Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**РЕЗОНАНСНЫЙ LLC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ПЕРЕНЕСЁННЫМ КОНТУРОМ**

Пояснительная записка к курсовому проекту по дисциплине

«Энергетическая электроника»

Выполнил:

Студент гр. 360-1

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_М. М. Поддубный

«\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2024 г.

Принял:

Доцент кафедры ПрЭ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_А.В. Осипов

«\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2024 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем

управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

УТВЕРЖДАЮ

Доцент каф. ПрЭ,

\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Осипов

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на курсовой проект студенту:

Поддубному Михаилу Михайловичу группа 360-1 факультет ЭТ

1. Тема: Резонансный LLC преобразователь напряжения с перенесённым контуром.

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: «\_\_» января 2024 г.

3. Назначение и область применения системы (устройства): LLC преобразователи имеют применение в качестве источников питания различной аппаратуры мощностью до 200 Вт: телевизоров, аудио- и видеоаппаратуры, периферийных устройств компьютерной техники и самих компьютеров.

4. ТРЕБОВАНИЯ К РАБОТЕ:

4.1. Технические параметры:

|  |  |
| --- | --- |
| Напряжение питания, В  Напряжение выхода, В  Ток нагрузки, A  Частота, кГц  Пульсации напряжения на нагрузке, В | 42…54  170  7  200  0,05…0,15 |

4.2. Конструкторские параметры:

– Не предъявляются.

4.3. Условия эксплуатации устанавливаются в соответствии с ГОСТ – 15150-69:

– Температура окружающей среды от (–40)°С до 70°С;

– Атмосферное давление, кПа – от 84 до 106,7 (630–800 мм. рт. ст.);

– Относительная влажность, % – до 80.

Остальные требования в соответствии с ГОСТ 2.119-73.

4.4. Дополнительные условия:

– Не предъявляются.

5. ПЕРЕЧЕНЬ РАЗДЕЛОВ ПОДЛЕЖАЩИХ РАЗРАБОТКЕ

– Введение;

– Постановка задачи проектирования;

– Актуальность проектирования резонансного LLC преобразователя напряжения ;

– Теоретическое описание резонансного LLC преобразователя напряжения;

– Расчет электрических параметров и выбор элементов схемы резонансного LLC преобразователя напряжения;

–  Разработка схемы электрической принципиальной резонансного LLC преобразователя напряжения;

–  Заключение.

Руководитель курсового проекта

Осипов Александр Владимирович

Доцент кафедры ПрЭ

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2024 г. \_\_\_\_\_\_\_\_\_ Подпись

Задание принято к исполнению

Поддубный Михаил Михайлович

Студент гр. 360-1

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2024 г

СОДЕРЖАНИЕ

[1. Введение 5](#_Toc124111167)

[2. Постановка задачи проектирования 6](#_Toc124111168)

[3. Актуальность проектирования резонансного LLC преобразователя напряжения с перенесённым контуром 8](#_Toc124111169)

[4. Теоретическое описание](#_Toc124111170) [резонансного LLC преобразователя напряжения с перенесённым контуром](#_Toc124111169) [10](#_Toc124111170)

[5. Расчёт электрических параметров и выбор элементов схемы](#_Toc124111171) [резонансного LLC преобразователя напряжения с перенесённым контуром](#_Toc124111169) [12](#_Toc124111171)

[5.1 Определение максимальной мощности преобразователя и оценка мощности вторичной обмотки трансформатора 15](#_Toc124111172)

[5.2 Определение тока пульсаций дросселя 15](#_Toc124111173)

[5.3 Расчет трансформатора 15](#_Toc124111174)

[5.4 Расчет выходного дросселя 25](#_Toc124111175)

[5.5 Расчет диодов 27](#_Toc124111176)

[5.6 Расчет ключевого транзистора 29](#_Toc124111177)

[5.7 Расчет выходного фильтра 31](#_Toc124111178)

[5.8 Расчет входного конденсатора 32](#_Toc124111179)

[6. Разработка схемы электрической принципиальной однотактного прямоходового преобразователя напряжения 33](#_Toc124111180)

[7. Заключение 34](#_Toc124111181)

[Список использованных источников 35](#_Toc124111182)

# 1. Введение

Источник питания – это основа основ практически любого электронного устройства. От его работоспособности и правильности функционирования зависит и работа самого устройства. В данной курсовом проекте рассмотрены еще популярные на сегодняшний день источники питания – импульсные двухтактные.

То, что однотактные источники питания являются часто применяемыми на современном этапе развития электроники – это реальность. Область применения этих устройств необычайно широка: мониторы, телевизоры, принтеры лазерные, струйные и матричные, копировальные аппараты, видеомагнитофоны и факсы и т.д. Достаточно часто однотактные источники используются в качестве источников питания для системных блоков ПК, потеснив в этом сегменте двухтактные источники.

