

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

Ганиев А.А., Тачилин С.А., Хажиев М.У., Ковешников С.В.

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Учебно-методическое пособие



Ташкент-2023

УДК 621.337.1
ВВК 32.85

Ганиев А.А., Тачилин С.А., Хажиев М.У., Ковешников С.В.
Учебно-методическое пособие для выполнения курсовой работы по дисциплине «Силовые электронные устройства». Ташкент: ТашГТУ, 2023. 62 стр.

Учебно-методическое пособие разработано для выполнения курсовой работы студентами, обучающимися по направлению 5310800 – Электроника и приборостроение (по отраслям) и 5313500 – Светотехника. Определены порядок выполнения курсовой работы, требования к форме и содержанию пояснительной записки курсовой работы по дисциплине «Силовые электронные устройства».

Печатается по решению научно-методического совета Ташкентского государственного технического университета
Протокол № 4 от 28 декабря 2022 г.

Рецензенты:

к.ф.м.н., с.н.с. Сапаров Д.В. - Физико-технический институт НПО
"Физика-Солнце" Академия наук Республики Узбекистан
к.ф.-м.н., доцент Хайдаров А.Х. - ТашГТУ

© Ташкентский государственный технический университет,
2023.

Введение

Эффективное использование силовой электроники и микроэлектронных систем управления в современной технике – важный резерв повышения производительности труда, качества выпускаемой продукции, снижения травматизма и сохранения здоровья человека. Важной задачей курсового проектирования является привлечение студентов к изучению специальной технической литературы по проектированию систем силовой электроники, овладению современными компьютерными программами по проектированию, приобретению навыков работы с ними, использования сети Интернет для поиска современной элементной базы, что должно быть продемонстрировано в выполняемой курсовой работе. В методическом пособии изложена информация о порядке проектирования и оформления результатов расчета импульсного преобразователя напряжения, предназначенного для питания двигателей постоянного тока. Приведены сведения о выборе элементов преобразователя.

1. Цель курсовой работы

Закрепить и систематизировать теоретические знания по силовой электронике, в том числе по использованию импульсного преобразователя напряжения.

Привить практические навыки самостоятельного решения инженерных задач по проектированию импульсного тиристорного преобразователя, расчету отдельных узлов, а также потерь преобразования.

2. Задачи курсовой работы

Задачи, решаемые при проведении курсовой работы: изучение студентами специальной технической литературы и справочных материалов по проектированию импульсных преобразователей (регуляторов) напряжения; овладение современными компьютерными средствами разработки силовых электронных схем, а также расчетов потерь преобразования, приобретение устойчивых навыков работы с ними; использование сети Интернет для поиска необходимых электронных элементов и их справочных данных, что должно быть продемонстрировано в выполненной работе; подготовка к выполнению выпускной работы.

Решению данных задач способствует индивидуальный характер заданий к курсовой работе.

3. Тематика курсовой работы

Тематика курсовой работы - «Расчёт импульсного преобразователя напряжения». Варианты заданий выдаются преподавателем. Кроме того, студенты могут выполнить курсовые работы по темам некоторых предприятий, по согласованию с консультантом.

4. Выбор темы курсовой работы

Темы (задания) курсовых работ определяются кафедрой и их рекомендуется обновлять каждый учебный год. Руководитель-консультант выполняемой работы назначается из состава преподавателей кафедры.

При выборе темы курсовой работы руководитель и студент должны обратить внимание на: возможность углубленно изучить тему и получить опыт в процессе написания курсовой работы;

способность студента проводить многовариантные разработки на базе системного подхода по технологии сверху вниз и проводить сравнение результатов по различным критериям.

Ежегодный список тем (заданий) курсовой работы объявляется в начале курса. Темы (задания) курсовой работы обсуждаются и утверждаются на Учебно-методическом совете кафедры.

5. Оценка технического задания курсовой работы

Конкретные технические задания по темам, выданными преподавателями-консультантами из списка, оцениваются и утверждаются на методическом семинаре кафедры.

