные параметры батарей. Анализируя источники технической

информации можно обобщить всё многообразие аккумуляторных батарей, используемых в промышленности и быту в несколько классов:

- никель -кадмиевые
- никель-металлогидридные
- литиево-ионные
- литиево-полимерные
- свинцово-кислотные

Каждый из указанных видов аккумуляторная батарея имеет свои особенности в изготовлении и эксплуатации и технических характеристиках , поэтому рассмотрим каждый тип по подробнее и проанализируем эти параметры на соответствие параметров технического задания.

Никелевая-кадмиевые

Этот тип аккумуляторов до сих пор остается достаточно востребованным. Хотя начал применяться примерно с середины прошлого века. В основном форм фактор таких батарей это батареи “пальчикового” типа элементов aa или aaa, а также кластеров набираемых из этих элементарных батареек.

Основные преимущества аккумуляторов

- Достаточно дешевые
- Характеристики не сильно зависят от изменения температуры
- Устойчивы к набросу нагрузки, то есть к резким возрастанием тока потребления
- Допускают большие разряды вплоть до 1 вольта

Недостатки

- При снижении температуры быстро теряет емкость
- Обладает эффектом при котором заряженный аккумулятор до максимальной емкости может отдавать при разряде до минимума лишь часть своей емкости. Этот эффект называется эффектом “памяти”, для восстановления емкости элемента его необходимо предварительно полностью разрядить, а затем полностью зарядить.

- Содержит тяжёлые опасные ядовитые металлы (кадмий)
- Обладает низкими удельными энергетическими параметрами
- Теряет ёмкость при снижении температуры эксплуатации

Никель-металлогидридные

Были введены в эксплуатацию позже никель-кадмиевых, то есть в конце прошлого века.

Отличительные преимущества:

- Имеют большую удельную ёмкость примерно на 30% по сравнению с никель-кадмиевыми.
- У них отсутствует практически эффект памяти
- Более безопасные в экологическом плане

Недостатки:

- Обладает меньшим ресурсом работы по сравнению с никель-кадмиевыми
- Имеют более высокую стоимость
- Ещё более подвержены потерям ёмкости при снижении температуры
- Более требовательные к изменению тока потребления
- Срок работы батареи сильно зависит от глубины разряда
- Большой саморазряд при отсутствие нагрузки, например при хранении по сравнению с никель-кадмиевый
- Требуют более сложного алгоритма для обнаружения полного заряда
- Требуют меньший ток заряда вследствие большего выделения количества тепла
- Перезаряд при отсутствие обратной связи по заряду может полностью вывести батарею из строя

Литиево-ионный

Эта батарея была разработана также в конце прошлого века, а необходимость в ее разработке назрела в виду в получении компактных высоко энергетических источников энергии.

Преимущества:

- В несколько раз более высокая плотность энергии по сравнению с никель-кадмиевыми и металл-гидридными аккумуляторами
- Низкий саморазряд батареи в процессе хранения
- Отсутствие эффекта памяти
- Количество циклов заряд-разряд Немного более чем у никель-кадмиевых элементов

Недостатки

- Более дорогие, чем остальные аккумуляторы
- Меньший температурный диапазон эксплуатации
- Требуют обязательного наличия в составе батареи специальный микросхемы предотвращающий перегрев и последующий взрыв аккумулятора при зарядке, а также не допускающий полный разряд аккумулятора выход его из строя.

Литиево-полимерные

Разрабатывался как замена литиево-ионные аккумуляторы который имеет в качестве одного из основных недостатков небольшой ток разряда, достаточно большая область современной электронной техники предполагает форсированное получение энергии из источников, например электротранспорт, авиамодели с электроприводами, ручной электрический инструмент и другие тяговые привода.

Преимущества

- Обладает теми же преимуществами, что и литий-ионный, однако по сравнению с последними имеют большую плотность энергии на единицу объема и массы
- Меньшую толщину элементов

- И довольно широкий температурный диапазон эксплуатации от минус 20 до плюс 40С.

Свинцово-кислотный

Применяется когда необходим надежный источник энергия способный отдавать большие разрядные токи в плоти до короткого замыкания.

Преимущества

- Наиболее дешевые по сравнению с остальными типами аккумуляторов
- Отсутствует эффект памяти
- Имеет низкий саморазряд
- Большое количество циклов разряд заряд примерно как у никель-кадмиевых

Недостатки

- Имеет самую низкую удельную емкость в пересчете на объем и массу
- Критичен к полному разряду это резко снижает срок эксплуатации аккумулятора

Исходя из рассмотренных характеристик, подошли к выводу, *что наиболее подходящим для проектируемого нами устройства будет **свинцово кислотный** тип аккумулятора*, т.к. условия эксплуатации устройства заряда связаны с низкими температурами – условия крайнего севера, тундры в зимнее время, дополнительно высокая токовая отдача именно свинцовых аккумуляторов является преимуществом при заряде емкостного накопителя, т.к требуется за ограниченное время сообщить в ЕНЭ большой заряд.

1.3 Анализ схемных решений преобразователя постоянного тока в переменный

Основными требованиями из анализа, которые предъявляются к схемам автономных преобразователей, заряд емкостных накопителей энергии:

- устойчивость при всем цикле заряда;
- компактность устройства;
- высокий коэффициент полезного действия;
- помехоустойчивость;
- дозирование энергии силовой схемой (возможность регулировать выходное напряжение);
- надежность.

Ниже будут рассмотрены схемотехнические решения заряда ЕНЭ с помощью прерывателей или инверторов [4,5].

1.3.1 Прерыватели:

1) Обратноходовая, Flyback (рисунок 1.3).

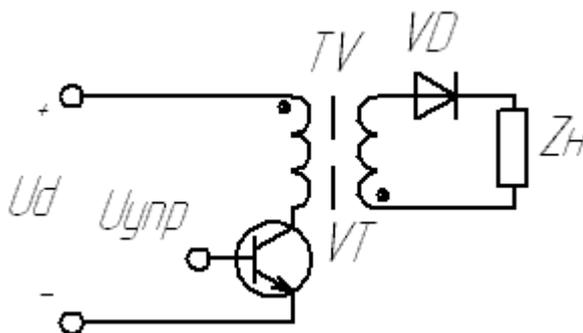


Рисунок 1.3 – Обратноходовая схема

Обратноходовой преобразователь обычно применяется для низкой и средней мощности схема питания. Он достаточно прост и дешев для изготовления, но имеет некоторые особые достоинства. Хотя по энергетическим соотношением он уступает многим импульсным схемам рациональный выбор его параметров это чередой оптимизацией. У него есть отличие от топологией прямоходовых или двухтактных преобразователей их расчет выбором коэффициента трансформации и достаточно очевиден, у обратноходового выбор коэффициента трансформации на прямую не связан с выходным напряжением, то есть реализовать одно и тоже выходное напряжение можно при разных коэффициентах трансформации. Однако импульсный вторичный ток, зависящий от коэффициента трансформации приводит к тому, что необходимо выбирать специальные конденсаторы, допускающий

импульсные токи. Как известно электролитические конденсаторы не относятся к таким. Это требует использование частотных конденсаторов вместе с электролитами. Также особенностью имеет использование обратноходового преобразователя при достаточно высоких напряжениях на вторичной стороне. Так как при этом вторичные обмотки имеют достаточно большую емкость, которая будет приводить к броску тока при заряде этого эффекта не наблюдается прямоходовых схемах.

Также несколько завышены размеры устройства трансформатор-дросселя на одинаковую мощность в сравнении с прямоходовыми схемами, тоже относится и к конденсаторам.

Обратноходовой преобразователь может работать как в режиме непрерывного тока в трансформаторе (индукторе), так и в прерывистом режиме. Следует отметить, что в непрерывном режиме схема нестабильна и склонна к автогенерации, поэтому преобразователи этого типа в основном проектируют для работы в прерывистом режиме.

Преимущества обратноходовых преобразователей:

- существенно меньшие габариты и вес по сравнению с источниками питания, содержащими трансформатор на частоту 50 Гц;
- нечувствительность обратноходового преобразователя к короткому замыканию нагрузки;
- возможность регулирования выходного напряжения в широких пределах, а также поддержание требуемого выходного напряжения в условиях изменения напряжения питающей сети;
- небольшое количество элементов, относительно невысокая стоимость.

В связи с тем, что в обратноходовом преобразователе накопительный дроссель подключён к первичной сети и к нагрузке в различные моменты времени, передача помех из сети в нагрузку и назад исключена, что тоже является достоинством обратноходового преобразователя.

Недостатки обратноходовых преобразователей:

- мощность ограничена энергией, запасаемой дросселем;

- повышенный уровень электромагнитных помех, создаваемых как в питающей сети, так и в нагрузке;
- большие по сравнению с другими импульсными преобразователями габариты при той же мощности, за счет импульсного потребления энергии через дозирующий дроссель-трансформатор.

2) Прямоходовая, Forward(рисунок 1.4).

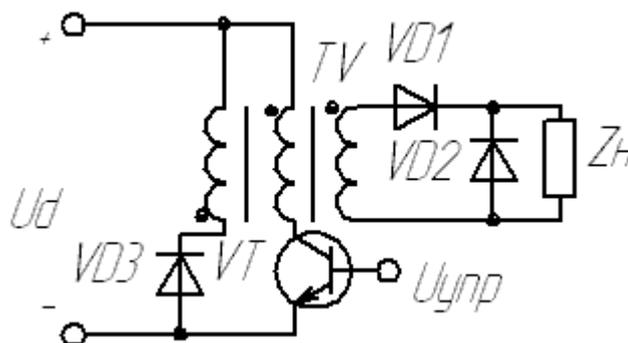


Рисунок 1.4 – Прямоходовая схема преобразователя

В отличие от обратноходовой схемы, в трансформаторе прямоходового преобразователя энергия не запасается. Когда ключ VT открыт, к первичной обмотке прикладывается напряжение питания U_d . На вторичной обмотке появляется напряжение, открывается диод $VD1$, ток протекает в нагрузку. Когда ключ VT размыкается, открывается диод $VD3$, и происходит размагничивание сердечника трансформатора через дополнительную обмотку и через диод $VD3$, так же происходит возврат части энергии в источник питания. Схема может работать как в режиме непрерывного тока нагрузки, так и в прерывистом режиме.

В схеме прямоходового преобразователя требуется предусмотреть ограничитель напряжения (для чего и служит дополнительная обмотка трансформатора), так как при размыкании ключа протекание тока через все обмотки трансформатора прекращается. Ограничитель обеспечивает путь для тока, вызванного намагничивающей индуктивностью трансформатора и индуктивностью рассеяния. В обратноходовой же схеме при размыкании ключа ток, вызванный

убыванием магнитного потока в сердечнике, протекает в цепи вторичной обмотки. Поэтому в обратногоходовой схеме ограничитель напряжения может использоваться лишь для того, чтобы уменьшить воздействие на ключ импульсов напряжения, вызванных наличием индуктивностей рассеяния.

Способ реализации ограничительной цепи в схеме прямоходового преобразователя влияет на максимальное напряжение на ключе. Энергия, накопленная в намагничивающей индуктивности, пропорциональна величине магнитного потока, действующего в то время, когда ключ замкнут (открыт). То же самое количество вольт-секунд требуется для рассеивания этой энергии за то время, пока ключ разомкнут. Стрессовое воздействие напряжения на ключ можно уменьшить, ограничивая коэффициент заполнения. Однако снижение коэффициента заполнения приведёт к увеличению пикового тока в первичной обмотке и выходных пикового тока и напряжения. Ограничительная обмотка обычно имеет то же число витков, что и первичная обмотка, чтобы установить напряжение на ключе равным удвоенному значению входного напряжения. Однако максимальный коэффициент заполнения и число витков ограничительной обмотки можно откорректировать для любого желаемого значения напряжения на ключе. Ограничительная цепь рассеивает только энергию индуктивностей, расположенных внутри петли, образованной самой ограничительной цепью. Паразитные индуктивности за пределами ограничивающей цепи, например индуктивности выводов ключа, а также индуктивность рассеяния первичной обмотки создадут при запираии ключа дополнительные напряжения, воздействующие на ключ. Схема применяется при больших мощностях нагрузки (более 200Вт).

Схема обладает всеми достоинствами двухтактных преобразователей, как и недостатками, но у схемы Forward появляется одно очень примечательное достоинство. Индуктивность рассеяния, в двухтактном преобразователе ограничивает максимальную передаваемую мощность т.к. она постоянно перемагничивается. В прямоходе через эту индуктивность протекает постоянный ток, поэтому она не может ограничивать передаваемую мощность. Благодаря этому прямоходовый преобразователь прекрасно переносит перегрузки. Использование

прямоугольного преобразователя также позволяет снизить уровень как выходных, так и входных пульсаций. Для этого достаточно задать коэффициент заполнения более 50%.

Известны основные схемы инверторов:

1) Двухтактная с нулевым выводом (рисунок 1.5).

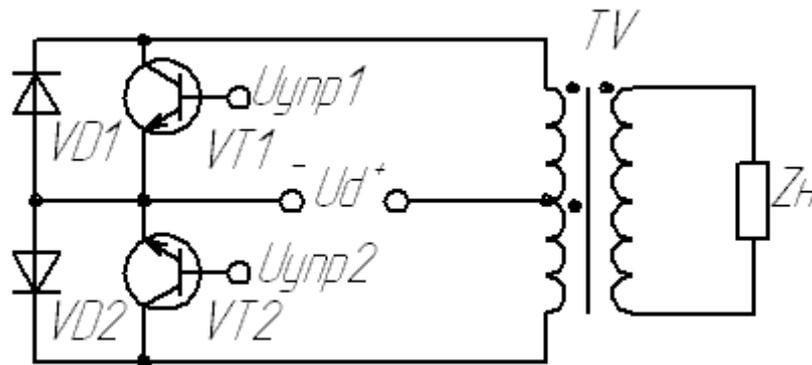


Рисунок 1.5 – Двухтактная схема с нулевым выводом

Преимущества данной схемы:

- в два раза меньшее количество ключей, чем в мостовой схеме;
- наличие гальванической развязки;
- высокий КПД;
- по ключам протекает меньший ток по сравнению с полумостовой схемой.

Недостатки схемы:

- технически сложным является изготовление трансформатора;
- сложность в регулировании выходного напряжения в связи с насыщением сердечника трансформатора из-за разбаланса в плечах;
- существуют колебания тока источника питания.

2) Двухтактная полумостовая с разделительными емкостями (рисунок 1.6).

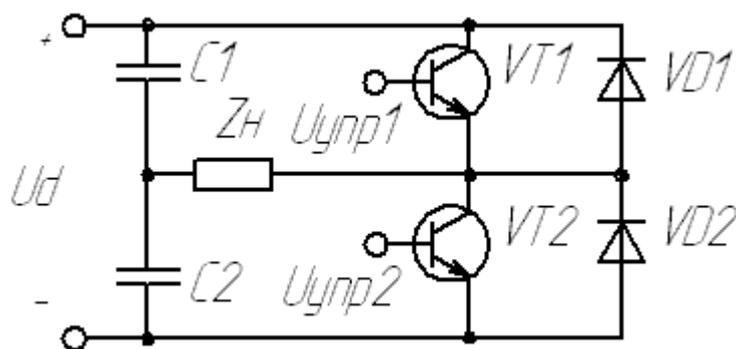


Рисунок 1.6 – Двухтактная полумостовая схема с разделительными емкостями

Преимущества данной схемы:

- в два раза меньшее количество ключей, чем в мостовой схеме;
- высокий КПД;
- простота и надежность схемы.

Недостатки схемы:

- по ключам протекает больший ток по сравнению со схемой с нулевой точкой.

3) Мостовая схема (рисунок 1.7).

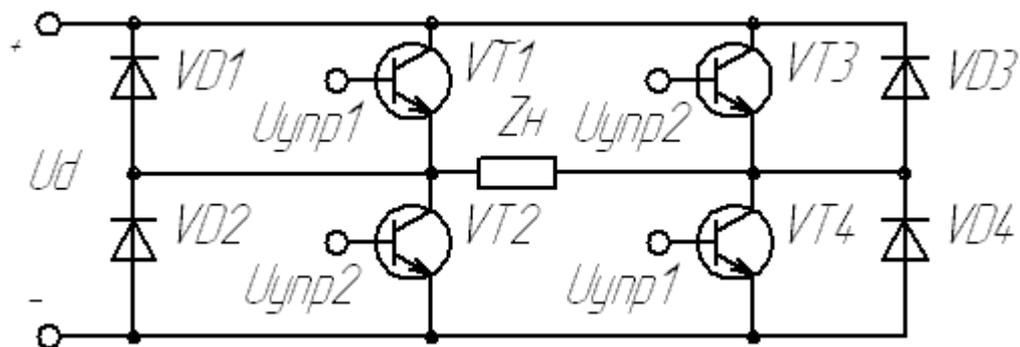


Рисунок 1.7 – Мостовая схема

Преимущества данной схемы:

- по ключам протекает меньший ток по сравнению с полумостовой схемой, что позволяет выбрать ключи меньшей мощности и в течение одного такта работают два ключа, что свидетельствует о меньшем прикладываемом напряжении на них;
- простота и надежность схемы.