# 2. Постановка задачи проектирования

Переменное напряжение сети выпрямляется диодным мостом и сглаживается конденсатором большой емкости, являющимся фильтром выпрямленного напряжения. В результате на выходе выпрямителя формируется постоянное напряжение номиналом около +300 В. Это напряжение подается на схему пуска, которая вырабатывает питающее напряжение для схемы управления сразу же после включения блока питания. На выходе схемы управления вырабатывается управляющее напряжение в виде последовательности прямоугольных импульсов с частотой несколько десятков кГц. Эти импульсы управляют состоянием мощного высокочастотного ключевого транзистора, то есть открывают и закрывают его. Нагрузкой этого транзистора является первичная обмотка импульсного высокочастотного трансформатора. В результате переключения транзисторного ключа, в первичной и во всех вторичных обмотках трансформатора наводятся импульсные ЭДС прямоугольной формы, которые затем выпрямляются и сглаживаются однополупериодными выпрямителями (вторичные выпрямители).

Когда силовой транзистор открыт, выходное напряжение сетевого выпрямителя прикладывается к первичной обмотке трансформатора и через нее протекает ток, нарастающий по экспоненциальному закону (причем на начальном этапе экспоненты нарастание тока идет практически по линейному закону). В это время в трансформаторе происходит накопление магнитной энергии. Когда же транзистор закрыт, ток через первичную обмотку не протекает, а течет во вторичной обмотке, т.е. накопленная магнитная энергия передается в нагрузку.

Для защиты ключевого транзистора в состав источника питания обычно вводится схема токовой защиты, которая должна закрыть транзистор в том случае, если ток через него превысит допустимое значение.

В рабочем режиме схема управления потребляет значительный ток, который не может быть обеспечен схемой запуска. Поэтому питающее напряжение в этом случае формируется специальной цепью питания в рабочем режиме. Это напряжение создается за счет выпрямления импульсов ЭДС, создаваемых в одной из вторичных обмоток импульсного трансформатора.

Стабилизация выходных напряжений осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Сигнал обратной связи, по которому осуществляется стабилизация, обычно снимается с канала одного из выходных напряжений. Сигнал обратной связи подается на схему управления через элемент гальванической развязки.

Особенностями однотактного преобразователя можно считать использование одного ключевого транзистора и протекание тока через первичную обмотку импульсного трансформатора только в одном направлении.

# 3. Актуальность проектирования однотактного прямоходового преобразователя напряжения

Однотактный прямоходовый преобразователь (или Forward-конвертор) является классическим однотактным преобразователем и используется в качестве маломощных источников питания.

Преимуществами данного схемотехнического решения являются:

– сравнительная простота, один силовой ключ;

– малое количество элементов;

– меньшие габариты трансформатора по сравнению с обратноходовым преобразователем, не требуется использование воздушного зазора, нет опасности насыщения магнитопровода трансформатора;

– большая эффективность при низких входных напряжениях (по сравнению с обратноходовым преобразователем);

– меньший уровень пульсаций напряжения в нагрузке и электромагнитных помех (по сравнению с обратноходовым преобразователем);

Недостатки:

– боится режима короткого замыкания. Отсюда меньшая надежность по сравнению с обратноходовым преобразователем (flyback);

– малопригоден для работы на емкостную нагрузку;

– необходимо использование транзистора с рабочим напряжением, не менее удвоенного напряжения источника питания;

– более высокая стоимость и число элементов по сравнению с обратноходовым преобразователем при одинаковой мощности.

К положительным качествам однотактного прямоходового преобразователя можно отнести так называемую кросс-регулировку (cross-regulation). Явление кросс-регулирования проявляется при наличии нескольких выходных обмоток и в случае, если выходное напряжение одной из обмоток проседает, например в результате нагрузки, то проседает и выходное напряжение другой вторичной обмотки. Это явление позволяет эффективно стабилизировать выходное напряжение всех выходных обмоток (так у обратноходового преобразователя с этим проблемы).

# 4. Теоретическое описание однотактного прямоходового преобразователя напряжения

В прямоходовом преобразователе потребление энергии от источника питания и её передача в нагрузку происходит в течение одного интервала времени за период работы.

В моменты коммутации ключевого транзистора VT на вторичной обмотке появляются импульсы напряжения прямой полярности по отношению к выпрямительному диоду VD2. Диод VD2 открывается и импульсы напряжения прикладываются к LC-цепочке силового фильтра, на выходе которого получаем постоянное напряжение VOUT.

В моменты, когда транзистор VT закрыт, ток, поддерживаемый индуктивностью намагничивания первичной обмотки трансформатора, начинает протекать по цепи размагничивающей обмотки (или цепи снаббера). В выходной цепи ток, поддерживаемый индуктивностью фильтра, замыкается через диод VD3 и ток в индуктивности фильтра постепенно спадает. Далее цикл повторяется. Подробно принцип работы раскрыт ниже.