6. Структура и содержание пояснительной записки

Структура курсовой работы должна включать следующие элементы (материалы приведены в порядке их расположения):

- титульный лист;
- задание;
- содержание;
- введение;
- основной текст пояснительной записки с иллюстративным материалом, таблицами, графиками и т.п.;
- заключение;
- список использованных источников.

7. Основное содержание элементов курсовой работы

Титульный лист является первой страницей расчетно-пояснительной записки.

Задание на проектирование является главным руководством, на основании которого проводится работа. Задание выполняется на бланке, который выдается руководителем. При получении задания свою подпись на нем ставит студент.

Содержание предназначено для облегчения поиска необходимых материалов при чтении записки, а также для общего ознакомления с работой и представления об объемах всех разделов. Содержание начинается текстовую часть расчетно-пояснительной записки.

Слово «СОДЕРЖАНИЕ» пишут с прописными буквами посередине страницы. В содержании приводят порядковые номера и наименования разделов, подразделов и пунктов, имеющих

наименование, а также приложения с их обозначениями и наименованиями. Указывается номер листа (страницы), на котором размещено начало материала (раздела, подраздела и т.п.).

Введение характеризует современное содержание тех вопросов и проблем, которым посвящена курсовая работа. Во введении нужно обосновать необходимость проведения именно этой работы, показать ее место в ряду аналогичных работ, актуальность и новизну разрабатываемой темы, цель и ожидаемые результаты его выполнения.

Основной текст пояснительной записки. Структура и содержание этого раздела расчетно-пояснительной записки определяется заданием на проектирование. Должен как можно полнее отражать сущность выполненной работы, показать этапы выполнения, обоснования технических решений, полученные результаты расчетов и их анализ. На основании выполненной работы в основной части представляется итоговый вариант расчета.

Заключение должно отражать основные результаты работы, выводы и предложения.

Список использованных источников. Составление списка использованных источников производится на основании всех использованных (просмотренных и изученных) книг, статей из сборников и журналов и других материалов. Как правило, используется алфавитный способ группировки материала в списках, когда источники группируют в алфавитном порядке записей. В начале списка размещаются по алфавиту книги, а затем – статьи из журналов и сборников. При этом иностранные источники размещают по алфавиту после перечня всех источников на языке выполняемой работы. В список включают только те источники, на которые в тексте пояснительной записки имеется ссылка. Каждый источник, включенный в список, нумеруют арабскими цифрами с точкой и записывают с новой строки. Библиографический указатель дается на отдельной странице (страницах) под заголовком «СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ». Заголовок порядкового номера не имеет.

Приложения. Материал, дополняющий текст документа, допускается помещать в приложениях. Приложениями могут быть, например, расчеты, схемы отдельных узлов, описания использованных электронных элементов, алгоритмы работы

микроэлектронной системы, исходный текст программы микроконтроллера, результаты отладки, графические материалы и таблицы большого формата и т. д. Приложения оформляют как продолжение записки на последующих ее листах.

8. Объем и оформление пояснительной записки

Общий объем пояснительной записки курсовой работы не менее 20 машинописных страниц с текстом и графиками.

Текст пояснительной записки должен быть напечатан на одной стороне листа, на бумаге формата А4, поля: 25 мм слева, 15 мм справа, 20 мм сверху и снизу. Листы нумеруются последовательно, номер проставляется в центре внизу листа.

Способ выполнения текстовых материалов – машинописный с применением выходных печатающих устройств ЭВМ – при этом рекомендуется, набирая текст в текстовом редакторе Word, использовать шрифты Times New Roman размером 14 pt (пунктов) с интервалом от 1 до 1,5, выравнивание – по ширине, абзацный отступ – 1 см.

Рисунки (иллюстрации) курсовой работы, таблицы, формулы выполняются с учетом необходимых требований. Для рисунков - слово "Рисунок", его номер и через тире - наименование помещают после пояснительных данных и располагают в центре под рисунком без точки в конце.