Недостатки схемы:

- большое количество ключей по сравнению с полумостовой схемой и со схемой с нулевой точкой;
- низкий КПД;

У мостовой схемы по сравнению с остальными низкий КПД из-за наличия большего числа ключевых элементов, что является решающим фактором при выборе автономного инвертора. В схеме с нулевым выводом технически сложным является изготовление трансформатора. При ее использовании также возникают сложности в регулировании выходного напряжения в связи с насыщением сердечника трансформатора. Обратноходовые преобразователи распространены на средние и меньшие мощности они достаточно дешевые в связи с улучшением элементной базы а именно транзисторов и высококачественных конденсаторов они могут использоваться и на более высокие мощности 2000ват. Следует отметить что микросхема управления этими преобразователями дешевле чем у других преобразователей. Схема имеет минимальное число силовых элементов и не боится короткого замыкания нагрузки, за счет разделения процесса заряда и потребления мощности из источника. Поэтому наиболее приемлемой для проектирования зарядного устройства является обратноходовая одноконтурная схема. В качестве ключевого элемента можно выбрать транзистор MOSFET, так как они отличаются наименьшим сопротивлением перехода в управляемой цепи по сравнению с IGBT-транзисторами и тиристорами, что необходимо для обеспечения высокого КПД схемы.

1.4 Анализ схемных решений схем повышения напряжения

Поскольку в качестве преобразователя выбран обратноходовой, то повышение напряжения в таких схемах однозначно выполняется элементом, выполняющим функции двух элементов дросселя и трансформатора в одном конструктивном элементе. Для построения дроссель - трансформатора лучше всего использовать феррит поскольку большинство производителей производят сердечники ш-образной

формы именно для ферритов. Материалы типа порошкового железа и других сплавов чаще выполняются в виде тороидных форм-факторов что осложняет намотку этих элементов при ручном производстве. Следует отметить также, что ферриты могут работать на гораздо большем диапазоне частот и потому имеют меньшие потери. Особенностью использования ш-образных сердечников заключается в обязательном применении воздушного зазора, который может выполняться в виде немагнитной вставки между сердечниками. Необходимо также учитывать, что область обмотки непосредственно около зазора будет иметь более высокие потери вследствие наличия вихревых токов.

1.5 Анализ схем получения постоянного напряжения.

После трансформатора следует блок выпрямителя, преобразующий энергию переменного напряжения в энергию постоянного напряжения и осуществляющий непосредственную передачу энергии емкостному накопителю.

Известны основные виды схем выпрямителей:

1) Однотактная схема (рисунок 1.16).

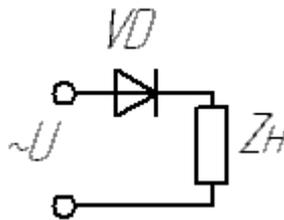


Рисунок 1.16 – Однотактная схема выпрямителя

Преимущества:

- простота схемы;

Недостатки:

- высокий уровень пульсаций выпрямленного напряжения;

- низкий КПД;

- значительно больший, чем в других схемах, вес трансформатора и нерациональное использование в трансформаторе меди и стали.

2) Двухтактная с нулевой точкой (рисунок 1.17).

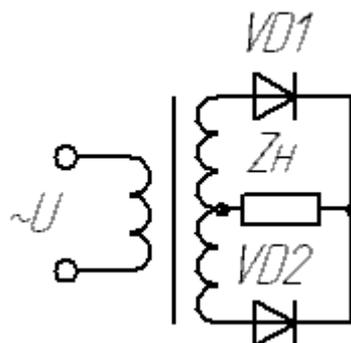


Рисунок 1.17 – Двухтактная схема выпрямителя с нулевой точкой

Преимущества:

- низкий уровень пульсаций;
- высокий КПД;

Недостатки:

- сложность конструкции трансформатора;
- нерациональное использование в трансформаторе меди и стали;
- максимальное обратное напряжение на ключе в два раза выше амплитуды поступающего на первичную обмотку $\sim U$.

3) Двухтактная мостовая схема (рисунок 1.18).

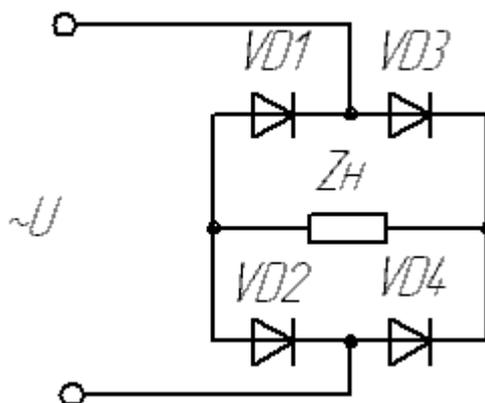


Рисунок 1.18 – Мостовая схема выпрямителя

Преимущества:

- по сравнению с однополупериодной схемой мостовая схема имеет в 2 раза меньший уровень пульсаций;
- более высокий КПД;
- более рациональное использование трансформатора и уменьшение его расчетной мощности;
- по сравнению с двухполупериодной схемой мостовая имеет более простую конструкцию трансформатора при таком же уровне пульсаций;
- обратное напряжение вентиляей может быть значительно ниже, чем в первых двух схемах;

Недостатки:

- увеличение числа вентиляей и необходимость шунтирования вентиляей для выравнивания обратного напряжения на каждом из них.

На основании представленных преимуществ и недостатков наиболее подходящей является одноконтная схема выпрямителя, поскольку по принципу работы обратного преобразователя выпрямление должно осуществляться однополупериодно, остальные схемы являются двухполупериодными и пригодны для включения с инверторами.

1.6 Выводы о структурных решениях в работе

Таким образом, для устройства заряда ЕН были выбраны наиболее подходящие компоненты для его стабильной работы от аккумулятора заданного напряжения и с соблюдением всех требований предъявленных к работе. Структурная схема силовой части проектируемого устройства представлена на рисунке 1.19, электрическая принципиальная схема представлена на рисунке 1.20.

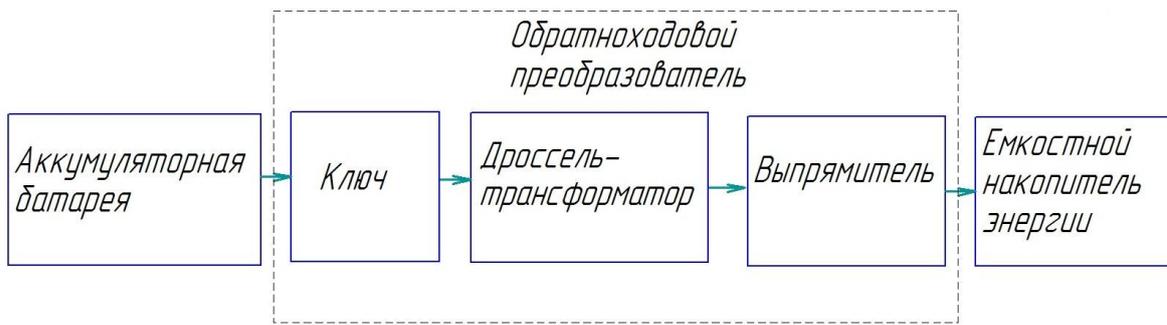


Рисунок 1.19 – Структурная схема силовой части ЗУ

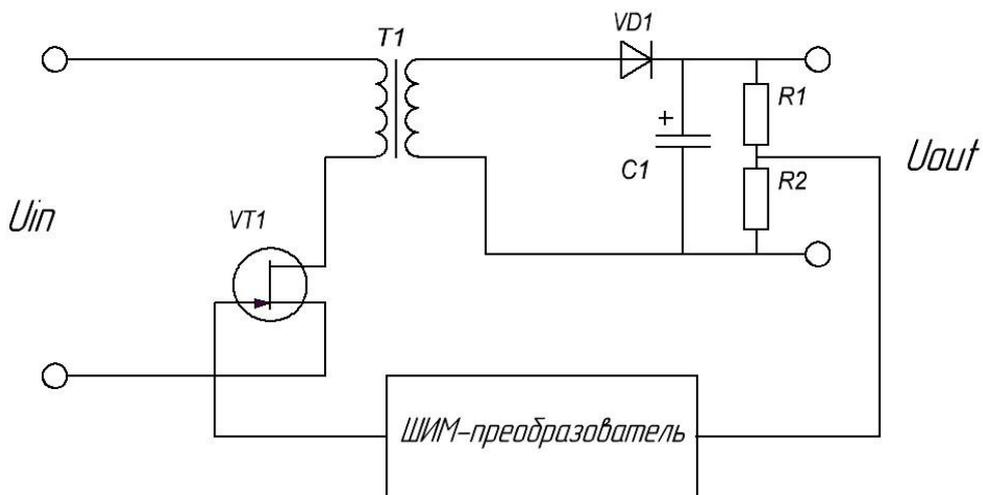
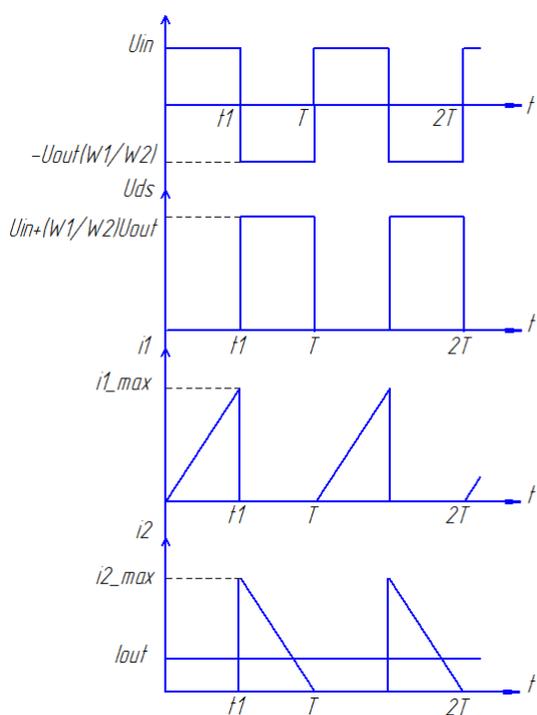


Рисунок 1.20 – Принципиальная схема силовой части ЗУ

Выбранная схема устройства заряда изображена на рисунке 1.20.

На схеме $T1$ - это элемент, позволяющий накапливать энергию в магнитном поле - дроссель-трансформатор. Временные диаграммы работы устройства приведены на рисунке 1.21. Работа схемы идёт в два этапа: накопление энергии в дросселе и отдаче энергии в нагрузку - емкостной накопитель энергии. Первый этап, где происходит в момент t_0-t_1 при этом линейным образом при открытии транзисторного ключа первичный ток, а также магнитный поток дросселя начинает нарастать. При этом, наводимое на вторичную обмотку напряжение прикладывается к диоду в обратном направлении и он оказывается закрыт. Передача энергии между первичной и вторичной обмотками отсутствует. На втором этапе t_1-T транзисторный ключ закрывается, напряжение самоиндукции на вторичной стороне

меняет направление и по контуру вторичная обмотка -диод емкостной накопитель энергии начинает протекать ток. При этом ток направлен против напряжения накопителя энергии, что приводит к его уменьшению. При этом уменьшается магнитный поток дроссель трансформатора. Ток первичных и вторичных обмоток имеют пилообразную форму с обрывом в момент выключения транзистора. В зависимости от соотношения входного напряжения, напряжения на емкостном накопителе энергии, времени открытия транзистора, периоде коммутации, процессы, происходящие в схеме могут быть с непрерывным и прерывистым магнитным потоком (токами) (рис.1.21). Если на втором этапе вторичный ток или магнитный поток у дросселя успевает снизиться до 0 до момента следующего включения транзисторов, то режим называется непрерывным в противном случае мы имеем прерывистый режим работы.

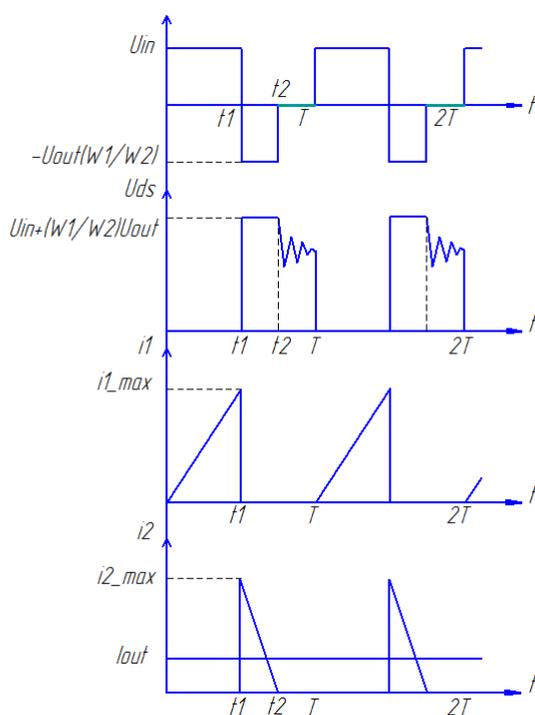


режим непрерывного (потока) токов

$W1$ - число витков первичной обмотки

$W2$ - число витков вторичной обмотки

Рисунок 1.21 – Диаграммы работы ЗУ.



режим прерывистых (потока) токов

2 Расчетный раздел

2.1 Анализ режимов заряда ЕНЭ

Одним из основных требований, предъявляемым к ЗУ накопителей энергии, является передача энергии от источника ограниченной мощности к потребителю с минимальными потерями энергии [3]. Поэтому основным критерием оптимальности системы заряда является максимум КПД. Известно, что максимально возможный КПД зарядного контура обеспечивается при заряде конденсатора от источника тока. В связи с этим структура системы, обеспечивающей заряд конденсатора при питании от источника напряжения током $i = \text{const}$, принимается оптимальной во многих исследованиях. Таким образом, оптимальное решение ограничивается областью преобразователей источников напряжения в источники тока. Однако вывод о максимуме КПД преобразователя при условии заряда током $i = \text{const}$ все вытекающие из этого вывода положения справедливы для случая, когда преобразователь содержит один контур. Электрические цепи преобразователей источников напряжения в источники тока содержат не менее двух контуров с токами. При постоянстве зарядного тока в выходном контуре преобразователя не удастся обеспечить постоянство тока, потребляемого от источника, во входном контуре, и, следовательно, не выполняется условие потерь энергии во входном контуре. При этом встает задача отыскания в общем виде законов изменения токов, обеспечивающих максимум КПД при двух контурах в системе заряда, как в нашем случае.

Возможен случай, при котором периодический заряд НЭ производится от источника постоянного напряжения через преобразователь источника напряжения в источник тока $i_2 = \text{const}$ в идеале без потерь (рисунок 2.1).

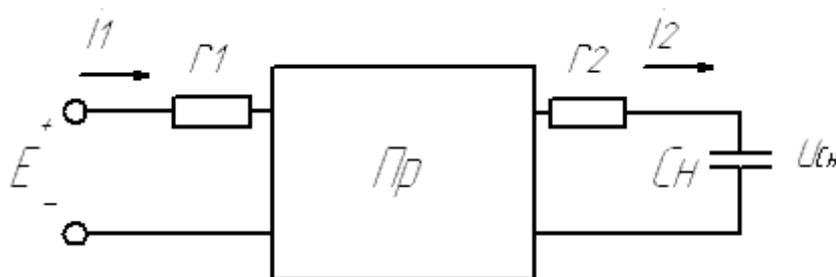


Рисунок 2.1 – Схема заряда ЕНЭ

Примем $r_1=r_2=0$, следовательно, потери в схеме преобразования отсутствуют и КПД системы равен 100%. Так как $i_2=\text{const}$, напряжение $u_{\text{сн}}$ накопительного конденсатора и мгновенная мощность увеличиваются во времени по линейному закону (рисунок 2.2).

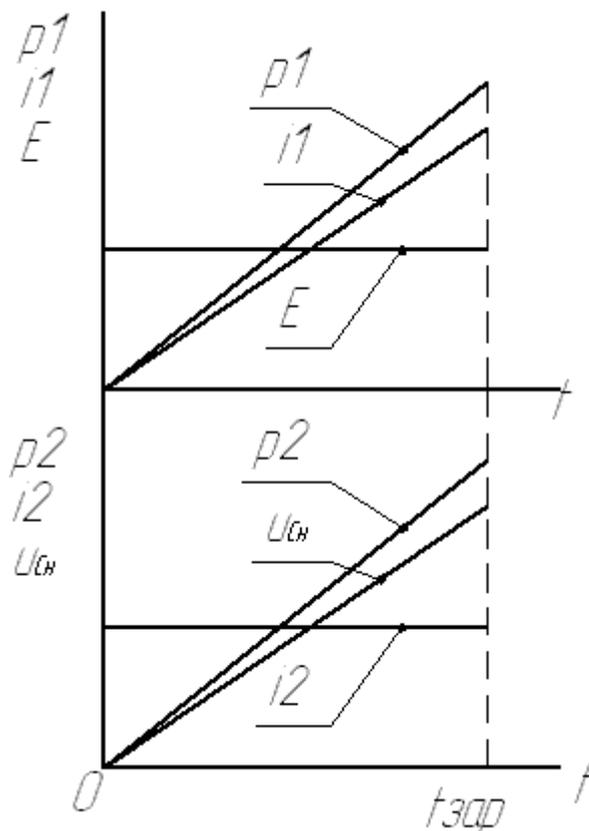


Рисунок 2.2 – Диаграммы энергетических показателей ЗУ

Проанализируем режимы работы в ООП (однотактный обратногоходовой преобразователь). Пусть индуктивность первичной обмотки L_1 выбрана такой, что при коэффициенте заполнения равном 0.5 происходит ее полный разряд на нагрузку. Если мы уменьшим коэффициент заполнения, ток вторичной обмотки трансформатора станет прерывистым на протяжении фазы разряда. Для других схем (например, чопперная) это было бы нежелательно, даже критично. Но во flyback-схеме ток вторичной обмотки все равно прерывается в фазе заряда.