На выходе трансформатора любого импульсного преобразователя прямого хода, в том числе для однотактной прямоходовой схемы необходимо использование выходного LC-фильтра. Дроссель фильтра выполняет роль ограничителя амплитуды импульсов тока заряда выходного конденсатора Cout. Это требование обусловлено, тем, что при отсутствии сглаживающего дросселя трансформатор фактически будет работать на емкостную нагрузку, образуемую конденсатором фильтра. При этом ток через обмотки трансформатора будет иметь форму коротких импульсов большой амплитуды, величина которой будет ограничиваться только индуктивностью рассеяния и омическим сопротивлением обмоток. В этом случае возможны критические ситуации – перегрев обмоток и выход из строя ключевых транзисторов и выходных диодов вследствие импульсных токовых перегрузок.

Однотактный прямоходовый преобразователь может работать как в непрерывном, так и в прерывистом режиме работы выходного дросселя. Однако наиболее часто используется непрерывный режим, который является основным для преобразователей прямого хода.

На рисунке 4.1 представлена упрощенная электрическая схема однотактного прямоходового преобразователя с размагничивающей обмоткой.

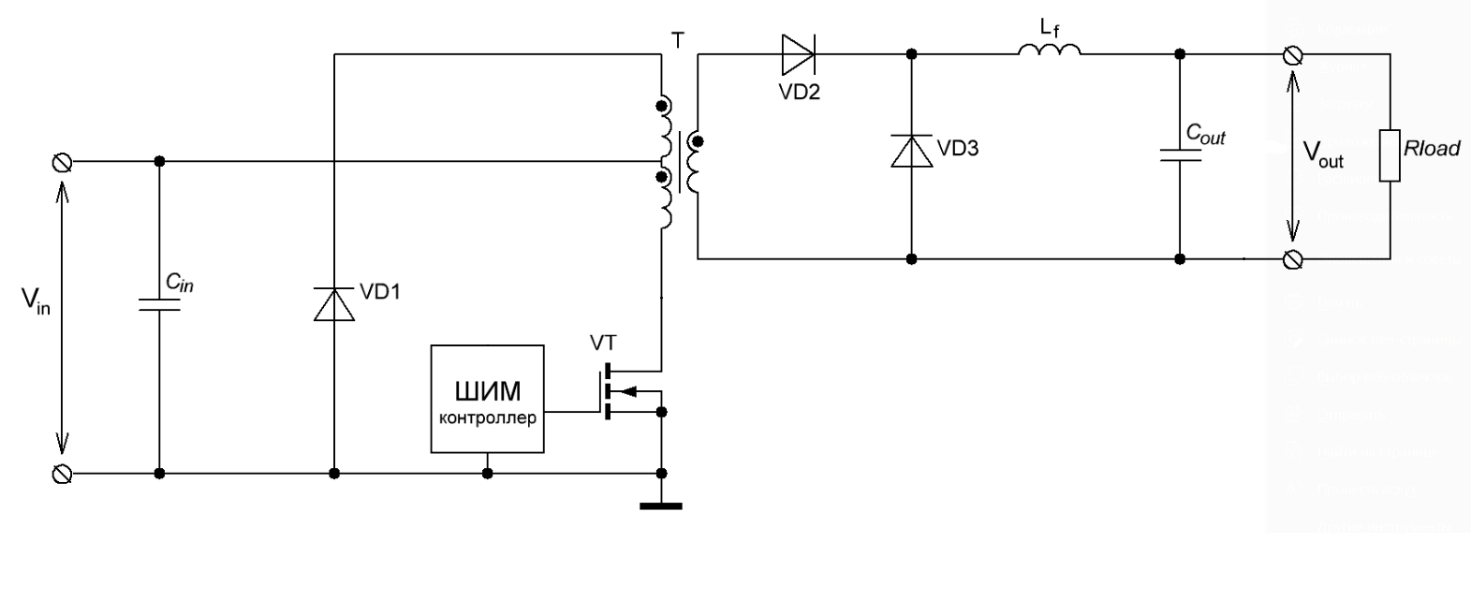


Рисунок 4.1 – Упрощенная электрическая схема однотактного прямоходового преобразователя с размагничивающей обмоткой

# 5. Расчёт электрических параметров и выбор элементов схемы однотактного прямоходового преобразователя напряжения

В качестве схемы управления была выбрана микросхема фирмы ON Semiconductor NCP1252, типовая схема включения, которая взята из [10] и представлена на рисунке 5.1.

В таблице 5.1 приведено назначение выводов микросхемы.