Если наименование рисунка состоит из нескольких строк, то его следует записывать через один межстрочный интервал.

Таблицу следует располагать непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице. Наименование следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа. Наименование таблицы приводят с прописной буквы без точки в конце. Если наименование таблицы занимает две строки и более, то его следует записывать через один межстрочный интервал.

Названия заголовков и подзаголовков таблиц указывают в единственном числе. Заголовки граф выравнивают по центру, а заголовки строк - по левому краю. В таблице допускается применять размер шрифта меньше, чем в тексте отчета.

Объем графической части пояснительной записки курсовой работы составляет не менее 2 листов формата А4 или А3.

Для таблиц и подписей к рисункам рекомендуется использовать шрифт Times New Roman размером от 11 до 14 pt (пунктов) с одинарным интервалом без абзацного отступа.

9. Оформление и нумерация разделов и параграфов

Основную часть отчета следует делить на разделы, подразделы и пункты (параграфы). Пункты при необходимости могут делиться на подпункты.

Разделы и подразделы отчета должны иметь нумерованные заголовки. Пункты и подпункты, как правило, заголовков не имеют и в этом случае не нумеруются.

Заголовки структурных элементов ("СОДЕРЖАНИЕ", "ВВЕДЕНИЕ", "ЗАКЛЮЧЕНИЕ", "СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ", "ПРИЛОЖЕНИЕ") следует располагать в середине строки без точки в конце, жирными прописными буквами не подчеркивая.

Каждый структурный элемент и каждый раздел основной части отчета начинают с новой страницы. Заголовки разделов и подразделов основной части отчета следует начинать с абзацного отступа и размещать после порядкового номера, печатать с прописной буквы, полужирным шрифтом, не подчеркивать, без точки в конце.

Переносы слов в заголовках не допускаются.

Разделы основной части отчета нумеруются арабскими цифрами (например, первый раздел – 1 Источники питания), подразделы – двойной нумерацией (например, первый подраздел первого раздела - 1.1 Импульсные источники питания), пункты (параграфы) - при необходимости нумеруются тройной нумерацией (например - 1.1.1 Фильтры импульсных источников питания). Структурные элементы отчета ("СОДЕРЖАНИЕ", "ВВЕДЕНИЕ", "ЗАКЛЮЧЕНИЕ", "СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ", "ПРИЛОЖЕНИЕ") не нумеруются.

Каждая страница отчета должна быть заполнена полностью, пустых мест (лишних пробелов) быть не должно, даже если подраздел или параграф закончен, следующий подраздел или параграф пишется после одной пробельной строки. Только структурные элементы отчета и разделы основной части отчета начинают с новой страницы.

10. Графическая часть отчета курсовой работы

Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы, фотоснимки) следует располагать в отчете непосредственно после текста отчета, где они упоминаются впервые, или на следующей странице (по возможности ближе к соответствующим частям текста отчета). На все иллюстрации в отчете должны быть даны ссылки. При ссылке необходимо писать слово "Рисунок" и его номер, например - "в соответствии с рисунком 2".

Иллюстрации (графики, рисунки, схемы, фотографии) должны быть размещены в удобном для просмотра виде, подписи к рисункам не должны отделяться (переноситься на следующую страницу) от самих рисунков. Иллюстрации должны быть названы и, при необходимости, текст курсовой работы должен содержать пояснительную информацию в соответствующем абзаце, а в конце пояснения должен быть указан номер соответствующей иллюстрации. Под ней написано название иллюстрации. Иллюстрации (график, рисунок, схема, фотография) последовательно обозначаются арабскими цифрами, используя сквозную нумерацию в пределах всего отчета. Однако допускается подраздельная нумерация иллюстраций (например Рисунок 1.1-, Рисунок 2.1-).

11. Формулы и порядок записи уравнений

Формулы в тексте должны быть тщательно и четко написаны. В формуле должны быть четко указаны прописные и строчные буквы, верхний и нижний индексы. Размер знаков для формулы определяется следующим образом: прописные буквы и цифры 5-6 мм, строчные буквы 3 мм, указатели уровня и индексы должны быть не менее 2 мм. Рекомендуемый шрифт Times New Roman размером от 10 до 14 pt (пунктов).

Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если уравнение не умещается в одну строку, оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (-), умножения (x), деления (:) или других математических знаков. На новой строке знак повторяется. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак "x". Пояснение значений

символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они представлены в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента можно приводить с новой строки или записывать в одну строку. Первую строку пояснения начинают со слова "где" без двоеточия с абзаца. Формулы в отчете следует располагать посередине строки и обозначать порядковой нумерацией в пределах всего отчета арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке. Формулы в курсовой работе (если их больше одной) отмечаются арабскими цифрами используя сквозную нумерацию в пределах отчета. Однако, при большом количестве формул допускается подраздельная нумерация формул (например – (1.1)).

При составлении отчета курсовой работы, помимо общих правил, необходимо обратить внимание на правильность и обоснованность расчетов и выбора электронных элементов и их параметров или других данных из справочной литературы. В каждом конкретном случае должны быть даны пояснения по выбору элемента или его параметра. Помимо указания источников и наименований справочных данных или диаграмм, необходимо предоставить как минимум полное наименование выбранного параметра, его численное значение и размерность. Желательно указать конкретную строку справочной таблицы. В случае выбора из справочных материалов сложных элементов (интегральных микросхем, индикаторов, и других), кроме краткого указания на тип устройства, должны быть приведены подробные параметры и характеристики выбранных сложных электронных элементов.

12. Оформление приложений курсовой работы

Порядок последовательности приложений должен соответствовать порядку их применения в курсовой работе и обеспечивать удобство использования.

Каждое приложение начинается со слова «ПРИЛОЖЕНИЕ», написанного жирным шрифтом в правом верхнем углу новой страницы. Если в курсовой работе более одного приложения, они отмечаются последовательными арабскими цифрами. Например, «ПРИЛОЖЕНИЕ 1», «ПРИЛОЖЕНИЕ 2» и так далее.

13. Порядок выполнения курсовой работы

1. Ознакомиться с заданием на курсовую работу, выявить условия эксплуатации, уточнить требования безопасности, эргономики и другие эксплуатационные требования.
2. Определить входные и выходные параметры разрабатываемого преобразователя напряжения, его амплитудные, временные и другие параметры.
3. Спроектировать схему силовой части преобразователя.
4. Выбрать тип используемых силовых элементов.
5. Спроектировать коммутирующую цепь и рассчитать ее элементы.
6. Провести расчет количества последовательно и параллельно соединенных вентиляей.
7. Рассчитать необходимые параметры элементов распределения токов и напряжений на силовых блоках преобразователя.
8. Провести расчет потерь преобразования.
9. При необходимости провести коррекцию параметров проекта, провести расчет и проектирование вспомогательных элементов и блоков (узла питания, элементов защиты от перегрузок и т.д.).
10. Выполнить графическую часть работы.
11. Составить спецификацию всех используемых элементов.
12. Составить итоговый отчет.

14. План-график контроля выполнения курсовой работы

Задание на выполнение курсовой работы выдается преподавателем-консультантом кафедры в течение первой недели проектного интервала согласно графику. В ходе выполнения задания будет вступительное обсуждение целей и задач работы, порядка выполнения и защиты, учебных и технических материалов, которые студенты могут использовать при проектировании.

К моменту первого контроля студенты должны выполнить 25% работы (поработать с литературой, составить план работ).

К моменту второго контроля будет выполнено 50% работы, т.е. получены принципиальные схемы и проведены необходимые предварительные расчеты.

К третьему контрольному периоду должны быть выполнены все расчеты элементов схемы и выбраны типы всех используемых элементов, что составляет 75% выполнения работы.