Представим, что увеличили коэффициент заполнения более 0,5. Теперь трансформатор не будет успевать полностью разряжаться на нагрузку, появиться постоянная составляющая, «переходящая» из одной обмотки в другую. В момент начала заряда первичной обмотки трансформатора эта «переходящая» составляющая отражается как резкий скачок тока в первичной обмотке. Казалось бы, это положительный момент. К сожалению, в этом случае, напротив, происходит убыль тока в силу появления в формуле произведения $D(1-D)$.

Ток нагрузки:[4]

$$i_{out} = \frac{D(1-D) \times U_{in}}{2 \times L_1 \times f \times k} \quad (2.1)$$

Физически это означает, что добавляя постоянную составляющую, которая не успевает «переходить» в нагрузку, мы тем не менее укорачиваем время разряда на нагрузку. Примем в дальнейшем в качестве основного режима управления $D=0,5$, при этом следует учесть что при снижении питающего напряжения U_{in} до минимальной величины (около 10 В для кислотной АКБ), динамика заряда (1000В за 5 секунд) должна сохраняться.

2.2 Оценочный расчет силовой части ЗУ.

В ОП трансформатор часто рассматривают как индуктор. Индуктивность и ток первичной обмотки при открытом силовом ключе выражаются формулами:[6]

$$L = V_A \times \Delta t / \Delta i \quad (2.2)$$

$$I_{peak} = V_A \times \Delta t / L \quad (2.3)$$

где V_A - приложенное напряжение; L – индуктивность трансформатора; Δt - длительность импульса; Δi - приращение тока в индуктивности за время Δt .

Энергия W , запасаемая в сердечнике, определяется из выражения:

$$W = 0.5LI_{peak}^2 \quad (2.4)$$

Энергия заряда конденсатора при максимальном напряжении:

$$W_{кон} = 0.5CV_{кон}^2 = \frac{1000 \cdot 10^{-6} \cdot 1000^2}{2} = 500 \text{ Дж.} \quad (2.5)$$

Число циклов заряда за время заряда $t=5$ спри частоте работы ОП 50кГц равна:

$$N = 5 \cdot 50000 = 250000 \text{ импульсов} \quad (2.6)$$

Энергия, передаваемая трансформатору за каждый импульс:

$$W_{имп} = \frac{W_{кон}}{N} = \frac{500}{250000} = 2000 \text{ мкДж} \quad (2.7)$$

КПД схемы и энергия, потребляемая от источника питания (в нашем случае 12В). На данном этапе выбирается оценочный КПД схемы так как, при вычислениях пренебрегаем потерями в силовых ключах, диоде и трансформаторе (на рисунке 2.3). Показан типовой график зависимости КПД ОП от энергии, передаваемой через трансформатор. Для случая $W_{кон}=500$ Дж значение КПД =0.9, следовательно энергия, потребляемая от первичного источника, в импульсе составит :

$$W_{имп} = \frac{W_{имп1}}{\eta} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0.9} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \quad (2.8)$$

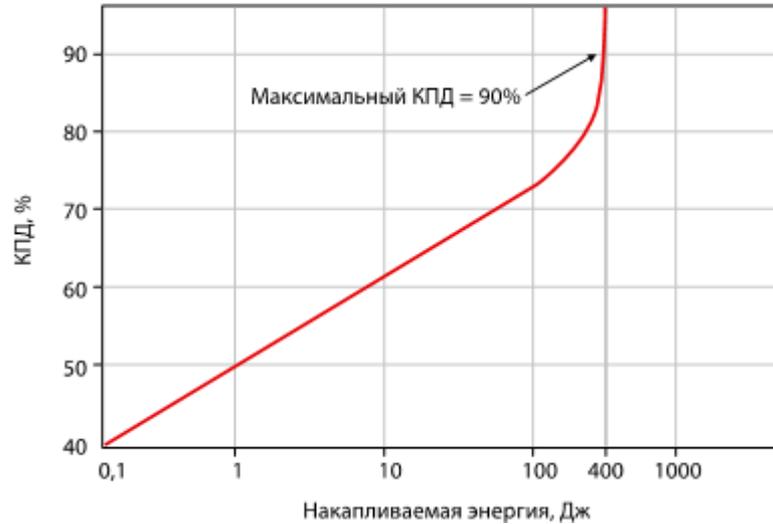


Рисунок 2.3 – Зависимость КПД от накапливаемой конденсатором энергии

На пятом шаге определяются искомые параметры: индуктивность трансформатора и пиковый ток первичной обмотки. Принимаем $\Delta t = 10 \cdot 10^{-6}$ с, полпериода коммутации. Из (2.2) и (2.4) получаем:

$$L \frac{di}{dt} = Va \Rightarrow L = \frac{Va\Delta t}{\Delta i} = \frac{Va\Delta t}{I_{peak}}$$

где $I_{peak} = \Delta i$ так как ток увеличивается на каждом периоде от нуля до I_{peak}

$$L = \frac{2W_{имп}}{I_{peak}^2}$$

приравниваем по L,

$$I_{peak} = \frac{2W_{имп}}{Va\Delta t}, \text{ тогда}$$

$$I_{peak} = \frac{2W_{имп}}{Va\Delta t} = \frac{2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 37 \text{ А.}$$

подставляя полученное значение в (2.3) получим:

$$L = \frac{Va\Delta t}{I_{peak}} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{37} = 3,24 \text{ мкГн}$$

2.3. Выбор силовых элементов и коэффициента трансформации.

Если, например, расчет трансформатора для топологий с передачей энергии на прямом ходу (прямоходовой преобразователь Forward, двухтактные преобразователи) достаточно линеен и сводится к минимизации потерь в трансформаторе при однозначно определенном коэффициенте трансформации, который определяется отношением выходного напряжения ко входному, то в обратноходовом преобразователе выбор коэффициента трансформации далеко не очевиден. Т.к. питание выходной цепи идет не в режиме источника напряжения, а в режиме источника тока, и напряжение в конечном итоге зависит от нагрузки и величины тока и управления ключа. Не вдаваясь в подробные исследования с оптимизацией параметров обратноходового преобразователя по критериям потерь, массогабаритного показателя, условно зададимся коэффициентом трансформации $k_{тр}=10$.

2.2.1 Выбор транзистора (силового ключа) .

Силовой ключ флайбэка должен обладать двумя основными свойствами – иметь низкое сопротивление в открытом состоянии и низкий суммарный заряд переключения, причем на практике оба эти требования противоречат друг другу. Точно рассчитать скорость переключения полевого транзистора в обратноходовом преобразователе весьма и весьма сложно, и приходится довольствоваться лишь приблизительной оценкой.

Итак, минимальное требование – способность пропускать максимальный импульсный ток он по расчету равен 37 А, с учетом заданного коэффициента преобразования трансформатора, $k_{тр}=10$ напряжение на транзисторе не превысит:

$$U_{vn}=E+U_c/k_{тр}=12+1000/10=112В .$$

С учетом запаса выберем транзистор IXFX220N17T2 на допустимое напряжение $U=170$ В и ток 100А, трехкратный запас по току позволит в будущем уменьшить потери и радиатор транзистора.

Таблица 2.2 – Параметры транзистора IXFX220N17T2.

Параметры	Значения
Напряжение сток-исток U_{DSS} , В	170
Максимальный ток сток-исток при 150 С $I_{симакс}$..А	100
Максимальное напряжение затвор-исток $U_{зимакс}$.,В	170
Сопротивление канала в открытом состоянии $R_{сивкл}$.,мОм	6.3
Максимальная рассеиваемая мощность при 25 С $P_{симакс}$..Вт	1250
Тепловое сопротивление среды переход – корпус $R_{th_{JC}}$, °С/Вт	0,12
$R_{th_{CS}}$ сопротивление корпус-радиатор (при наличии силиконовой пасты) С ⁰ /Вт	0,15
Рабочая температура, С	-55...175
Корпус	ТО247АВ

Мощности в транзисторе складываются из статических и динамических (на переключение) [7].

Статические потери можно оценить исходя из простой зависимости кривой потребляемого тока транзистором – линейное нарастание тока от $I_m=37A$ до 0А, за полупериод коммутации $t_{on}=T/2=10\mu s$, и паузы равной полупериоду $T/2$.

$$P_{VTС} = \frac{1}{T} \int_0^T R_{си} * i_{vt}^2(t) dt = \frac{R_{си}}{T} \int_0^{t_{on}} \left(I_m \frac{t}{t_{on}} \right)^2 dt = R_{си} I_m^2 \frac{t_{on}}{3T} = R_{си} I_m^2 \frac{t_{on}}{3} f = 1,4 \text{ Вт.} \quad (2.9)$$

Динамические потери в транзисторе можно учитывать только на фазе выключения, т.к. при включении ток равен нулю, тогда

$$P_{VTД} = U_{си} I_m \frac{t_{off}}{T} = U_{си} I_m t_{off} f = 112 * 37 * 200 * 100^{-9} * 50000 = 41 \text{ Вт.} \quad (2.9.1)$$

Суммарные потери

$$P_{VT} = P_{VTС} + P_{VTД} = 1,4 + 41 = 42,4 \text{ Вт.} \quad (2.9.2)$$

2.2.2. Выбор диода.

Для высоких выходных напряжений рационально использовать высоковольтные сверхбыстрые диоды, обладающие низким прямым падением напряжения и малыми временами восстановления по сравнению с полупериодом 10 мкс.

Максимальный ток через диод может достигать $I_{vd}=I_{peak}/k_{тр}=37/10=3,7A$, напряжение же через него может доходить до 1000 В, с учетом запаса необходимо выбирать диод на напряжение не менее 1200 В.

Таблица 2.3 – Параметры диода VS-20ETS12.

Параметры диода	Значения
Максимальное постоянное обратное напряжение, В	1200
Максимальное импульсное обратное напряжение, В	1300
Максимальный прямой (выпрямленный за полупериод) ток, А	20
Дифференциальное сопротивление, Ом	0.04
Обратный ток, мАТ=150С, не более	1
Rth _{JC} сопротивление переход-корпус	1,3C ⁰ /Вт
Rth _{CS} сопротивление корпус-радиатор (при наличии силиконовой пасты)	0,5C ⁰ /Вт
Рабочая температура, С	-55...175
Корпус	PowIRTab

Потери мощности в диоде так же состоят из статических и динамических [7].

Статические рассчитываются из предположения линейного спада тока от $I_m=I_{dm}=37A$ до 0:

$$\Delta P_{\delta} = \frac{1}{T} \int_0^T [U_{\delta 0} i_{\delta}(t) + i_{\delta}^2(t) R_{\delta}] dt = \frac{U_{\delta 0} I_{dm}}{T} \int_0^{t_{обп}} \left(1 - \frac{t}{t_{обп}}\right) dt + \frac{I_{dm}^2 R_{\delta}}{T} \int_0^{t_{обп}} \left(1 - \frac{t}{t_{обп}}\right)^2 dt =$$

$$= \frac{I_{dm} t_{обп}}{T} \left(\frac{U_{\delta 0}}{2} + \frac{I_{dm} R_{\delta}}{3} \right).$$

$$\Delta P_c = \frac{I_{dm} t_{обп}}{T} \left(\frac{U_{\delta 0}}{2} + \frac{I_{dm} R_{\delta}}{3} \right) = \frac{3,7 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{0,6}{2} + \frac{3,7 \cdot 0,04}{3} \right) = 1,29 \text{ Вт}$$

Статические при обратном включении:

$$\Delta P_{\text{обр}} = I_{\text{обр}} \cdot U_c = 0.001 \cdot 1000 = 1 \text{ Вт} \quad (2.10)$$

Динамические потери у диода малы, так как время обратного восстановления у диодов Шоттки отсутствует по сравнению с обычными диодами.

Суммарные потери в диоде с учетом (2.10), таким образом составляют $P_{V_{Dc}} = 1 + 1,29 = 2,29 \text{ Вт}$.

2.4. Расчет радиатора VD, VT

Перегрев диода и транзистора выше допустимых значений может вывести их из строя, для предотвращения этого необходимо рассчитать тепловые режимы и обосновать необходимость установки радиаторов.

2.4.1. Радиатор диода

Тепловое сопротивление корпус-среда данного VD:

$R_{j-a} = 62 \text{ C}^0/\text{Вт}$, перегрев диода составит

$$\Delta T = P_{V_{Dc}} \cdot R_{j-a} = 2,29 \cdot 62 = 140 \text{ C}^0.$$

При допустимом перегреве $\Delta T = T_j - T_a = 120 - 40 = 80 \text{ C}^0$,

где $T_j = 120 \text{ C}^0$ - допустимая температура перехода,

$T_a = 40 \text{ C}^0$ – температура окружающей среды.

Тогда необходимый радиатор должен иметь тепловое сопротивление

$$R_{s-a} = \Delta T / P_{V_{Dc}} - R_{j-c} - R_{c-s} = 80 / 2,29 - 0,12 - 0,15 = 33 \text{ C}^0/\text{Вт},$$

По рисунку 2.4 [8] для мощности 2,29 Вт и перегреве 70 C^0 , т.е. тепловом сопротивлении $R_{s-a} = \Delta T / P_{V_{Dc}} = 70 \text{ C}^0 / 2,29 \text{ Вт} = 30 \text{ C}^0/\text{Вт}$, площадь составляет 25 кв.см, толщина пластины должна быть 2-3 мм. Такой площадью обладает пластина размерами 5x5 см.

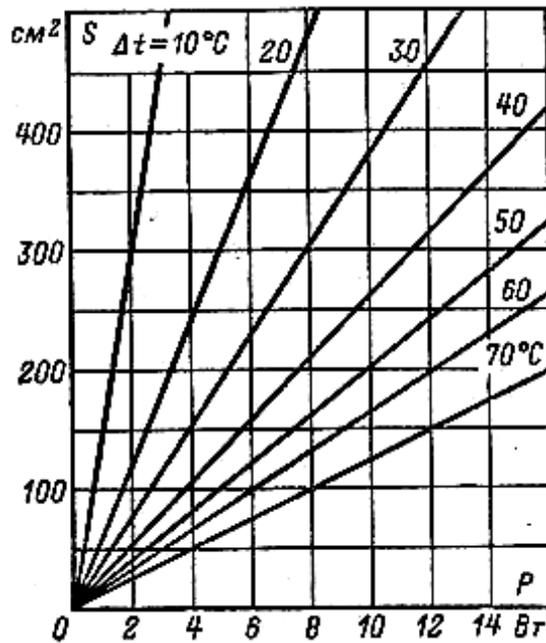


Рисунок 2.4 – Зависимость площади пластинчатого радиатора от заданной мощности P и перегрева между окружающей средой и его поверхностью Δt .

2.4.2. Радиатор транзистора

Тепловое сопротивление корпус-среда данного VD:

$R_{j-a} = 62 \text{ C}^0/\text{Вт}$, перегрев диода составит

$$\Delta T = P_{VDc} * R_{j-a} = 2,29 * 62 = 140 \text{ C}^0.$$

При допустимом перегреве $\Delta T = T_j - T_a = 120 - 40 = 80 \text{ C}^0$,

где $T_j = 120 \text{ C}^0$ - допустимая температура перехода,

$T_a = 40 \text{ C}^0$ – температура окружающей среды,

Необходимый радиатор должен иметь тепловое сопротивление

$$R_{s-a} = \Delta T / P_{VDC} - R_{j-c} - R_{c-s} = 80/41 - 0,12 - 0,15 = 1,7 C^0/Вт,$$

Выбираем радиатор 530801B05150G фирмы AAVIDTHERMALLOY [9], внешний вид изображен на рис. 2.5. Размеры в миллиметрах даны в скобках. По расчетной диаграмме радиатора рис.2.6, для режима $R_{s-a} = 1,7 C^0/Вт$ (показан точкой на кривой) определяем минимальную скорость вращения вентилятора, которая составляет 280 оборотов в минуту (указана стрелкой), при повышении до 1000 оборотов в минуту $R_{s-a} = 0,5 C^0/Вт$, тогда перегрев будет

$$\Delta T = P_{VDC}(R_{s-a} - R_{j-c} - R_{c-s}) = 80(0,5 - 0,12 - 0,15) = 30 C^0,$$

$$\text{а температура перехода } T_j = \Delta T + T_a = 30 + 40 = 70 C^0.$$

Таким образом, есть большой запас у данного радиатора по изменению температуры перехода T_j при рабочем режиме схемы от 70 до 120 C^0 .

Внешний вид радиатора на рис.2.7.