Таблица 5.1 – Назначение выводов микросхемы NCP1252

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № вывода | Наименование | Функция |
| 1 | FB | Этот вывод напрямую подключается к коллектору оптрона. |
| 2 | BO | Этот вывод отслеживает значение входного напряжения, обеспечивая защиту от перенапряжения. |
| 3 | CS | Контролирует первичный ток и позволяет выбирать амплитуду компенсации скачка. |
| 4 | RT | Резистор, подключенный к земле, фиксирует частоту переключения. |
| 5 | GND | Вывод заземления контроллера. |
| 6 | Drv | Этот вывод соединяется с затвором MOSFET. |
| 7 | VCC | Этот вывод принимает диапазон напряжений от 8 В до 28 В. |
| 8 | SSTART | Конденсатор − подключенный к земле, выбирает продолжительность плавного пуска. Плавный  пуск заземляется во время работы таймера задержки. |

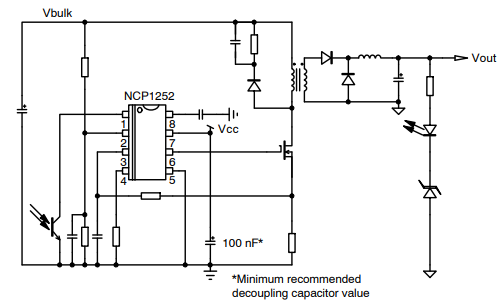


Рисунок 5.1 – Типовая схема включения микросхемы NCP1252

Формулы, представленные ниже для расчета однотактного прямоходового преобразователя были взяты из [11].

Частота коммутации *f* определяет период следования импульсов T:



Период совместно с коэффициентом заполнения определяет длительность импульса открытого состояния ключа:



Значение q = 0,5 является типовым решением, неким оптимумом (или вернее компромиссом) между эффективностью потребления энергии от источника (нужны большие q) и негативными эффектами, возникающими при больших q – большие напряжения на ответственных элементах (ключевой транзистор, выходной диод), большие импульсные токи через рекуперационную нагрузку и диод, увеличение времени перехода диода в непроводящее состояние с ростом тока через него.

Делитель напряжения, представленный для отслеживания значение входного напряжения, обеспечивая защиту от перенапряжения были подобраны исходя из, значений входного и выходного напряжений:



Из ряда Е24 выбрано сопротивление резистора 100 кОм.



Из ряда Е24 выбрано сопротивление резистора 18 кОм.

Резистор, который регулирует частоту переключения возьмем из данных, предоставленных в литературе:



Из ряда Е24 выбрано сопротивление резистора 43 кОм.

Конденсатор служащий для выбора продолжительность плавного пуска, в литературе рекомендуется взять:



В качестве конденсатора был выбран конденсатор TAJR104K020RNJ, который имеет следующие параметры:

Номинальная емкость, 

Рабочее напряжение, 

Так же был выбран диодный мост KBPC104, со следующими параметрами:

Максимальное постоянное обратное напряжение, 400 В;

Максимальный прямой (выпрямленный за полупериод) ток, 3 А.

Для образования обратной связи были выбраны оптрон и светодиод, со следующими параметрами:

VOM452T – оптрон,

Прямое напряжение, VF = 1,4 В;

Обратное напряжение, Vr = 3 В;

L-7113ID-5V (L-53ID-5V) – светодиод,

Максимальное прямое напряжение, VF = 2,5 В;

Максимальное обратное напряжение, Vr = 5 В;

# 5.1 Определение максимальной мощности преобразователя и оценка мощности вторичной обмотки трансформатора

Максимальная выходная мощность преобразователя равна произведению тока нагрузки и напряжения на ней:



Максимальная мощность вторичной обмотки трансформатора Pw2 равна отношению максимальной выходной мощности к КПД выходной части преобразователя:



В первом приближении КПД выходной части преобразователя, включающем потери на выпрямителе и фильтре η можно принять равным 90 %

# 5.2 Определение тока пульсаций дросселя

Максимальная величина пульсаций тока дросселя ∆IL должна быть существенно меньше выходного тока:



# 5.3 Расчет трансформатора

Габаритная мощность трансформатора PT является исходным параметром расчета. В данном соотношении габаритная мощность трансформатора принимается равной максимальной входной мощности PIN\_max:



где:

Pw2 – мощность вторичной обмотки;

ηT – КПД трансформатора.

Определяем габаритный параметр трансформатора однотактного преобразователя SCS0:

где:

η – КПД трансформатора;

*f* – рабочая частота;

k0 – коэффициент заполнения окна сердечника медью, k0 = 0,3 (данные взяты из справочника);

kС – коэффициент заполнения сердечника, kС = 1;

Bmax – максимальное значение индукции в магнитопроводе, ∆B (Bac = ∆B/2)= 0,18 Тл;

Br – остаточная индукция магнитопровода, Br = 0,1 Тл;

S0 – площадь окна сердечника трансформатора;

SС – площадь поперечного сечения сердечника.

*j* – максимальная плотность тока в обмотках (среднеквадратичное значение),

*j* = 4,5 A/мм2.