К четвертому сроку проверки должна быть полностью написана пояснительная записка и выполнена графическая часть работы. В ходе проектной работы студенты должны посетить не менее четырех консультационных сессий согласно контрольному графику, согласованному с руководителем-консультантом. Готовая и оформленная пояснительная записка передается на проверку консультанту за 3-5 дней до защиты. Проверенная работа подписывается консультантом, и работа допускается к предварительной защите.

15. Подготовка и защита презентации курсовой работы

На завершающем этапе курсовой работы, после положительной рекомендации к защите работы, студент готовит презентацию курсовой работы к защите.

Грамотно подготовленная презентация обеспечивает 50% положительного прохождения защиты. Поэтому кафедра должна донести до студентов основные требования к подготовке презентации.

Презентация курсовой работы должна включать:

- название темы;
- актуальность темы;
- цели и задачи курсовой работы;
- краткое описание объекта исследования;
- краткое содержание работы, основные результаты, полученные в ходе работы;
- краткое описание программных продуктов, используемых в курсовой работе;
- таблицы, графики, схемы, диаграммы;
- выводы.

Успешность защиты курсовой работы определяется тем, что студент четко и лаконично излагает свои мысли, четко и бегло, качеством подготовленных материалов и их донесения до участников.

Презентационные материалы не должны превышать 50 слайдов. Слайды должны быть пронумерованы. Это позволяет участникам легко указывать на слайды, когда они задают вопросы в конце презентации.

На титульном слайде отображается название курсовой работы и указывается автор. Последующие слайды могут включать актуальность работы, цели и задачи работы и другие материалы.

Презентация студента, представляющего курсовую работу, будет заслушана в течение 10-15 минут. После презентации будет зачитан отзыв руководителя курсовой работы. Студент должен четко и ясно отвечать на вопросы, заданные членами комиссии.

Вопросы, которые можно задать студенту во время защиты, должны иметь отношение к теме работы и зависеть от качества проведенной работы и ее результатов. Ответы студента членам комиссии должны быть четкими и аргументированными.

16. Сдача курсовой работы

После выполнения курсового отчета он предварительно защищается на кафедре, а студенты, выполнившие работу в полном объеме в соответствии с заданием, допускаются к защите перед комиссией. Руководитель-консультант работы составляет отзыв о работе студента в течение семестра.

После выполнения курсовой работы отчет подписывается студентом и руководителем-консультантом.

На защиту курсовой работы будет отведено 10-15 минут, в ходе которых студент расскажет об актуальности темы, анализе работы и выбранных технических решениях, разработанных методах расчета, предлагаемых решениях, преимуществах выбранного решения.

Курсовая работа защищается студентом перед комиссией из трех преподавателей кафедры. В ходе защиты студент дает краткий отчет о проделанной работе и поясняет отчет графическими презентациями. Комиссия оценивает качество и содержание выполненной работы по 5 и 100-балльной шкале с учетом отчета и ответов на вопросы.

При выявлении принципиальных ошибок в работе защита работы прекращается и студент возвращается на доработку или дается новое задание.

17. Критерии оценивания курсовой работы

Критерии баллов оценивания на защите курсовой работы.

Оценка «отлично» (5) выставляется студентам, набравшим 90-100 баллов. Для этого студент должен:

- делать четкие выводы и решения по задачам, решаемым в курсовой работе;

- понимать суть результатов, уметь их анализировать;

- понимать смысл параметров и характеристик используемых устройств, знать методы расчета, уметь доложить и иметь четкое представление о рассматриваемых вопросах.

Оценка «хорошо» (4) выставляется студентам, набравшим 70-89 баллов. Для этого студент должен:

- понимать суть курсовой работы, уметь самостоятельно применять знания;

- понимать, знать, рассказывать и иметь четкое представление о характере темы и рассматриваемых вопросах.

Оценка «удовлетворительно» (3) выставляется студентам, набравшим 60-69 баллов. Для этого студент должен:

- понимать, знать, рассказывать суть решаемых задач и иметь о них четкое представление.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студентам, набравшим 0-59 баллов.