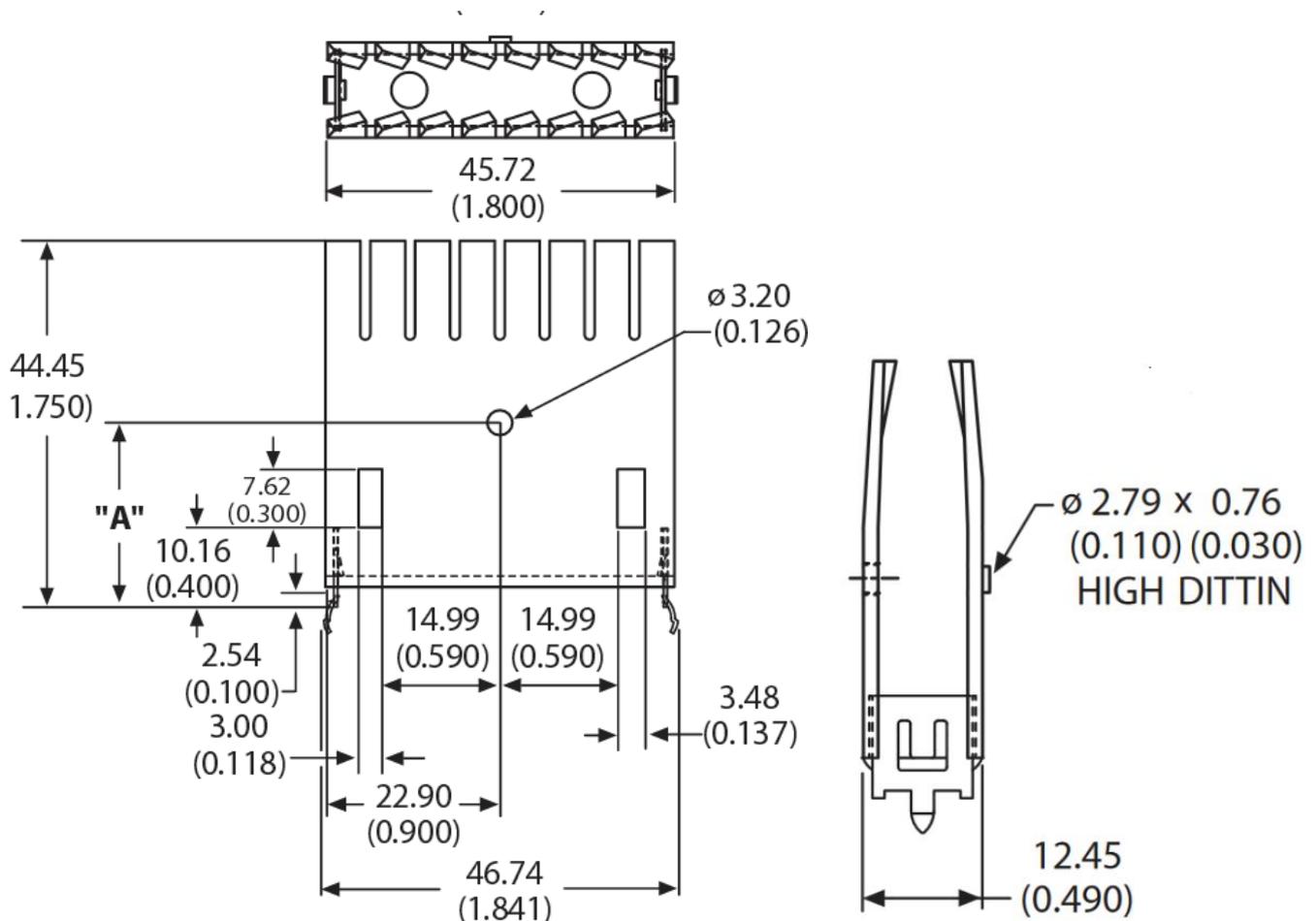


Рисунок 2.5 - Чертеж конструкции радиатора (размеры в скобках в миллиметрах)

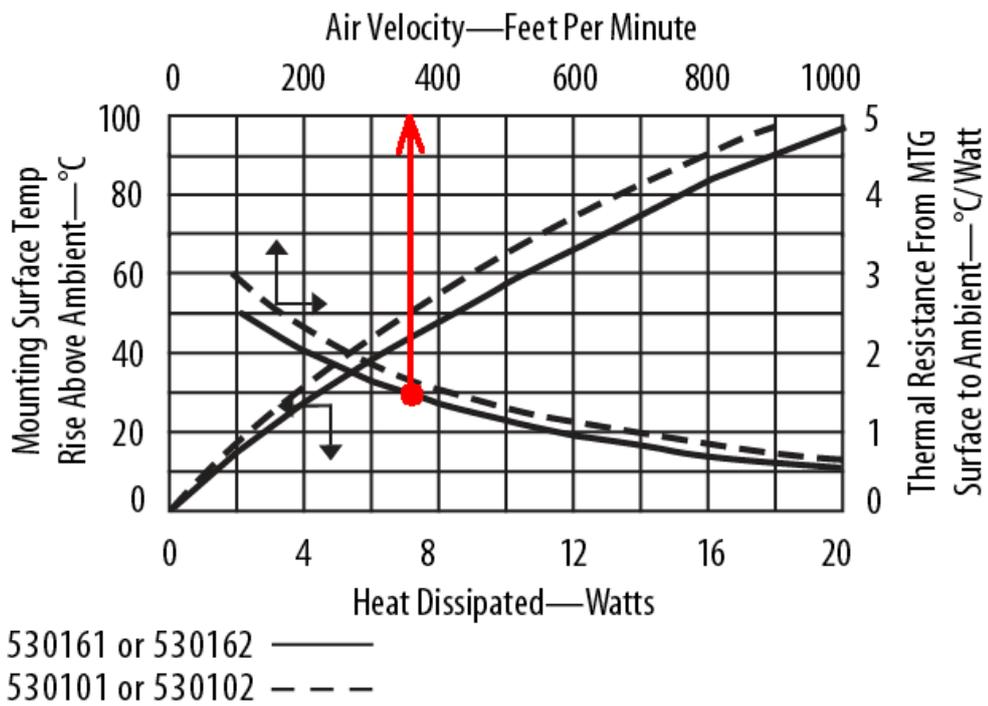


Рисунок 2.6 -Диаграмма охлаждения (рабочая точка указана на графике).

Для охлаждения радиаторов и элементов был выбран вентилятор JF0825S1H[10] (табл.2.1).

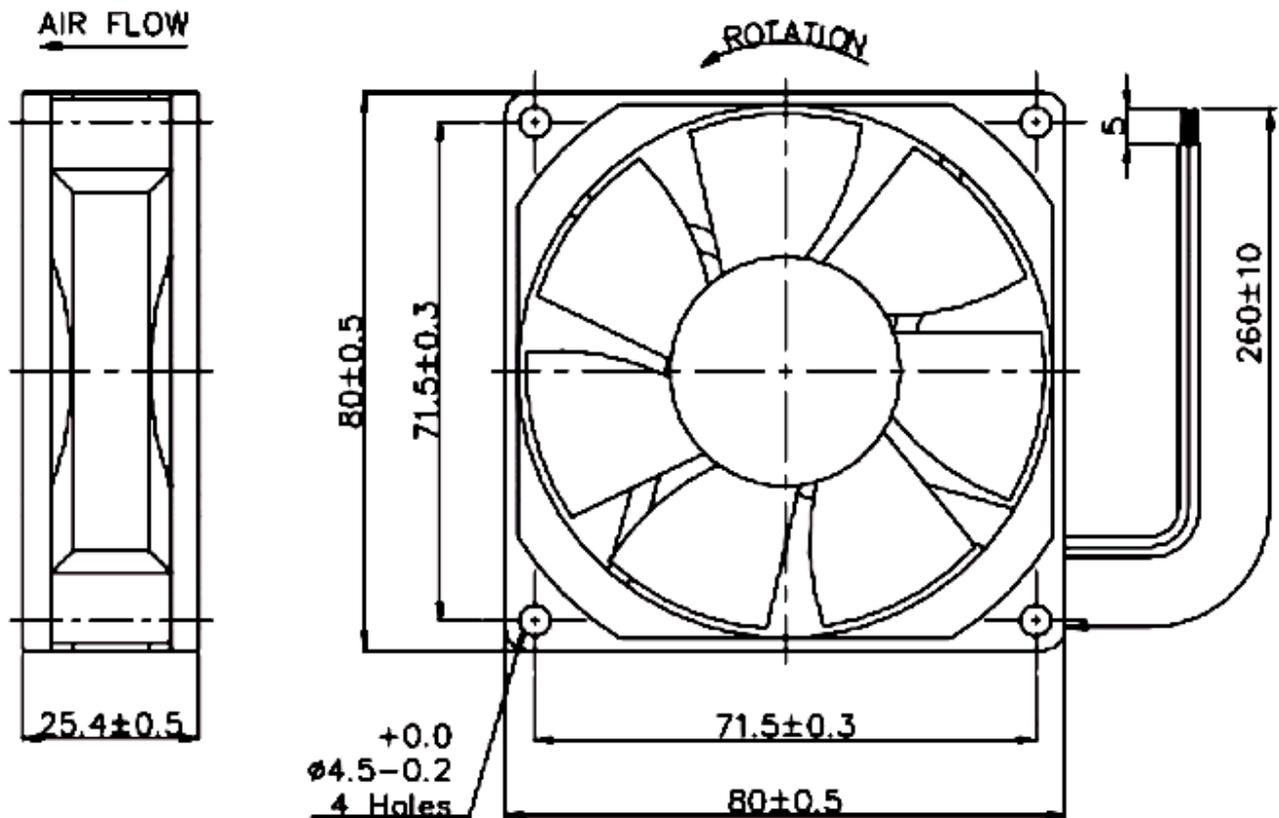


Рисунок 2.7 -Диаграмма охлаждения (рабочая точка указана на графике).

Таблица 2.1- Параметры вентилятора JF0825S1H

Размеры рамы,мм	80x80
Рабочее напряжение,В	12
Функциональность	вентилятор
Тип подшипника	Sleevebearing/Втулка скольжения
Частота вращения,об./мин.	3000
Ток,А	0.19
Шум,дБ	31
Производительность,м.куб./мин.	1.1
Толщина,мм	25
Производитель	Jamicon

2.5. Расчет дроссель-трансформатора.

Обратноходовой трансформатор имеет свойство, характерное только для этого типа трансформаторов, — способность за время прямого хода запастись энергией, на обратном ходу отдавая энергию в нагрузку. По сути, его можно назвать дросселем.

Из [11]:

1. Определяем требуемую от дросселя энергию

$$W_3 = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{3.24 \cdot 10^{-6} \cdot 37^2}{2} = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \quad , \quad (2.11)$$

где $I_m = 37 \text{ А}$ - максимальный ток в первичной обмотке.

2. Определяем коэффициент формы тока K_ϕ

$$K_\phi = I_m / I_0, \quad (2.12)$$

где I_0 - действующий ток в обмотке. Он равен:

$$I_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{и}}} \left(t \frac{I_m}{t_{\text{и}}} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{t^3 I_m^2}{3 t_{\text{и}}}} \Big|_0^{t_{\text{и}}} = \sqrt{\frac{1}{2 t_{\text{и}}} \frac{t_{\text{и}}^3 I_m^2}{3 t_{\text{и}}}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{6}} = \sqrt{\frac{37^2}{6}} = 15 \text{ А}. \quad (2.13)$$

Из (2.12) получаем $K_\phi = 1.41$.

3. Определяем требуемое произведение сечения сердечника на сечение окна:

$$S_c S_o = \left(\frac{2W_j \cdot 10^4}{B_m \cdot K_u \cdot K_j \cdot K_\phi} \right)^{1.14} = \left(\frac{2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{0.1 \cdot 0.4 \cdot 534 \cdot 1.41} \right)^{1.14} = 1.54 \text{ см}^4, \quad (2.14)$$

где K_j -коэффициент, характеризующий плотность, имеет размерность $A/\text{см}^2$ - равен $534 A/\text{см}^2$; K_u - коэффициент использования окна, равен примерно 0,4; максимальная рабочая индукция B_m для сердечников из материала феррит приниматься равной 0,1.

4. Выбираем из таблицы сердечников из магнитомягкого феррита MnZn[12] ближайший с большим значением $S_c S_o$ - 2.08 см^4

Сердечник выбрали марки Ш10х10, габаритные размеры представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Размеры сердечника

L, мм	H, мм	B, мм	l ₀ , мм	l ₁ , мм	h, мм	V, см ³
36,0	18,0	10,0	10,0	8,0	13,0	8,38

Тепловая поверхность для Ш-образного сердечника определяется по соотношению:

$$S_T = 2 H \cdot L + 2H \cdot S + S \cdot L + 2 \cdot l_1 (l_0 + 2l_1 + 2h) \quad (2.15)$$

Из (2.15) определим $S_T = 56.96 \text{ см}^2$;

Объем сердечника: $V_c = 8.38 \text{ см}^3$;

Плотность феррита $\gamma = 4.8 \text{ Г} / \text{см}^3$;

Масса сердечника Ш10х10: $M_c = 8.38 \cdot 4.8 = 40.22$.

5. Витки первичной обмотки:

$$W_1 = \frac{U_1}{S \cdot B_s} t_{н} = \frac{12}{10^{-4} \cdot 0.1} 10 \cdot 10^{-4} = 12 \text{ вит} \quad (2.16)$$

6. Плотность тока:

$$j = K_j (S_c S_o)^y = 534 \cdot 2.08^{-0.12} = 489 \text{ [A / см}^2\text{]} \quad (2.17)$$

7. Сечение провода первичной обмотки:

$$S_{m1} = \frac{I}{j} = \frac{15}{489 \cdot 2} = 0.015 \text{ см}^2, \quad (2.18)$$

где k_2 - коэффициент, учитывающий выполнение первичной обмотки в 2 провода.

Выбираем провод первичной обмотки из таблицы стандартных проводов. Для термостойкого провода ПЭТВ-1[13] имеем:

$$d_{mct1} = 1.4 \text{ мм}; S_{mct1} = 1.54 \text{ мм}^2; S_{cm} = 1.79 \text{ мм}^2; \\ \rho_{l1} = 113 \text{ мкОм / см}$$

d_{mct1} - диаметр стандартного провода первичной обмотки;

S_{mct1} - сечение стандартного провода первичной обмотки;

S_{cm} - сечение стандартного провода первичной обмотки с изоляцией;

ρ_{l1} - удельное сопротивление стандартного провода первичной обмотки.

8. Сопротивление первичной обмотки:

$$R_1 = l_{cp} W_1 \rho_{l1} / k_2 = 6.88 \cdot 12 \cdot 113 \cdot 10^{-6} / 2 = 0.0045 \text{ Ом}. \quad (2.18)$$

где $l_{срв}$ - средняя длина одного витка (из геометрии сердечника), равная 6.88см.

k_2 - коэффициент, учитывающие выполнение первичной обмотки в два провода.

9. Потери в меди первичной обмотки:

$$\Delta P_{м1} = I_1^2 R_1 = 15^2 \cdot 0.0045 = 1.01 \text{Вт}. \quad (2.19)$$

10. Число витков вторичной обмотки:

$$W_2 = W_1 \cdot k_{тр} = 12 \cdot 10 = 120 \text{витков}, \quad (2.20)$$

где $k_{тр}$ - коэффициент трансформации принятый нами в п.2.2.

11. Сечение меди провода вторичной обмотки:

$$S_{м2} = \frac{I_1}{k_2 j k_{тр}} = \frac{15}{2 \cdot 4.89 \cdot 10} = 0.0015 \text{см}^2, \quad (2.21)$$

Далее выбираем провод вторичной обмотки [13]. Для провода ПЭТВ-1 имеем:

$$d_{ст2} = 0,44 \text{мм}; S_{ст2} = 0,152 \text{мм}^2; S_{ст2} = 0,196 \text{мм}^2; \\ \rho_{12} = 1113 \text{мкОм} / \text{см}$$

$d_{ст2}$ - диаметр стандартного провода вторичной обмотки;

$S_{ст2}$ - сечение стандартного провода вторичной обмотки;

$S_{ст2}$ - сечение стандартного провода вторичной обмотки с изоляцией;

ρ_{12} - удельное сопротивление стандартного провода вторичной обмотки.

12. Сопротивление вторичной обмотки:

$$R_2 = l_{ср} W_2 \rho_1 / k_2 = 6.88 \cdot 120 \cdot 1113 \cdot 10^{-6} / 2 = 0.45 \text{Ом}. \quad (2.22)$$

13. Потери в меди вторичной обмотки:

$$\Delta P_{M2} = I_{2д}^2 R_2 = 1.5^2 \cdot 0.45 = 1.1 \text{ Вт.} \quad (2.23)$$

14. Общие потери в меди:

$$\Delta P_M = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} = 1,01 + 1,1 = 2,11 \text{ Вт} \quad (2.24)$$

15. Удельные потери в феррите. Для ферритов, предназначенных для работы на частотах 10...50 кГц можно использовать одно из соотношений:

$$P_{yo} = k \left(\frac{B_m}{B_{m0}} \right)^\alpha \left(\frac{f}{f_0} \right)^\beta = 20 \cdot \left(\frac{0.1}{0.2} \right)^{2.4} \left(\frac{50}{30} \right)^1 = 6.3 \text{ Вт/кг}, \quad (2.25)$$

где $k = 20 \text{ Вт/кг}$; $B_{m0} = 0.2 \text{ Тл}$; $\alpha = 2.4$; $\beta = 1$; $f_0 = 30 \text{ кГц}$.