Выбор PC-сердечник ориентируясь на найденное значение габаритного парамметра

|  |  |
| --- | --- |
| Тип сердечника | PC-40905 |
| Длина средней силовой линии, lc | 1,25 см |
| Высота окна, G | 0,361 см |
| Вес сердечника, Wt\_fe | 1,0 г |
| Вес меди обмотки, Wt\_cu | 0,5 г |
| Средняя длина витка, MLT | 1,9 см |
| Площадь сечения сердечника, Ac | 0,1 см2 |
| Площадь окна сердечника, Wa | 0,065 см2 |
| Коэффициент геометрии, Kg | 0,000134 см5 |
| Площадь поверхности трансформатора, At | 2,8 см2 |
| Индуктивность 1000 витков, AL | 455 мГн |
| Произведение площадей сердечника, Ap | 0,0065 см4 |

Число витков первичной обмотки рассчитывается по формуле:



где:

qmax – относительная длительность импульса (максимальное значение);

VIN\_max – напряжение на первичной обмотке трансформатора (максимальное значение);

*f* – рабочая частота;

SС – площадь поперечного сечения сердечника;

kС – коэффициент заполнения сердечника;

Bmax – максимальное значение индукции в магнитопроводе;

Br – остаточная индукция магнитопровода (при введении в магнитопровод немагнитного зазора используется величина Br\_gap).

Выходное напряжение вторичной обмотки трансформатора V2 рассчитывается как сумма выходного напряжения преобразователя и суммы падений напряжений на выходном выпрямителе и силовом дросселе:



где:

VOUT\_max – выходное напряжение преобразователя (максимальное значение);

VVD\_out – падение напряжения на диодах выходного выпрямителя;

VL – падение напряжения на выходном силовом дросселе.

Коэффициент трансформации k рассчитывается как отношение выходного напряжения на вторичной обмотке трансформатора V2 и напряжения, прикладываемого к первичной обмотке, практически равному входному напряжению VIN\_min:



где:

V2 – напряжение на выходе вторичной обмотки;

VIN\_min - напряжение, прикладываемое к первичной обмотке (минимальное значение).

Число витков во вторичной обмотке N2 рассчитываются по соотношению:



где:

N1 – число витков первичной обмотки;

k - коэффициент трансформации.

Рассчитываем число витков рекуперационной обмотки Nr. Число витков рекуперационной обмотки Nr, как правило, принимается равным числу витков первичной обмотки:



Индуктивность намагничивания первичной обмотки трансформатора L0 рассчитывается по соотношению:



где:

µ0 – магнитная постоянная;

µ – магнитная проницаемость материала магнитопровода;

SС – площадь сечения магнитопровода;

lav – эффективная длина средней линии магнитопровода;

N1 – число витков первичной обмотки.

Амплитудное значение тока первичной обмотки определяется выражением:



где:

k - коэффициент трансформации;

IOUT\_max – выходной ток преобразователя (используется максимальное значение тока);

∆IL\_max – максимальная величина пульсаций тока дросселя (входное значение для расчета трансформатора);

q – относительная длительность импульса (максимальное значение);

VIN\_max - напряжение, прикладываемое к первичной обмотке (максимальное значение);

*f* – рабочая частота;

L0 - индуктивность намагничивания первичной обмотки трансформатора.

Среднее значение тока первичной обмотки определяется выражением:



где:

q – относительная длительность импульса (максимальное значение);

k – коэффициент трансформации;

IOUT\_max – выходной ток преобразователя.

Среднеквадратичное значение тока первичной обмотки вычисляется по формуле:



где:

q – относительная длительность импульса (максимальное значение);

Iw1\_max, Iw1\_min – максимальное и минимальное значения вычисляются по соотношениям:





Амплитудное значение тока вторичной обмотки определяется выражением:



где:

IOUT\_max – выходной ток преобразователя (максимальное значение);

∆IL\_max – максимальная величина пульсаций тока дросселя (входное значение для расчета трансформатора).

Среднее значение тока вторичной обмотки определяется выражением:



Среднеквадратичное значение тока вторичной обмотки вычисляется по формуле:



где:

q – относительная длительность импульса (максимальное значение);

Iw2\_max, Iw2\_min - максимальное и минимальное значения вычисляются по соотношениям:



Амплитудное значение тока рекуперационной обмотки рассчитывается по выражению:



где:

L0 – индуктивность намагничивания (фактически индуктивность первичной обмотки);

VIN\_max – напряжение, приложенное к первичной обмотке (максимальное значение)

q – коэффициент заполнения.

Среднеквадратичное значение тока рекуперационной обмотки Iwr\_rms рассчитывается по выражению:



где:

Iwr\_max – амплитудное значение тока рекуперационной обмотки;

q – коэффициент заполнения.

Минимальная площадь поперечного сечения обмоток (по меди) рассчитывается по соотношениям:







Sw1\_Cu – площадь поперечного сечения проводника первичной обмотки;

Sw2\_Cu – площадь поперечного сечения проводника вторичной обмотки;

Swr\_Cu – площадь поперечного сечения проводника рекуперационной обмотки;

jmax – выбранное максимальное значение среднеквадратичной плотности тока в обмотках.

Для однотактных трансформаторов, в отличие от двухтактных, при расчете сечения провода необходимо использовать именно среднеквадратичное (в крайнем случае – среднее) значение тока. Упрощенный расчет с использованием максимального значения приведет к значительной ошибке.