К таким студентам относятся: студенты, не выполнившие в установленные сроки задания курсового и не имеющие четкого представления о сути работы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

**Пояснительная записка курсовой работы по предмету
«Силовые электронные устройства»
по теме
«РАСЧЁТ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ»**

Выполнил _____
Ф.И.О.

Руководитель-консультант _____
Ф.И.О.

Оценка приемной комиссии _____ (____ баллов)

**Председатель
комиссии** _____
Ф.И.О.

Член комиссии _____
Ф.И.О.

Член комиссии _____
Ф.И.О.

Ташкент – 20 __

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой «ЦЭМ» _____

здание утверждено на заседании кафедры
«Цифровая электроника и микроэлектроника»
протокол № __ от «__» _____ 20 __ г.

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ по дисциплине «Силовые электронные устройства»

Группа: _____ Студент _____ Руководитель _____

1. Тема: «Расчёт импульсного преобразователя напряжения»

2. Исходные данные: Вариант № 1

Номер варианта №	Напряжение питания U_d (В)	Номинальное напряжение двигателя U_{dv} (В)	Расчётный ток двигателя I_p (А)	Число двигателей N_d	Время выключения тиристора; t_d (мкс)	Скорость охлаждающего воздуха T (м/с)	Температура окружающего воздуха t_a (оС)	Расчётный коэффициент заполнения для построения диаграммы токов и напряжений	Коэффициент коммутационной способности k
1	3000	1500	170	8	7	5	40	0.9	1.5

3. Литература

1. Штерн М.И. Силовая электроника. Расчёты и схемотехника. –СПб.: Наука и Техника, 2017.
2. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. Учебник. –М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
3. Бирзниекс Л.В. «Импульсные преобразователи постоянного тока» – М.: Энергия, 2009
4. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. Учебное пособие. –М.: Юрайт, 2015.

4. Структура пояснительной записки

- титульный лист;
- задание на курсовую работу;
- содержание;
- введение;
- текст пояснительной записки с иллюстративным материалом;
- заключение;
- список использованных источников.

5. Структура графической части:

- лист «Блок-схема разрабатываемого преобразователя» (формат А4);
- лист(ы) «Полная принципиальная схема разрабатываемого преобразователя» (А4 или А3);
- лист(ы) «Временные диаграммы работы» (А4 или А3);
- лист «График зависимости КПД от коэффициента заполнения» (формат А4).

6. Период сдачи работы

	1	2	3	4	Защита
План					
Факт					

Руководитель _____

Студент _____

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Варианты заданий к курсовой работе

Номер варианта №	Напряжение питания U_d (В)	Номинальное напряжение двигателя U_{dv} (В)	Расчётный ток двигателя I_p (А)	Число двигателей N_d	Время выключения тиристора; t_q (мкс)	Скорость охлаждающего воздуха T (м/с)	Температура окружающего воздуха t_a (оС)	Расчётный коэффициент заполнения для построения диаграммы токов и напряжений λ	Коэффициент коммутационной способности k
1	3000	1500	170	8	7	5	40	0.9	1.5
2	3000	1500	165	6	9	6	35	0.85	1.6
3	3000	1500	160	4	8	7	30	0.9	1.4
4	3000	1500	155	8	6	8	25	0.85	1.5
5	3000	1500	150	6	8	6	40	0.9	1.6
6	3000	1500	145	4	7	5	40	0.85	1.4
7	2800	1400	170	8	9	6	35	0.9	1.5
8	2800	1400	165	6	8	7	30	0.85	1.6
9	2800	1400	160	4	6	8	25	0.9	1.4
10	2800	1400	155	6	8	6	40	0.85	1.5
11	2800	1400	150	8	7	5	40	0.9	1.6
12	2800	1400	145	4	9	6	35	0.85	1.4
13	2600	1300	170	8	8	7	30	0.9	1.5
14	2600	1300	165	6	6	8	25	0.85	1.6
15	2600	1300	160	8	8	8	40	0.9	1.4
16	2600	1300	155	4	7	6	40	0.85	1.5
17	2600	1300	150	8	9	5	35	0.9	1.6
18	2600	1300	145	6	8	6	30	0.85	1.4
19	2400	1200	170	8	6	7	25	0.9	1.5
20	2400	1100	165	4	8	8	40	0.85	1.6
21	2400	1500	160	8	7	6	40	0.9	1.4
22	2400	1500	155	6	9	5	35	0.85	1.4
23	2400	1400	150	8	8	6	30	0.9	1.5
24	2400	1300	145	4	6	7	25	0.85	1.6
25	2200	1100	170	8	7	5	40	0.9	1.5
26	2200	1100	165	6	9	6	35	0.85	1.6
27	2200	1100	160	4	8	7	30	0.9	1.4
28	2200	1100	155	8	6	8	25	0.85	1.5
29	2200	1100	150	6	8	6	40	0.9	1.6
30	2200	1100	145	4	7	5	40	0.85	1.4