16. Потери в сердечнике :

$$\Delta P_c = P_{yo} \cdot M = 6.3 \cdot 0.0402 = 0,25 \text{ Вт} \quad (2.26)$$

17. Суммарные потери в трансформаторе :

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_M + \Delta P_c = 2.11 + 0.25 = 2.36 \text{ Вт} \quad (2.27)$$

18. Потери на единицу поверхности:

$$\frac{\Delta P_\Sigma}{S_T} = \frac{2.36}{56.96} = 0,04 \text{ Вт/см}^2 \quad (2.28)$$

19. Перегрев поверхности при естественной конвекции:

$$\Delta T = \frac{\Delta P_\Sigma}{K_T S_T} = \frac{0.04}{1.2 \cdot 10^{-3}} = 33.3^\circ \text{C} \quad (2.29)$$

где $K_T = 1.2 \cdot 10^{-3} [\text{Вт} / \text{см}^2 \text{ } ^\circ \text{C}]$ - коэффициент теплоотдачи.

Для всех обратных сердечников требуется воздушный зазор, что бы удерживать постоянную составляющую магнитной индукции ниже точки насыщения. Зазор должен быть как можно меньше, чтобы минимизировать краевое магнитное поле вокруг него. Большое краевое поле увеличивает индуктивность рассеяния. Энергия накапливается в индуктивности сердечника, а большая величина индуктивности рассеяния препятствует передаче накопленной энергии в нагрузку. Еще одна проблема, связанная с большой величиной зазора, состоит в том, что в этом случае краевое поле будет взаимодействовать с обмотками, особенно если

вторичная обмотка намотана плоским проводником. Краевое поле создаст в обмотке вихревые токи, что приведет к возрастанию потерь.

В типовом Ш-образном сердечнике воздушный зазор, не предусмотрен. Поэтому нужно рассчитать его величину.

Справочные данные для сердечника Ш10х10:

$A_L = 1320 \text{ нГн}$ – коэффициент начальной индуктивности;

$\mu_i = 2500$ – начальная магнитная проницаемость сердечника (марки 2000НМ1);

$l_e = 83,71 \text{ мм}$ - эффективная длина магнитопровода сердечника.

Существует поправочный коэффициент, который позволяет вычислять индуктивность сердечника с зазором:

$$k = A_L \cdot \frac{N^2}{L_1} = 1320 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{12^2}{3,24 \cdot 10^{-6}} = 59 \quad (2.30)$$

где N - число витков первичной обмотки;

L_1 - индуктивность первичной обмотки.

Следующее уравнение дает зависимость k от магнитной проницаемости и длины магнитопровода:

$$k = 1 + (\mu_i \cdot G / l_e), \quad (2.31)$$

где G – требуемая величина воздушного зазора. Из (2.30) выразим G :

$$G = (k \cdot l_e - 1) \frac{1}{\mu} = (59 \cdot 83,7 \cdot 10^{-3} - 1) \frac{1}{2500} = 0,15 \text{ мм} \quad (2.32)$$

Т.к. зазора на пути силовой линии два, то немагнитная пластина разделяющая верхний и нижний магнитопровод должна быть половину от рассчитанной, т.е. 0,075мм .

Эскиз сердечника с воздушным зазором представлен на рисунке 2.8

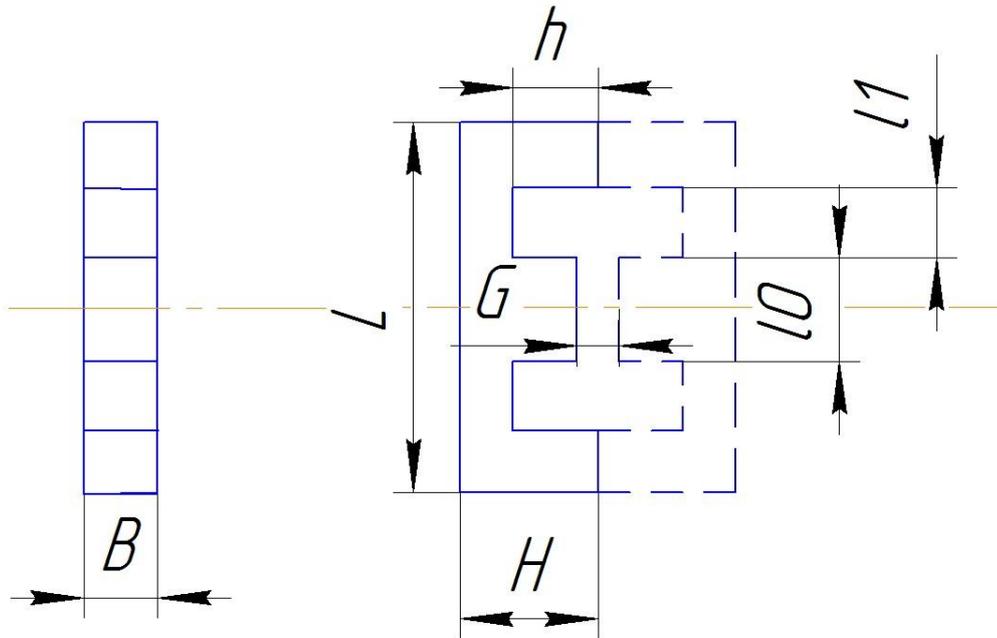


Рисунок 2.8. - Эскиз сердечника.

2.6 Разработка и расчет системы управления

2.6.1 Разработка структурной схемы системы управления

Система управления (рис.2.9) основана на принципе задания нужного режима работы путем ШИМ регулирования. Для нашей системы управления был выбран ШИМ – контроллер на базе микросхемы UC3845 [14] . Это чрезвычайно распространенный и дешевый чип, выпускаемый многими производителями.

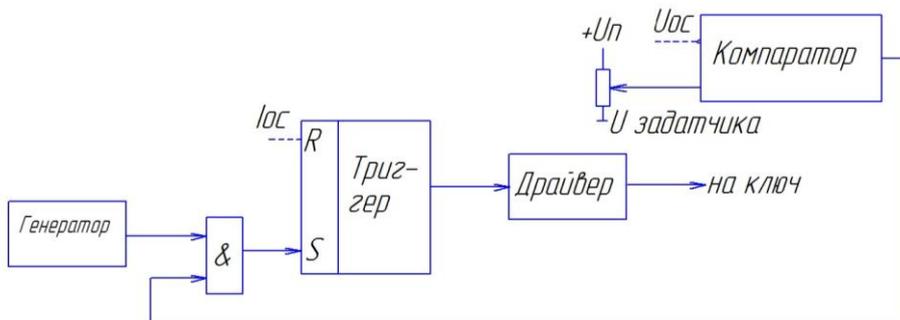


Рисунок 2.9 – Блок-схема системы управления ЗУЕНЭ

2.6.2 Разработка принципиальной схемы системы управления

Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 2.10

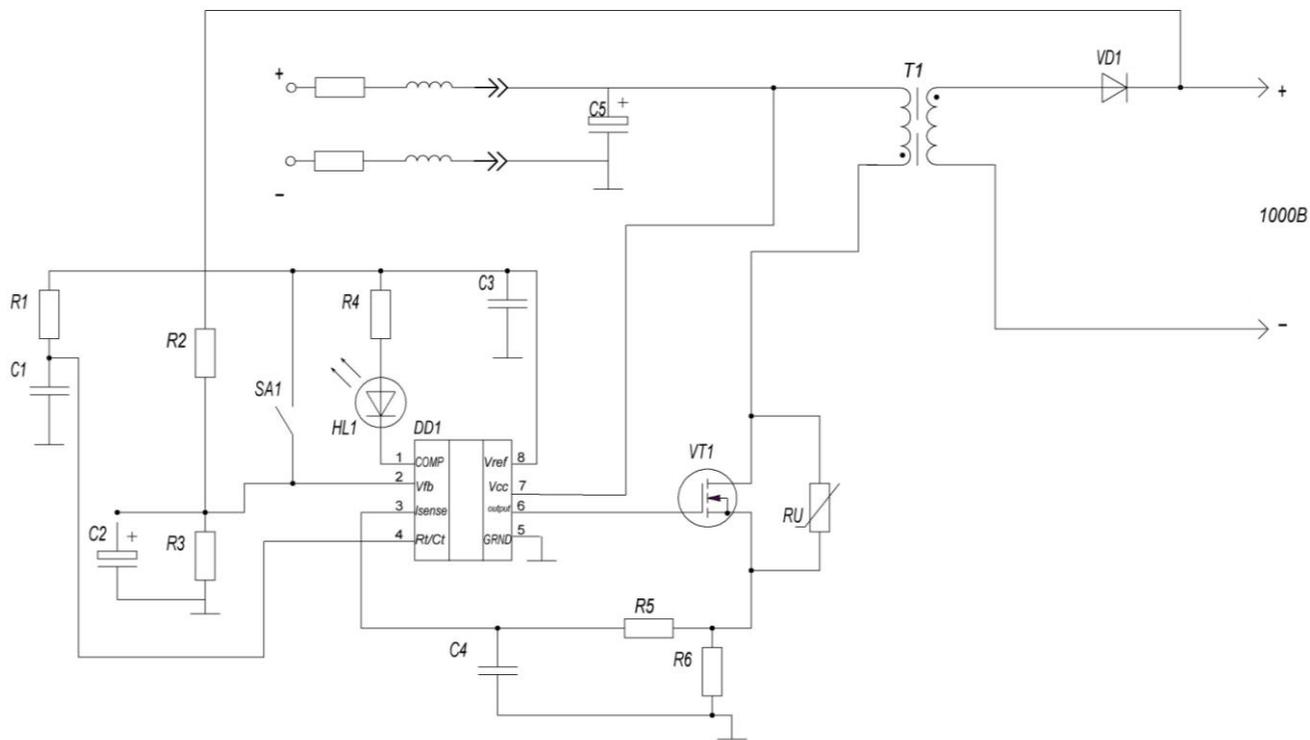


Рисунок 2.10 – Принципиальная схема устройства

Расчет элементов, задающих частоту генератора взяли из документации микросхемы.

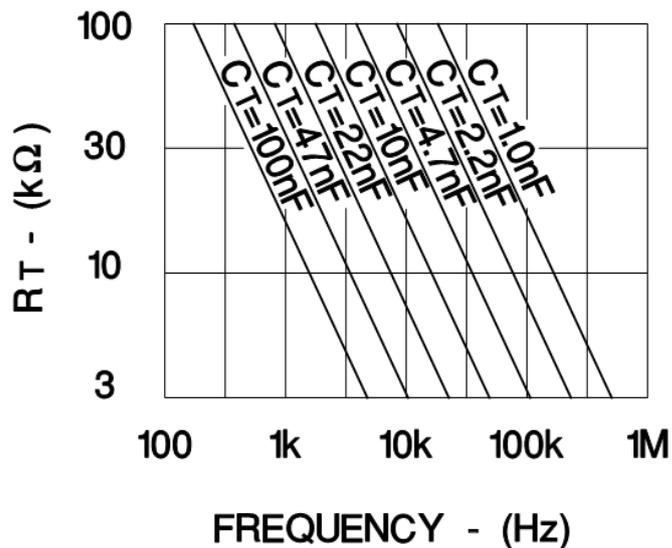


Рисунок 2.11. - График зависимости элементов задающего генератора.

По рисунку 2.11 видно, что для задания требуемой частоты в 50 кГц потребуются $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $C_1 = 4.7 \text{ нФ}$. По справочнику [15] можно выбрать:

R_1 – МЛТ – 0,125 – 10кОм $\pm 5\%$,

C_1 – К78-2-50В-5600 пФ $\pm 10\%$.

Для выбора резисторов R_2 и R_3 воспользуемся следующими соотношениями:

$$\frac{U_{srab}}{R_3} \cdot (R_2 + R_3) = U_{C_{max}} \quad (2.33)$$

$$P_{R_2} \approx \frac{U_{C_{max}}^2}{R_2} = 1 \text{ Вт} \quad (2.34)$$

где $U_{srab} = 2.5 \text{ В}$ – из документации микросхемы,

из (2.34) R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{C_{max}}^2}{1} = 10^6 \text{ Ом}$$

зная R_2 , из (2.33) найдем R_3 :

$$R_3 = \frac{U_{srab} \cdot R_2}{U_{C_{max}} - U_{srab}} = \frac{2.5 \cdot 10^6}{1000 - 2.5} = 2506 \text{ Ом},$$

По справочнику:

R_2 – МЛТ – 0.5 Вт – 1 МОм $\pm 5\%$,

R_3 – МЛТ – 0.25 Вт – 2.7 кОм $\pm 5\%$.

Теперь зная R_3 , (2.35) можем выразить C_2 .

$$\tau = R_3 \cdot C_2 > t_{ин} \quad (2.35)$$

τ должна быть много больше $t_{ин}$, примем τ на порядок больше, C_2 равно:

$$C_2 = \frac{10 \cdot t_{ин}}{R_3} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2500} = 40 \text{ нФ}.$$

Из справочника [16] выбрали конденсатор:

C_2 – К10-17Б-25В-0.047 мкФ $\pm 10\%$.

Светодиод для индикации зарядки был выбран следующей марки [17]:

HL1-КИПД 66 А-К.

Зная диод – его прямой ток и напряжение $i_{HL1} = 5\text{мА}$ и $V_{HL1} = 2\text{В}$ соответственно, рассчитаем резистор R4:

$$R_4 = \frac{V_{ref} - V_{HL1}}{i_{HL1}} = \frac{5 - 2}{5 \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Ом} \quad (2.36)$$

Из справочника резистор:

R4-МЛТ-0,125-600Ом±5% .

Конденсатор С4 выбрали согласно рекомендации:

С4 : К73-17-63В-0,1 мкФ.

Выбор питающего кабеля.

Выбрали кабель [18] марки **SCY260** сечением $S=6,0 \text{ мм}^2$, диаметр жилы $d=2,8$ мм, удельное сопротивление $R_l=0,0029\text{Ом/м}$.

При номинальной мощности работы зарядного устройства $P=W/t_3=500/5=100\text{Вт}$, ток потребления от аккумулятора $I=P/E=100/12=8,3$ А. При разрядке и допустимом снижении до $E=10 \text{ В}$, $I=P/E=100/10=10\text{А}$. В этом режиме падение на проводах от аккумулятора до зарядного устройства не должно просаживаться более чем на 5-10 %, т.е. $U=0,05\dots 0,1 \text{ В}$.

Для этого нужно чтобы суммарная максимальная длина обоих проводов L_{max} была:

$$L_{\text{max}}=U/R_l=(0,05\dots 0,1)/0,0029=17\dots 34 \text{ м.}$$

В реальности из практических соображений суммарную длину более 4 метра или 2 метра в пересчете на двойной кабель делать не стоит.

Суммарное сопротивление кабеля при $L=2\text{м}$ составит $R=2LR_l=4*0,0029=0,011$ Ом.

В виду отсутствия информации по соотношению межосевого размера проводников в кабеле b и его диаметра d , приняли $b=d$, что соответствует случаю непосредственного контакта проводов, тогда индуктивность:

$$L = 0,92 \lg(2b/d) = 0,92 \lg\left(\frac{2d}{d}\right) = 0,28 \text{ мкГн/м.}$$

Тогда полная индуктивность провода

$$L_s = L * 2 = 0,56 \text{ мкГн.}$$

Где b - межосевое расстояние, d - диаметр жилы

Сопротивление для переменного тока на частоте 50 кГц, будет составлять

$$Z = \sqrt{(2\pi fL)^2 + R^2} = \sqrt{(2\pi * 50000 * 0,56 * 10^{-6})^2 + 0,011^2} = 0,170\text{м.}$$

В качестве основного управляющего элемента выбрали микросхему UC3845. ИМС серии UC38х— это специализированные контроллеры широтно-импульсной модуляции с постоянной рабочей частотой. Они предназначены для применения в импульсных преобразователях напряжения и источниках питания с минимальным числом внешних компонентов. Микросхемы включают: генератор с внешней времязадающей RC-цепью, схему термокомпенсации, компаратор сигнала считывания тока, усилитель сигнала ошибки (цепь обратной связи по напряжению), мощный выходной каскад с возможностью непосредственного подключения к силовым МДП-ключам, систему защиты от понижения напряжения и превышения токового режима. Отличия микросхем в серии — в пороге срабатывания системы блокировки при понижении напряжения. Микросхемы размещены в 8-ми выводном корпусе DIP, а так же в 14-ти выводном SOP, у них также имеются отдельные выводы для подачи питания на выходной каскад. Параметры микросхемы UC3845 представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3.-Параметры микросхемы UC3845

	UC1845	UC3845	UC3845
Управление	Ток	Ток	Ток
Duty Cycle (Max) (%)	100	100	100
Частота (Max) (кГц)	450	450	450
UVLO Thresholds On/Off (V)	16/10	16/10	16/10
Корпус	14CFP, 20LCCC, 8CDIP	14SOIC, 8PDIP, 8SOIC	14SOIC, 8PDIP, 8SOIC
Мощность (Min) (Вт)			30
Мощность (Max) (Вт)			350
(Min) (V)	10	10	10
Vin (Max) (V)	30	30	30
Напряжение (Min) (V)			0.5
Regulated Outputs (#)	1	1	1
Рабочая температура (°C)	-55 to 125	-40 to 85	0 to 70

Структурная схема UC3845 представлена на рисунке 2.11.