Диаметр проводов (по меди) для выполнения обмоток рассчитывается по соотношениям:







В соответствии с выбранным значение диаметра провода пересчитывается площади поперечного сечения выбранного типа провода по меди по формулам:







Расчет средней длины витка обмоток трансформатора

Традиционно для создания трансформаторов обратноходовых преобразователей используются Ш- и П- образные магнитопроводы. Ниже представлены соотношения для расчета средней длины витка для данных магнитопроводов.

Для Ш и П образных магнитопроводов **с прямоугольным сечением магнитопровода** средние длины витков рассчитываются по соотношениям:

для первичной обмотки:



где:

a, b – геометрические параметры, характеризующие сечение каркаса магнитопровода;

tw1 – толщина обмотки, вычисляемая по соотношению:



где:

hcm –высота каркаса магнитопровода, в нашем случае hcm = 3,6 мм;

N1 – число витков в первичной обмотке;

dw1\_ins – толщина провода с изоляцией, для ПЭЛ это 1,070 мм

kw1\_l – коэффициент укладки первичной обмотки, зависящий от толщины провода (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Данные о коэффициенте укладки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Диаметр провода с изоляцией, мм | 0,08 – 0,31 | 0,31 – 0,5 | 0,5-2,1 |
| Коэффициент укладки | 0,8 – 0,75 | 0,75 – 0,7 | 0,65 – 0,6 |

Произведем данный расчет и для вторичной обмотки:



где:

lw1\_last – длина внешнего витка первичной обмотки, вычисляемая по соотношению:



tw2 – толщина обмотки, вычисляемая по соотношению:



здесь:

hcm –высота каркаса магнитопровода, в нашем случае hcm = 3,6 мм;

N2 – число витков в первичной обмотке;

dw2\_ins – толщина провода с изоляцией, для ПЭЛ это 0,660 мм;

Поскольку рекуперционная обмотка имеет малую толщину, располагается между первичной и вторичной обмотками и, как правило, укладывается в один слой и, то можно считать, что средняя длина витка рекуперционной обмотки lwr\_t\_av равна длине внешнего витка первичной обмотки lw1\_last:



Это применимо для трансформаторов, выполняемых на всех типах магнитопроводов.

Длина обмоток определяется как произведение средней длины витка на число витков:







Полученная величина определяет, сколько провода нужно отмерить на обмотки трансформатора.

Число витков в одном слое для первичной и вторичной обмоток, определяется соотношением:





Рассчитывается общее число слоев для первичной и вторичной обмоток Wl1, Wl2 как отношение числа витков в обмотке к числу витков в единичном слое с округлением до большего целого:





Рассчитываются толщины обмоток трансформатора Hw1 , Hw2:

для первичной обмотки:



для вторичной обмотки:



для рекуперационной обмотки:



# 5.4 Расчет выходного дросселя

Индуктивность L*f* дросселя прямоходового преобразователя рассчитывается по соотношению:



где:

qmax – максимальное значение коэффициента заполнения;

η - КПД преобразователя;

k - коэффициент трансформации;

VIN\_max – максимальное значение входного напряжения;

VVD2 – падение напряжения на выпрямительном диоде VD2;

∆IL – максимальная величина пульсации тока дросселя (размах);

*f* – рабочая частота преобразователя.

Максимальный ток дросселя IL*\_*max равен максимальной величине выходного тока преобразователя плюс половина размаха пульсации дросселя:



Среднеквадратичное значение тока дросселя IL определяется выражением для среднеквадратичного значения треугольных импульсов с постоянной составляющей:



где:

IOUT\_max – максимальное значение выходного тока;

∆IL\_max– пульсация тока дросселя (размах).

В качестве выходного дросселя был выбран дроссель B82615B2202M001, который имеет следующие параметры:

Номинальный ток, 3 А;

Номинальное напряжение, 250/350 В;

Индуктивность обмотки, 7 мГн;

Активное сопротивление, 0,5 Ом.

# 5.5 Расчет диодов

Максимальное напряжение VVD2\_max на диоде VD2 определяется по соотношению:



На практике для обеспечения надежности необходимо использовать минимум 20% запас по рабочему напряжению.

Максимальный ток через рекуперационный диод VD2 определяется выражением:



где:

L0 – индуктивность намагничивания трансформатора.

В качестве диода был выбран диод КД641Г, который имеет следующие параметры:

IF(AV) = 15 А– Прямой средний ток;

VRM = 700 В– Максимальное обратное напряжение;

VFM = 1,9 В– Максимальное прямое падение напряжения;

IRM = 0,1 А– Максимальный обратный ток.

Соотношение для расчета мощности выделяющейся на рекуперационном диоде имеет вид:



где:

VVD2 – падение напряжения на рекуперацонном диоде.

Максимальное напряжение на диоде VD3 определяется по соотношению:



где:

VVD4 – падение напряжения на «токозамыкающем» диоде VD4.