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Исходные данные
 2. Функциональная схема регулирования напряжения и основные параметры цепи нагрузки
 3. Схема преобразователя, алгоритм управления тиристорами, диаграмма токов и напряжений на её элементах
 4. Расчёт параметров узла коммутации, определение предельной частоты регулирования:
 - 4.1 Ёмкость коммутирующего конденсатора
 - 4.2 Индуктивность коммутирующего реактора
 - 4.3 Расчёт максимально допустимой частоты регулирования
 5. Расчёт внешних характеристик преобразователя
 6. Расчёт параметров фильтров:
 - 6.1 Входной фильтр
 - 6.2 Выходной фильтр
 7. Расчёт числа полупроводниковых приборов:
 - 7.1 Расчёт последовательно включённых приборов
 - 7.2 Расчёт параллельно включённых приборов
 8. Определение параметров защитных элементов преобразователя:
 - 8.1 Расчёт делителей напряжения
 - 8.2 Расчёт реакторов насыщения
 9. Расчёт перегрузочных характеристик тиристора
 10. Расчёт К.П.Д. преобразователя
 - 10.1 Потери в силовых полупроводниковых приборах (СПП)...
 - 10.2 Определение массы реакторов
- Заключение
- Список используемой литературы

ВВЕДЕНИЕ

Силовые полупроводниковые приборы используются на электрическом подвижном составе в качестве элементов выпрямителей, инверторов, преобразователей частоты и числа фаз, импульсных регуляторов.

В настоящее время на железных дорогах эксплуатируются опытные серии электропоездов с широтно-импульсным регулированием напряжения.

Импульсные регуляторы напряжения используются для питания обмоток возбуждения тяговых двигателей в режиме реостатного торможения на электровозах, на вагонах метрополитена, на трамвайных вагонах.

Импульсные регуляторы применяются как элементы преобразователей напряжения и частоты на ЭПС с синхронными и асинхронными тяговыми двигателями, в схемах импульсно-фазового регулирования.

1. Исходные данные

Номер варианта	Напряжение питания, U_d (В)	Номинальное напряжение двигателя, U_{dv} (В)	Расчётный ток двигателя I_p (А)	Число двигателей, N_d	Время выключения тиристора, t_q (мкс)	Скорость охлаждающего воздуха, T (м/с)	Температура окружающего воздуха, t_a (оС)	Расчетный коэффициент заполнения для построения диаграммы токов и напряжений, λ	Коэффициент коммутационной способности, k
1	3000	1500	170	8	7	5	40	0.9	1.5

На рисунке 2.2 изображена функциональная схема системы регулирования напряжения, используемой на ЭПС постоянного тока.