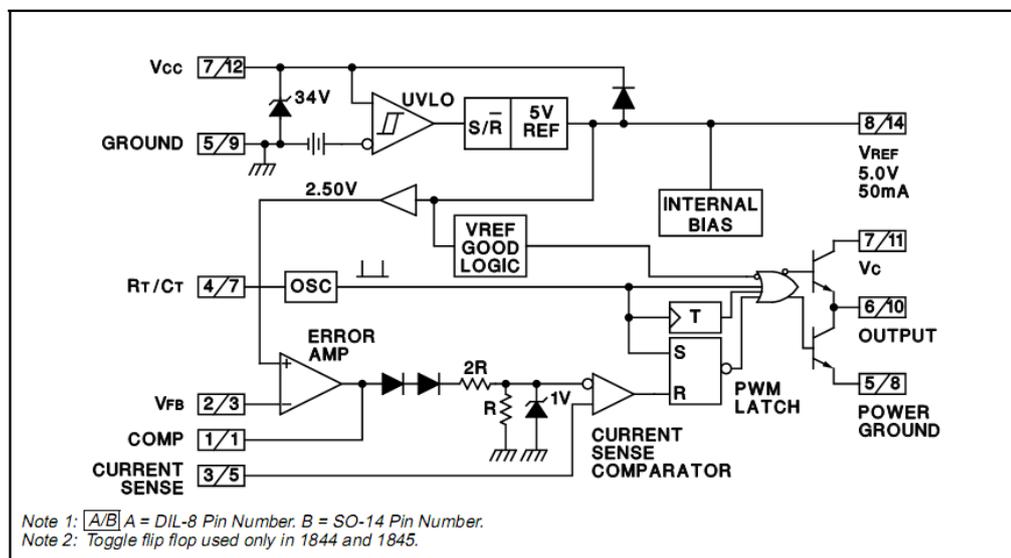


Рисунок 2.12.-Структурная схема UC3845

Цоколевка микросхемы показана на рисунке 2.12.

**DIL-8, SOIC-8 (TOP VIEW)
N or J Package, D8 Package**

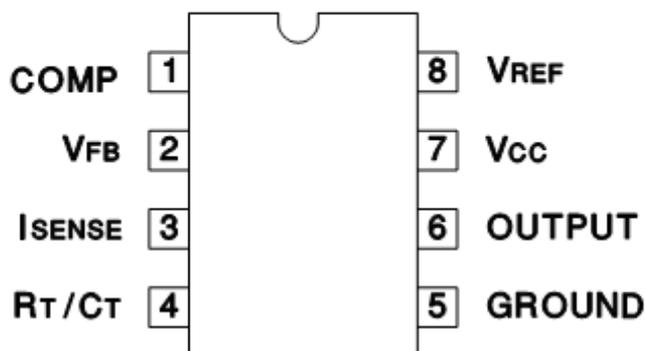


Рисунок 2.12.- Цоколевка микросхемы UC3835.

Расчет элементов обратной связи по току :

Из параметров микросхемы взяли $U_{nopR6} = 1В$, зная это и максимальный ток транзистора можем $I_{mvt} = 37$ вычислить цепь ОС по току

$$I_{mvt} = \frac{U_{nopR6}}{R_6} \quad (2.39)$$

из 2.39 выразим сопротивление шунта - R_6 :

$$R_6 = \frac{U_{nopR6}}{I_{mvt}} = 0.02 \text{ Ом}$$

Мощность $P = I_d^2 * R_6 = 15^2 * 0,02 = 4,5Вт$.

Подобрали малоомный шунтирующий резистор R_6 :

R6-QIP-5-0,03 Ом $\pm 5\%$.

Конденсатор C4 выбрали согласно рекомендации:

C4 : K73-17-63В-0,1 мкФ.

$$\tau = C_4 \cdot R_5 = \frac{T_{ком}}{10} \quad (2.40)$$

Выражение 2.40 показывает зависимость между постоянной по времени и времени коммутации – по рекомендации они различаются на порядок. Следовательно из 2.40 можем выразить R_5 :

$$R_5 = \frac{T_{ком}}{10 \cdot C_5} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом.}$$

Из справочника выбрали резистор R5:

R5-МЛТ-0,125-10Ом±10%.

Расчет емкости C5.

Энергия, запасаемая в C5 должна быть много большей по сравнению с максимальным запасом энергий в L1, для возможности импульсного отбора из нее на этапе формирования импульсного первичного тока:

$$\frac{C_5 \cdot U^2}{2} \gg \frac{L_1 \cdot I_m^2}{2} \quad (2.42)$$

из 2.42 выразим C5(по рекомендации руководителя разницу между энергиями взяли в 2 порядка):

$$C_5 = 100 \frac{L_1 \cdot I_m^2}{U^2} = 100 \frac{3,24 \cdot 10^{-6} \cdot 37^2}{12^2} = 3080 \text{ мкФ.}$$

Из справочника [19] выбрали:

C5: В41303J54784700мкФ-25В.

Сопротивление ESR этого конденсатора составляет 0,067 Ом на частоте 10кГц, т.е. при закорачивании на входное напряжение $E=12\text{В}$ ток может достигать $I=E/R=12/0,067=179\text{А}$, следовательно, он способен выдавать меньший рабочий ток $I_m=37\text{А}$.

Расчет снаббера.

Эффективным решением по защите ключа от перенапряжений являются варисторы, которые обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, имеют меньший ток утечки и расширенный диапазон рабочих напряжений.

Варистор — это резистор, сопротивление которого зависит от приложенного к нему напряжения. Он обладает симметричной вольт-амперной характеристикой. Значение сопротивления уменьшается с повышением напряжения и при

возникновении перенапряжения происходит резкое уменьшение сопротивления (режим «короткого замыкания»). Включенный параллельно с электронным прибором или схемой – в нашем случае параллельно ключу VT - которую необходимо защитить, варистор служит в качестве низкоомного шунта, ограничивая напряжение и предотвращая его дальнейшее увеличение. Варистор защищает от перенапряжений всех видов и предохраняет таким образом электронное оборудование от выхода из строя. Обладая временем срабатывания полупроводникового защитного диода или стабилитрона, металлооксидный варистор является одним из наиболее совершенных защитных устройств.

Максимальное напряжение сток-исток VT составляет 170 В. Для снаббера выберем несколько меньшее значение напряжения.

Мощность, выделяемая в снаббере, определяется практическим методом, так как на этапе проектирования невозможно оценить индуктивность рассеяния в первичной обмотке.

Согласно приведенным выше параметрам, выбрали варистор [20]:

R_v FNR-20K101, 10%, $E_{max}=30$ Дж. На максимальное напряжение 165 В при импульсном токе 20А (т.е. меньше 170 В допустимого для транзистора), рабочее напряжение 85 В.

2.7 Моделирование ЗУЕНЭ

Цель моделирования заключается в проверке правильности расчетов электрических процессов в схеме с уменьшением числа допущений до минимума. Таким образом, в результате расчета предполагается уточнить параметры некоторых элементов схемы и уточнить параметры работы схемы в разных режимах. В качестве программы для моделирования была выбрана версия Simulink/Matlab R2014a [21].

В процессе моделирования необходимо ответить на вопросы:

1. Обеспечивает ли заряд до напряжения схема до напряжения $U_c=1000V$ за время $t=5c$?
2. Обеспечивает ли заряд до напряжения схема до напряжения $U_c=1000V$ за время $t=5c$ при снижении напряжения АКБ до $E=10V$?
3. Что нужно для обеспечения заданных режимов?
4. Каков КПД схемы?
5. Обеспечивает ли защиту транзистора демпфирующая цепочка?
6. В каком режиме работает АКБ?

Рассмотрение этих вопросов начнем с анализа схемы при $E=12 V$.

На рисунке 2.9 представлена расчетная схема зарядного устройства.

Которая включает систему управления, силовую часть и блоки измерения параметров.

Система управления состоит из задающего генератора Pulsegenerator 2 с установленной частотой коммутации 50 кГц, блоком отключения по току состоящего из : датчика тока транзистора Multimeter4, задания тока ограничения в 37 А, выполненное на блоке Constant1, RSTриггера FlipFlop1.

Силовая часть состоит из транзистора Mosfet, дросселя имитирующего трансформатор-дроссель SeriesRLCBranch4 $cL=3.24\text{мкГн}$, вторичная часть пересчитана в первичную: так выходная емкость представлена SeriesRLCBranch1 при этом емкость с учетом коэффициента трансформации задана $C=C*k_{\text{тр}}^2=1000*100=100000\text{мкФ}$. В схему входит силовой диод с приведенным на первичную сторону сопротивлением и пороговым напряжением $R=R/k_{\text{тр}}^2=0.04/100=0,0004 \text{ Ом}$, $U=U/k_{\text{тр}}=0,8/100=0,008 \text{ Ом}$. В трансформатор введена паразитная индуктивность рассеяния обмотки SeriesRLCBranch3 $L=0.2\text{мкГн}$.

Защитная цепочка на импульсном ограничителе заменена источником напряжения $E=150V$ и диодом Diode 1, т.е. ограничитель открывается при закрытии транзистора и напряжение на нем при этом составляет 150 В. Сопротивление входных проводов отражено сопротивлением SeriesRLCBranch2 $R=0,011 \text{ Ом}$.

Измерители размещенные на поле расчетной схемы позволяют мерить Score:

Multimeter1 напряжение на емкости приведенной на первичную сторону, для получения истинного значения его умножают блоком Gain1 на $k_{tr}=10$, Multimeter2 показывает ток емкости, для определения среднего тока на каждом интервале коммутации его показания пропущены через апериодическое звено (усредняющее) с тау процесса $T=1e-3$ с большим, чем период коммутаций $T=1/50000=2e-5$ с. Так же Score выводит усредненную мощность потребления из АКБ, это достигается усреднением тока потребления АКБ Multimeter6 апериодическим звеном TransferFcn3 при тау $T=1e-3$ с умножением этого тока на напряжение АКБ $E=12$ В. Дополнительно для определения КПД находится интеграл W_{vh} мощности потребления АКБ за весь процесс заряда, этому интегралу физически соответствует энергия отданная АКБ в процессе заряда.

Серия расчетов была проведена для напряжения $E=12$ В и максимального тока транзистора $I_{VT_max}=37$ А. Диаграммы процессов приведены на рисунках 2.13-2.15.

Из диаграмм при $E=12$ В можно сделать выводы:

- Заряд АКБ до 1000В обеспечивается за время (4,8 с) немного меньше, чем 5 с.
- Напряжение на транзисторе не превышает (162 В) допустимого 170 В
- Режим заряда близок режиму постоянства мощности (125 Вт)
- КПД схемы $KPD=W_c/W_E=500/627.2*100=74,4$ %.

Были также проанализированы режимы и параметры схемы при уменьшении напряжения АКБ до $E=10$ В при допустимом разряде АКБ параметры рисунки 2.16-2.20:

- Заряд АКБ до 1000В обеспечивается за время (4,8 с) немного меньше, чем 5 с.
- Напряжение на транзисторе не превышает (162 В) допустимого 170 В
- Режим заряда близок режиму постоянства мощности (155 Вт)
- Средняя мощность в ограничителе 13,5 Вт
- Средняя мощность статических потерь в транзисторе 1,1 Вт .
- КПД схемы $KPD=W_c/W_E=500/761.4*100=65,7$ %.

Таким образом, схема работает в соответствии с техзаданием. Статические потери в транзисторе 1 Вт меньше, чем расчетные 1,4 Вт, однако на фоне динамических потерь которые много больше 1,4 Вт коррекции радиатора не требуется.

Обобщая сказанное коррекции параметров системы питания не требуется.

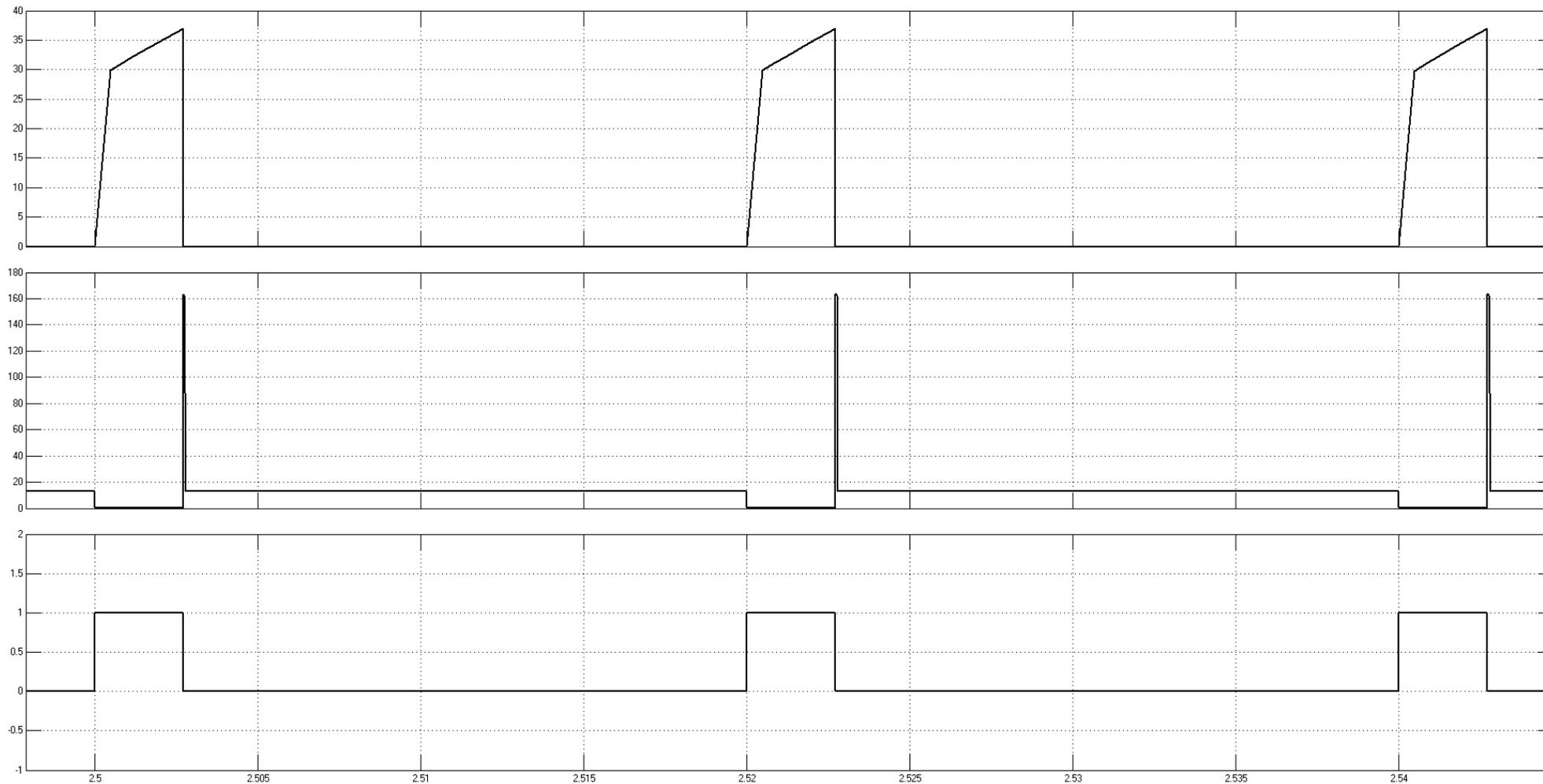


Рисунок 2.14 - Временные диаграммы при $E=12\text{В}$ и $I_{VT_max}=37\text{ А}$, режим непрерывных токов (сверху вниз): ток транзистора $i_{VT},\text{А}$, напряжение на транзисторе $U_{VT},\text{В}$, логический сигнал управления транзистором.