Максимальный ток через выпрямительный диод VD3 равен максимальному току через вторичную обмотку трансформатора:



В качестве диода был выбран диод КД641Г, который имеет следующие параметры:

IF(AV) = 15 А– Прямой средний ток;

VRM = 700 В– Максимальное обратное напряжение;

VFM = 1,9 В– Максимальное прямое падение напряжения;

IRM = 0,1 А– Максимальный обратный ток.

Мощность, выделяющаяся на выпрямительном диоде, определяется выражением:



где:

VVD3 – падение напряжения на выпрямительном диоде.

Максимальное напряжение на диоде VD4 определяется по соотношению:



Максимальный ток через токозамыкающий диод VD4 равен максимальному току через вторичную обмотку трансформатора:



В качестве диода был выбран диод КД641Г, который имеет следующие параметры:

IF(AV) = 15 А– Прямой средний ток;

VRM = 700 В– Максимальное обратное напряжение;

VFM = 1,9 В– Максимальное прямое падение напряжения;

IRM = 0,1 А– Максимальный обратный ток.

Тепловая мощность, выделяющаяся на «токозамыкающем» диоде VD4 равна:



где:

VVD4 – падение напряжения на токозамыкающем диоде.

# 5.6 Расчет ключевого транзистора

Максимальное напряжение на ключевом транзисторе определяется выражением:



Максимальный ток транзистора определяется максимальным значением тока первичной обмотки:



Согласно полученным значениям VVT\_max и IVT\_max выбираем (в первом приближении) конкретную модель ключевого транзистора. Согласно datasheet определяем сопротивление канала в открытом состоянии RDS.

Времена включения и выключения транзистора с учетом возможностей схемы управления должны быть существенно меньше минимальной длительности импульса включения ti.

Был выбран MOSFET транзистор IPB65R190CFD, который имеет следующие параметры:

Полярность – N-канальный;

Напряжение исток-сток UDDS = 650 В;

Непрерывный ток стока ID = 17,5 А;

Сопротивление исток-сток открытого канала RDS = 0,19 Ом;

Пороговое напряжение включения транзистора UGS = 4 В;

Рассеиваемая мощность PD = 77 Вт;

Напряжение затвор-исток UGS = 20 В;

Время нарастания импульса tr = 15 нс;

Время спада импульса tf = 5 нс;

Входная ёмкость Ciis = 1291 пФ;

Выходная ёмкость Сoos = 20 пФ.

Выделяющаяся мощность

Тепловая мощность, выделяющаяся на ключевом транзисторе, определяется как сумма мощностей статических и динамических потерь:



где:

PVT\_stat – мощность статических потерь для MOSFET транзистора рассчитывается по соотношению:



где:

Iw1\_rms – среднеквадратичное значение тока первичной обмотки;

RDS – сопротивление MOSFET транзистора в открытом состоянии.

PVT\_switch – мощность динамических потерь, выделяемая в кристалле MOSFET транзистора, рассчитывается по соотношению:



где:

tf – время спада напряжения на транзисторе (в момент коммутации);

tr – время нарастания напряжения на транзисторе (переход в закрытое состояние);

Сoss – выходная емкость транзистора определяемая как сумма ёмкостей «затвор–сток» СGD и «сток-исток» СDS.

# 5.7 Расчет выходного фильтра

Максимальное напряжение на выходном конденсаторе Cout равно максимальной величине выходного напряжения VOUT\_max:



Составляющая пульсаций ΔVСout\_disch, обусловленная его зарядом-разрядом выбирается в пределах 10-50% от величины выходных пульсаций ΔVOUT:



Минимальная величина емкости выходного конденсатора определяется из выражения:



где:

ΔVCout\_disch - пульсации, обусловленные разрядом конденсатора.

В качестве конденсатора был выбран конденсатор К50-35 мини, который имеет следующие параметры:

Номинальная емкость, 

Рабочее напряжение, 

# 5.8 Расчет входного конденсатора

Максимальное напряжение на входном конденсаторе Cin равно максимальной величине входного напряжения Vin\_max:



Падение напряжения вследствие разряда конденсатора ΔVCin\_disch выбирается в пределах 1-2% от величины входного напряжения VIN\_min:



Минимальная величина емкости входного конденсатора определяется по выражению:



где:

ΔVCin\_disch - пульсации, обусловленные разрядом конденсатора

В качестве конденсатора был выбран конденсатор К50-35, который имеет следующие параметры:

Номинальная емкость, 

Рабочее напряжение, 

# 6. Разработка схемы электрической принципиальной однотактного прямоходового преобразователя напряжения

На рисунке 6.1 представленная принципиальная схема однотактного прямоходового преобразователя напряжения.