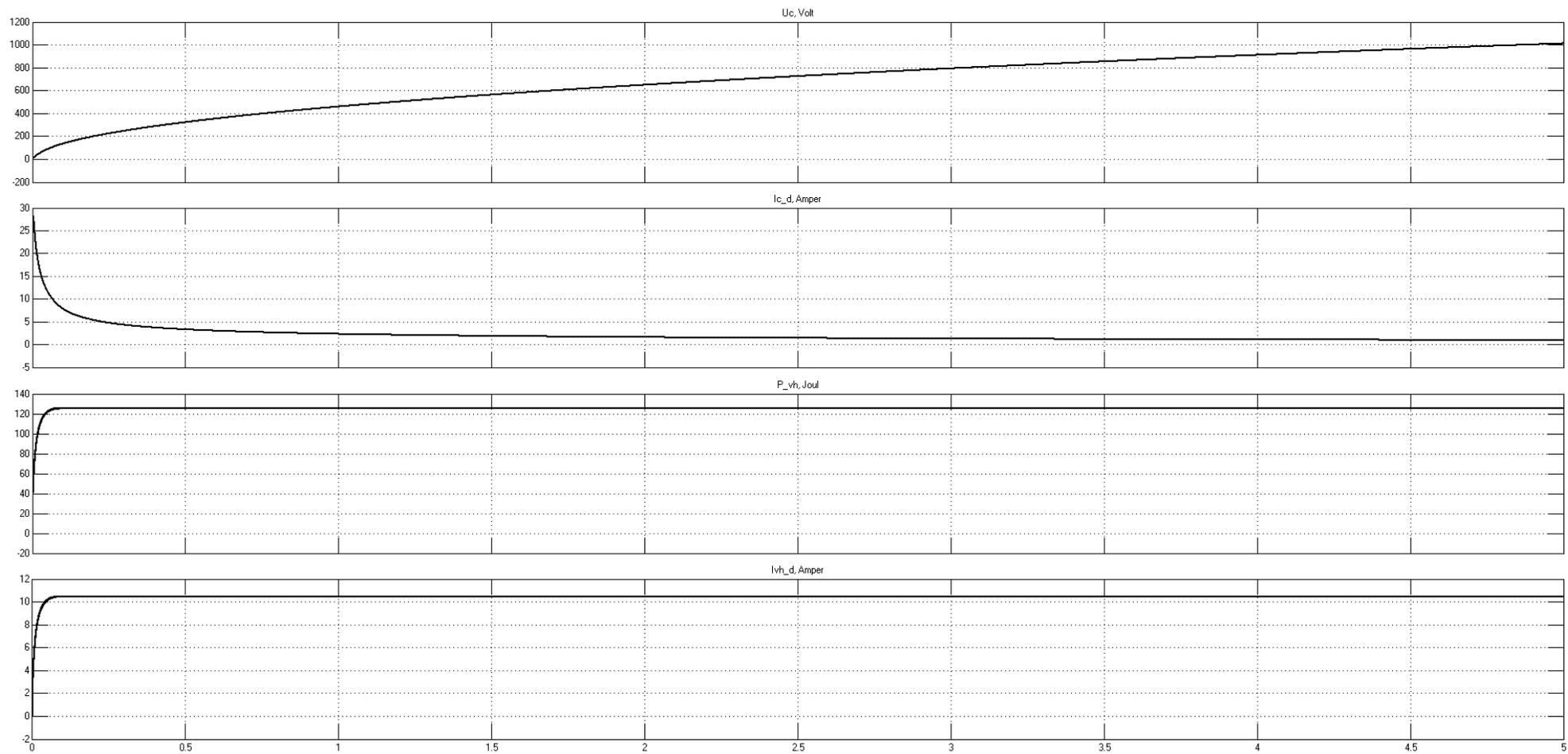


Рисунок 2.15 - Временные диаграммы при $E=12\text{В}$ и $I_{VT_max}=37\text{ А}$ (сверху вниз): напряжение на емкости $U_c, \text{В}$, ток емкости $I_c, \text{А}$, усредненная на периоде коммутации мощность, потребляемая из АКБ, Дж, усредненный на периоде коммутации ток АКБ, А.

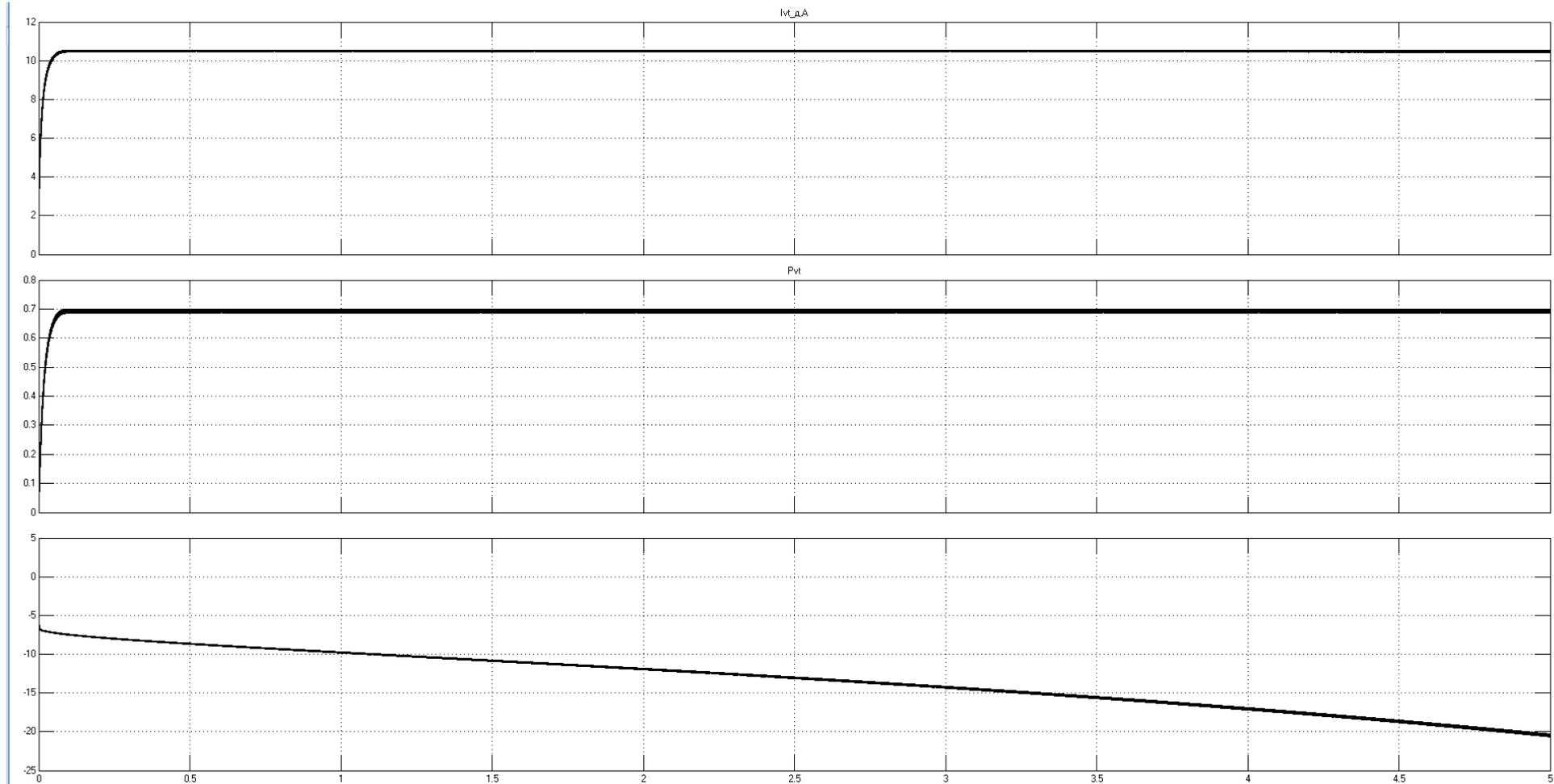


Рисунок 2.16 - Временные диаграммы при $E=12\text{В}$ и $I_{VT_max}=37\text{ А}$ (сверху вниз): усредненный напериоде коммутации ток ограничителя $I_{vt},\text{А}$, статическая мощность потерь в транзисторе $P_{vt},\text{Вт}$, мощность в ограничителе $P,\text{Вт}$.

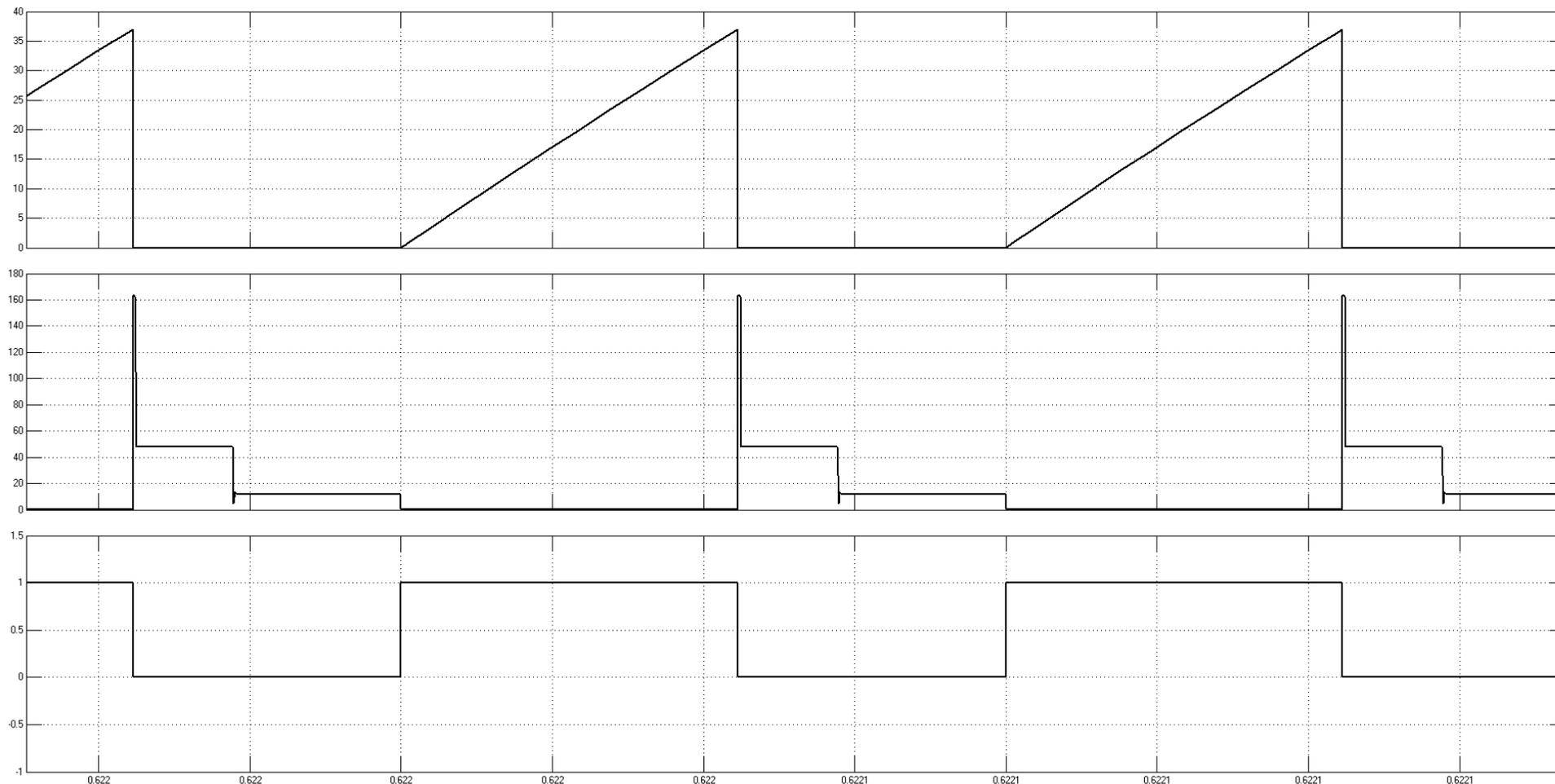


Рисунок 2.17 - Временные диаграммы при $E=12\text{В}$ и $i_{VT_max}=37\text{ А}$, режим прерывистых токов(сверху вниз): ток транзистора i_{VT} ,А, напряжение на транзисторе U_{VT} ,В, логический сигнал управления транзистором.

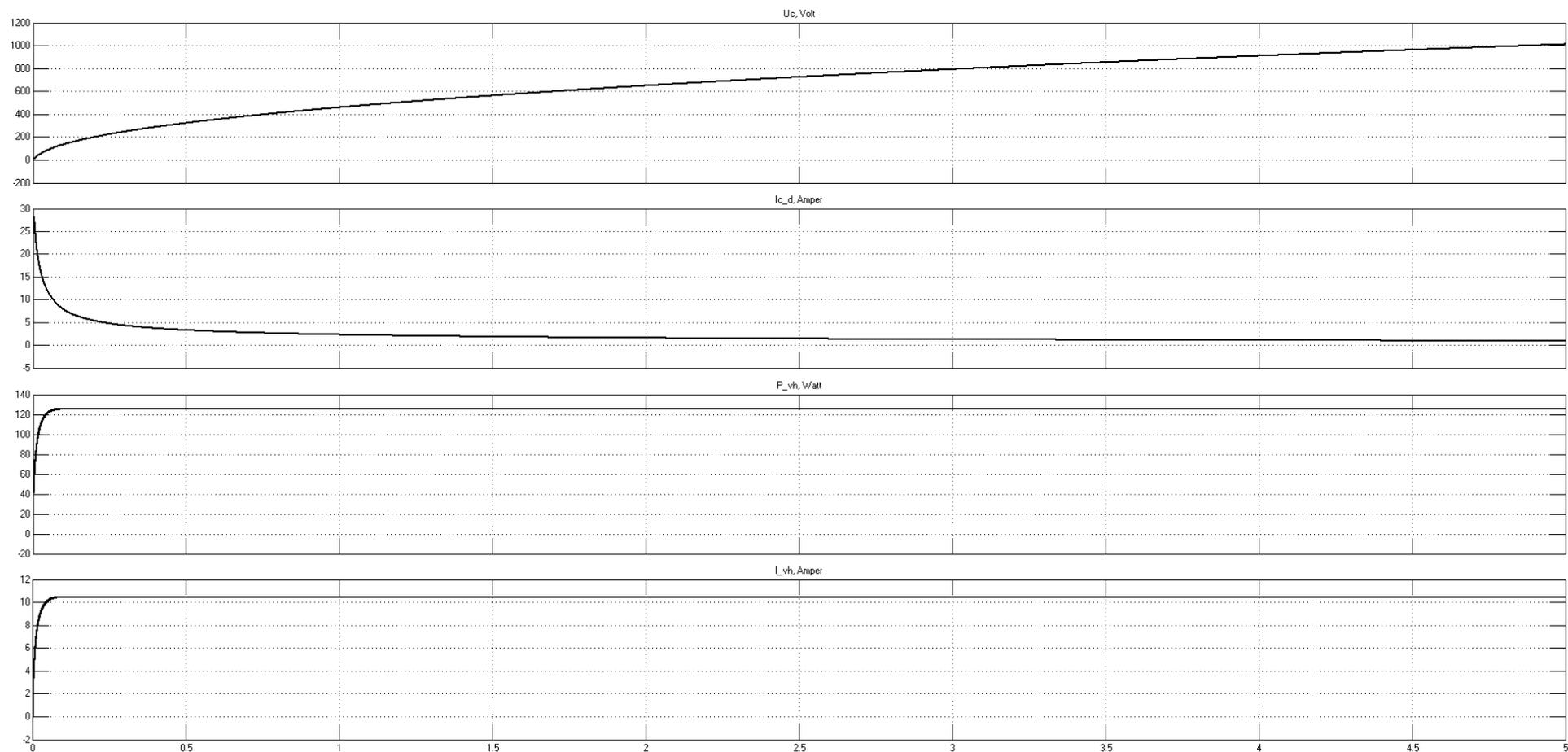


Рисунок 2.18 - Временные диаграммы при $E=10\text{В}$ и $I_{VT_max}=37\text{ А}$ (сверху вниз): напряжение на емкости $U_c, \text{В}$, ток емкости $I_c, \text{А}$, усредненная на периоде коммутации мощность, потребляемая из АКБ, Дж, усредненный на периоде коммутации ток АКБ, А.

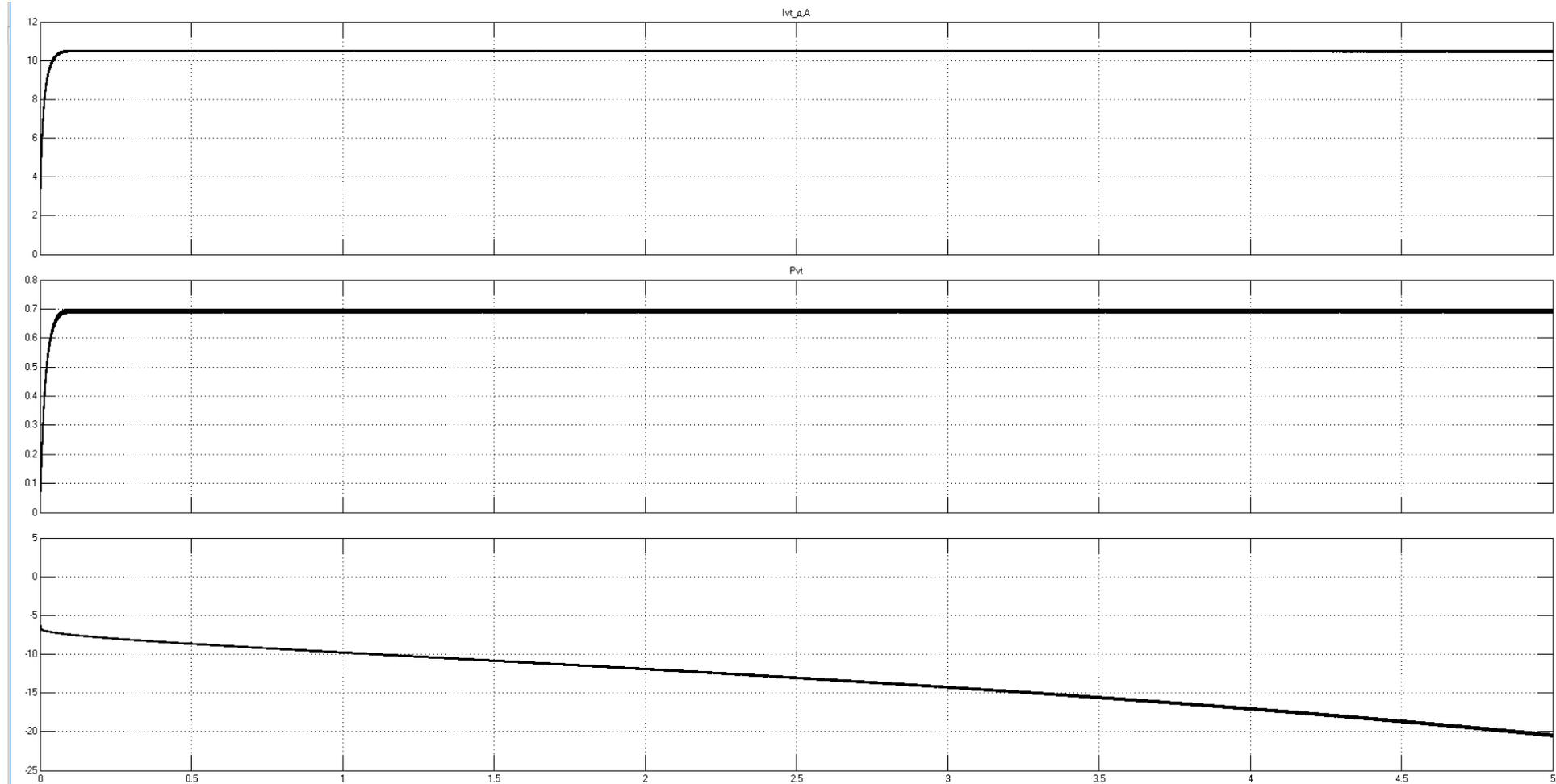


Рисунок 2.19 - Временные диаграммы при $E=10\text{В}$ и $I_{VT_max}=37\text{ А}$ (сверху вниз): усредненный на периоде коммутации ток ограничителя $I_{vt},\text{А}$, статическая мощность потерь в транзисторе $P_{vt},\text{Вт}$, мощность в ограничителе $P,\text{Вт}$.

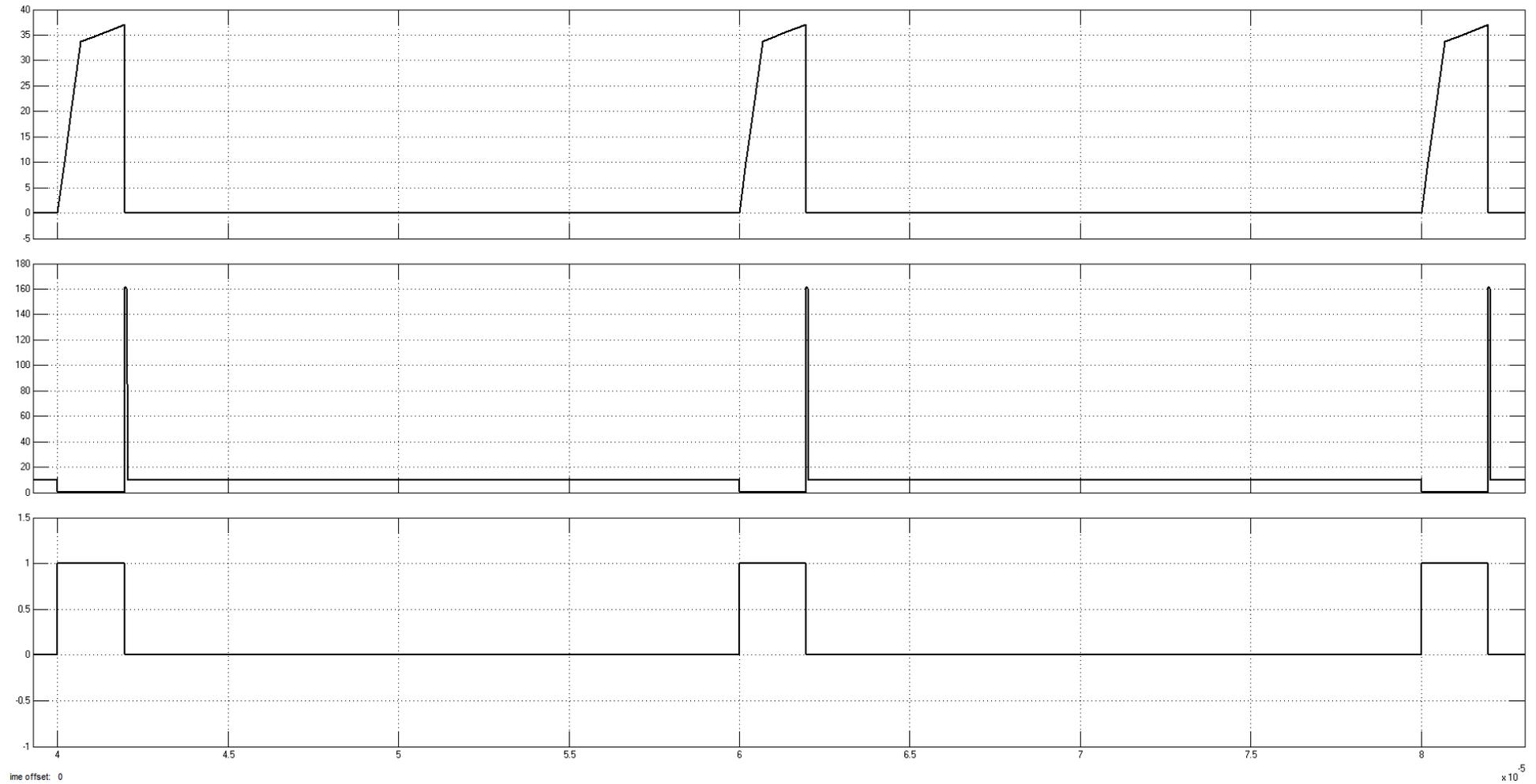


Рисунок 2.20 - Временные диаграммы при $E=10\text{В}$ и $I_{VT_max}=37\text{ А}$, режим непрерывных токов (сверху вниз): ток транзистора $i_{VT},\text{А}$, напряжение на транзисторе $U_{VT},\text{В}$, логический сигнал управления транзистором.

3 Конструкторско-технологический раздел

Согласно принципиальной схеме разработали печатную плату для системы управления зарядным устройством.

Разработка печатной платы сводится к нескольким этапам:

1. Сбор данных по размерам установленных элементов.
2. Сбор данных о необходимых размерах отверстий под устанавливаемые элементы или конфигурацию контактных площадок (с случае планарного размещения элементов).
3. Разводка конфигурации печатных проводников.
4. Перевод конфигурации печатных дорожек на фольгированную плату с целью защитить эти участки от травления.
5. Травление платы.
6. Осверловка отверстий.
7. Лужение поверхности дорожек припоем.
8. Припаивание элементов.
9. Выходной тестовый контроль устройства.
10. Корпусирование

Первый и второй этапы по проектированию печатной платы выполняется с использованием конструкторской документации на используемые элементы. Эту информацию можно свободно найти у изготовителей элементов, как правило они размещают ее в виде PDF файлов на своих сайтах. В данных файлах, обычно в конце, приводятся чертежи корпусов элементов с указанием размеров и особенностей их пайки. Также часто даются рекомендации на использование этих элементов в виде готовых разведённых фрагментов на поверхности печатной платы. Это делается для элементов, размещение которых имеет особенности, влияющие на устойчивость работы устройства. Следует учитывать при выборе конкретного элемента, что часто производитель дает разные корпуса для одной и той же

микросхемы. Таким образом, это могут быть как планарные корпуса, так и DIP корпуса, вторые удобнее паять в ручную, но они занимают больше места.

Третий этап проектирования платы может производиться одним и двумя способами. Вручную или с использованием автоматизированных трассировочных программ типа diptrace, pcad и т.д. При использовании ручного метода удобно расставлять элементы на поверхности заранее разлинованной бумаги в соответствии с шагом сетки разводки элементов, обычно это 2,5 или 1,27 мм в зависимости от используемых корпусов. Далее с помощью карандаша для удобства редактирования наносится линии такой вид разводки. При таком способе эти элементы разводят на односторонней печатной плате так как разводка двухсторонней платы становится более сложным занятием. При использовании автоматизированного метода последовательность действий для выполнения трассировки состоит из:

- Разработки примитивов элементов с учетом документации на эти элементы или использования готовых библиотек с необходимыми элементами.
- Выбора трассировки, включающие в себя: количество слоев разводки ширину трассировочных проводников, типы контактных площадок и диаметры под сверловку, размеры печатной платы, а также типа трассировщика параметров.
- Создания связи между конструктивными элементами и их схемным изображением.
- Составления рабочей принципиальной схемы из элементов.
- Запуска трассировщика, выполняющего разводку печатных проводников
- Анализа результатов трассирования.
- В случае необходимости ручная доводка результатов и (или) повторный запуск трассировщика с новыми условиями разводки.

Четвёртый этап может выполняться различными методами рассмотрим один из них - метод с помощью использования специального фоторезиста. Фоторезист обычно продается в отделах радиодеталей в виде аэрозольных баллончиков. Для конфигурации печатных проводников на поверхности фольгированного стеклотекстолита необходимо для начала подготовить и обезжирить фольгированную поверхность. Для этого можно использовать мелкие абразивные порошки, продающиеся в хозяйственных магазинах. С помощью специальной губки смочив поверхность и посыпав абразивное вещество легкими движениями необходимо зачистить поверхность. Далее не оставляя отпечатков пальцев на поверхности высушить стеклотекстолит, легкими распыляющими движениями нанести аэрозоль фоторезиста на поверхность стеклотекстолита необходимой стороной(ы). Дать просохнуть фоторезисту в темном помещении. Используя прозрачную пленку для печати на лазерных принтерах напечатать на 2 листах инвертированное изображение печатных плат (фотошаблон) и соединить оба листа так, чтобы рисунки просвечивающиеся в свете совпадали, склеить листы между собой. После того как фоторезист высохнет необходимо наложить на печатную плату фотошаблон и проэкспонировать поверхность в ультрафиолетовых лучах в соответствии с инструкцией. После экспонирования изображения печатную плату необходимо погрузить в раствор щелочи едкого натра или едкого калия. Время выдержки в растворе определяется экспериментально появлением контрастного изображения съэкспонированного фоторезиста.

Далее необходимо промыть в проточной воде печатную плату и погрузить в раствор хлорного железа, разбавленного в соответствии с инструкцией хлорное железо необходимо предварительно подогреть до 30-40 градусов. Покачивая кювету с печатной платой необходимо контролировать процесс вытравливания металлической меди после и после полного вытравливания меди с поверхности необходимо прекратить процесс вытравливания и промыть ее в проточной воде. На последнем этапе необходимо удалить с поверхности печатной платы фоторезист с помощью растворителя.

Шестой этап выполняется с помощью ручной дрели с микропатроном, установленным в специальное сверлильное устройство, которое может подавать сверло в вертикальной оси. Диаметр отверстия сверла определяется диаметром выводов элементов.

Седьмой этап выполняется с помощью использования припоя, спиртоканифольного раствора и паяльника. Предварительно высушенную поверхность печатной платы необходимо промазать спирто-канифольный раствора с помощью кисточки. Расплавить на поверхности паяльника небольшое количество припоя и протянуть его вдоль печатных проводников. Этот способ годится для печатных проводников, ширина которых не превышает 5 миллиметров. Для широких полигонов необходимо использование приборов подающих поток горячего воздуха, тогда лужение производят с помощью медной оплетки, на которую кладут небольшой кусочек припоя и далее горячим воздухом расплавляют припой и распределяется равномерно с помощью оплетки на всю поверхность. Необходимо помнить, что долгий прогрев проводников может приводить к температурному отслаиванию их от поверхности стеклотекстолита.

Для выполнения восьмого этапа элементы, которые предназначены для крепления сквозит плату последовательно размещать в соответствующих отверстиях и припаивают паяльником со стороны монтажа. Перед установкой элементов на плату необходимо правильно сформировать формы выводов используя пинцет и кусачки. Со стороны печатных проводников используя паяльник спирто-канифольный раствор и припой капельно припаять каждый вывод. После пайки необходимо лишнюю длину выводов укоротить. В случае элементов поверхностного монтажа можно использовать паяльную пасту, которая наносится на плоские контактные площадки затем SMD-элемента устанавливается на эти площадки. Пайка производится, либо паяльником, при этом пинцет должен прижимать элемент поверхности платы, либо установку проводят прибором производящим поток горячего воздуха, тогда элемент после расплава паяльной пастой сам займет правильное положение в результате поверхностного натяжения расплавленного припоя.

Девятый этап необходимо производить либо с использованием специального тестирующего оборудования, либо с использованием осциллографа, источников питания и тестера исходя из принципов работы схемы. На этом этапе может выясниться, что некоторые элементы неисправны для исключения подобного необходимо производить входной контроль впаиваемых элементов.

Десятый этап предполагает уже в наличии готового корпуса и предусмотренных отверстий печатной плате под установку ее в корпусе.

В случае использования высоковольтных элементов и для предотвращения поверхностного пробоя необходимо покрыть элементы специальным изолирующим лаком, а в некоторых случаях между элементами на плате необходимо сделать прорез платы.

Заключение

В результате проведенных исследований и расчетов было спроектировано устройство заряда емкостного накопителя. В процессе проектирования были выбрано и обосновано техническое решение на базе обратноходового транзисторного преобразователя с трансформаторной связью. Согласно техническому заданию данное устройство способно заряжать емкостной накопитель до напряжения 1000В за заданное время 5 сек. С учетом параметров выбранных элементов (транзистор, дроссель –трансформатор, диод, питающие провода, аккумуляторная батарея, фильтровой конденсатор) была составлена математическая модель устройства и просчитаны режимы при изменении напряжения питания на АКБ в диапазоне 10..12 В, что показало работоспособность системы по заряду емкостного накопителя в соответствии с техническим заданием. В процессе проектирования были рассчитаны тепловые режимы активных элементов и принято решение об установке радиаторов и принудительном воздушном охлаждении. соответствие работы системы с заданным темпом. Проведена трассировка односторонней платы, совмещающей систему управления и силовую часть, что придает компактность устройству, а также разработан печатный узел, габариты которого составили 85 x 58 x 50 мм.

Список использованных источников

1. Булатов О. Г. Иванов В.С. Панфилов Д.И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. М. Радио и связь, 2008.
2. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 2011.
3. Пентегов И. В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Киев: Наукова Думка, 2012.
4. Маршак И. С., Дейников А. С., Жильцов В. П. Импульсные источники света. М.: Энергия, 1982.
5. Вакуленко В.М., Иванов Л.П. Источники питания лазеров.- М.: Сов. Радио, 1980.
6. Кныш В. А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981.
7. Милях А. Н., Волков И. В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка, 1984.
8. Расчет радиаторов для полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] // URL:
<http://radiokot.ru/forum/viewtopic.php?f=21&t=9918&hilit=%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%20%D1%81%2012%2035&start=40> (дата обращения 15.01.17)
9. How to select a heat sink [Электронный ресурс] // User manual for select sink of company AAVID: URL:
https://www.aavid.com/sites/default/files/products/boardlevel/aavidstandard_rohs.pdf
10. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. Москва: Техносфера, 2005 г.- 632 с.
11. DC FAN [Электронный ресурс] // URL:
<http://www.datasheetspdf.com/PDF/JF0825S1H/642437/2> (дата обращения 15.01.17)

12. Ферриты и каркасы для них [Электронный ресурс] // URL: <http://www.metamoscov.ru/upload/medialibrary/17d/17d2fb95f9c54c6d1d5a2ab166f7ccf6.pdf>(дата обращения 15.01.17)
13. Медные эмалированные провода [Электронный ресурс] // URL: http://www.coretech.com.ua/docs/coretech_copper_wire_%5B2011%5D.pdf(дата обращения 15.01.17)
14. High Performance Current Mode Controllers [Электронный ресурс] // URL: <http://www.farnell.com/datasheets/89948.pdf>(дата обращения 15.01.17)
15. Резисторы: Справочник/ Ю.Н. Андреев, А. И. Антонян, Д. М. Иванов и др.; Под ред. И. И. Четверткова.- М.: Энергоиздат, 1981.
16. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник/ В. П. Берзан, Б. Ю. Геликман, М. Н. Гураевский и др.; Под ред. Г. С. Кучинского.-М.: Энергоатомиздат, 1987
17. Параметры светодиодов марки КИПД [Электронный ресурс] // URL: <http://ippart.com/download/d7fa6a38-1459-11e3-ab75-000423b8155e.pdf>(дата обращения 24.02.17)
18. Кабель акустический [Электронный ресурс] // URL: <http://www.1-cable.ru/models/10203-0002.html>(дата обращения 24.02.17)
19. Конденсаторы электролитические [Электронный ресурс] // URL: <https://lib.chipdip.ru/235/DOC000235479.pdf>(дата обращения 10.05.17)
20. Варисторы FNR [Электронный ресурс] // URL: <http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/FNR.pdf> (дата обращения 10.05.17)
21. Simulink manual. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.gg-wp.org/file/dload/Simulink-Manual.pdf>(дата обращения 10.05.17)