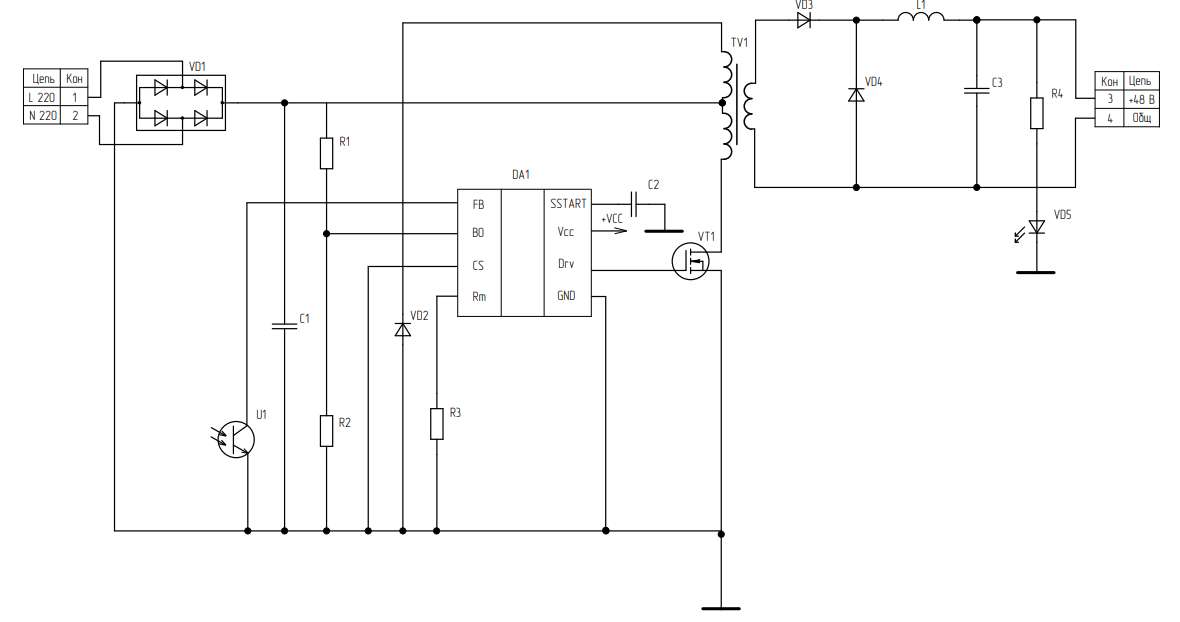


Рисунок 6.1 – Принципиальная схема прямоходового преобразователя напряжения

На схеме можно наблюдать диодный мост VD1, который служит для того, чтобы перевести переменное напряжение в постоянное. Трансформатор TV1 рассчитанный ранее. Так же конденсаторы C1 и С3, которые являются входным и выходным фильтром соответственно. Резистор R3 фиксирует частоту переключения. Конденсатор C2 выбирает продолжительность плавного пуска. Плавный пуск заземляется во время работы таймера задержки.

# 7. Заключение

При выполнении данного курсового проекта был разработан и рассчитан однотактный прямоходовый преобразователь напряжения. Полученное устройство удовлетворяет всем условиям технического задания.

При разработке устройства был получен опыт по управлению вторичными источниками питания, закреплены полученные ранее знания, а также получен дополнительный опыт по расчету различных элементов электронных схем.

# Список использованных источников

1. Аналоговая схемотехника: Учебное пособие., Шарапов А.В. ТУСУР, Томск-2006. - 193 с.
2. Все отечественные микросхемы. — 2-е изд., переработанное и дополненное — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. — 400 с.
3. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы: Справочник / Б. А. Бородин, В. М. Ломакин, В. В. Мокряков и др.; Под ред. А. В. Голомедова. — М.: Радио и связь, 1985. — 560 с.
4. Основы преобразовательной техники. Коновалов Б.И. Томск: ТМЦДО, 2007 г. – 157 с.
5. Основы преобразовательной техники: Учебно-методическое пособие. Семенов В.Д., - Томск: ТМЦДО, 2002. - 132 с.
6. Основы силовой электроники., Изд. 2-е, испр. и доп. Зиновьев Г. С.– Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2003. - 664 с.
7. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник/А. В. Баюков. А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев и др.; Под общ. ред. Н.Н. Горюиова. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 744 с.
8. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник / В.Л. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др. Под общ. ред. Н.Н. Горюнова.— 2-е изд., перераб.— М.: Энергоатомиздат, 1985. — 904 с.
9. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справ./Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренок — Мн.: Беларусь, 1994.—591 с: ил.
10. Datasheet, микросхема управления NCP1252 для прямоходового преобразователя: https://static.chipdip.ru/lib/289/DOC005289360.pdf.
11. Алфавит силовой электроники, однотактный прямоходовый преобразователь: https://www.power-electronics.info/forward.html.
12. Datasheet, n-канальный MOSFET транзистор IPB65R190CFD7: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPB65R190CFD7A-DataSheet-v02\_01 EN.pdf?fileId=5546d4627506bb3201751c530f6542c3.

13. Datasheet, конденсатор электролитический алюминиевый: https://static.chipdip.ru/lib/980/DOC000980880.pdf.

14. Datasheet, диодный мост: https://static.chipdip.ru/lib/407/DOC001407255.pdf.

15. Datasheet, Дроссель силовой B82615B2202M001: https://static.chipdip.ru/lib/078/DOC001078283.pdf.