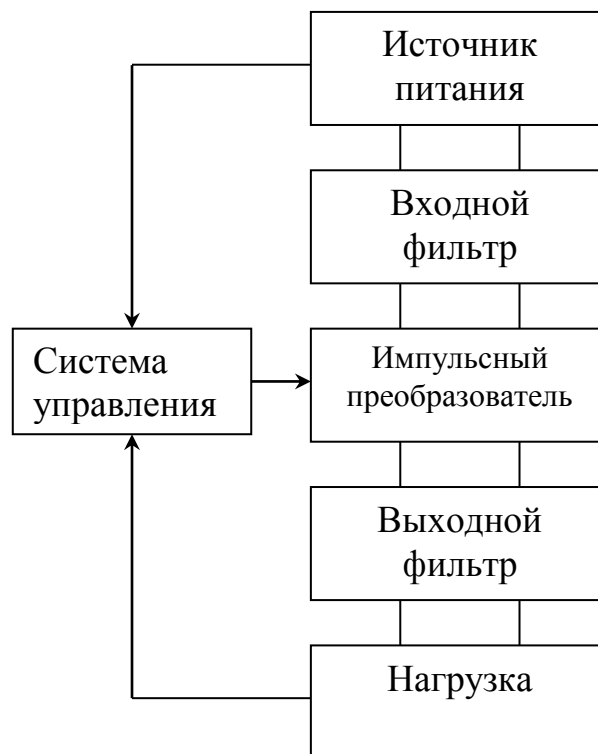


Рисунок 2.2- Функциональная схема системы регулирования напряжения, используемой на ЭПС постоянного тока

В процессе пуска тяговых двигателей с помощью импульсного преобразователя изменяют величину среднего напряжения на их зажимах от некоторой минимальной до номинальной величины.

Число последовательно соединенных тяговых двигателей, питаемых от одного преобразователя:

$$n_d = U_d / U_n \quad (2.1)$$

$$n_d = 3000 / 1500 = 2$$

Число параллельных ветвей:

$$a_d = N_d / n_d \quad (2.2)$$

$$a_d = 8 / 2 = 4$$

Сопротивление обмоток тягового двигателя мощностью свыше 500 кВт:

$$r_d = 0,04 \frac{U_H}{I_p} \cdot k_{пз}, \quad (2.3)$$

Где: $k_{пз}$ коэффициент эксплуатационной перегрузки.

$$k_{пз} = 1,3 \dots 1,5$$

Примем $k_{пз} = 1,4$

Сопротивление обмоток тягового двигателя мощностью до 500 кВт:

$$r_d = \left(0,03 + \frac{6}{P_H + 100} \right) \cdot \frac{U_H}{I_H} \quad (2.4)$$

Здесь P_H, I_H – номинальное значение мощности и тока тягового двигателя:

$$I_H = \frac{I_p}{k_{пз}}$$

$$I_H = 175 / 1,4 = 125 \text{ А}$$

Мощность обмоток тягового двигателя:

$$P_{дв} = U_{дв} \cdot I_H$$

$$P_{дв} = 1500 \cdot 125 = 187,5 \text{ кВт}$$

Тогда:

$$r_d = \left(0,03 + \frac{6}{P_H + 100} \right) \cdot \frac{U_{дв}}{I_H} = \left(0,03 + \frac{6}{187,5 \cdot 10^3 + 100} \right) \cdot \frac{1500}{125} = 0,36 \text{ Ом}$$

Количество последовательно соединенных тяговых двигателей в каждой из параллельных ветвей определяет вид функциональной схемы. При этом необходимо иметь в виду, что после выхода на

автоматическую характеристику ($\lambda = 1$) напряжение на зажимах двигателя должно быть номинальным (Рисунок 2.3)

Пуск тяговых двигателей при токах I_p начинается при скорости, равной нулю. В этом случае минимальна величина падения напряжения на нагрузке

$$\Delta U = (n_d r_d + r_{L_c}) I_p + n_d \Delta U_{щ}, \quad (2.5)$$

Где:

r_{L_c} – сопротивление обмотки сглаживающего реактора L_c выходного фильтра (в предварительных расчетах можно принять $r_{L_c} = 5 \cdot 10^{-2}$ Ом);

$\Delta U_{щ}$ – падение напряжения на щетках тягового двигателя

$$\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$$

$$\Delta U = (2 * 0,36 + 0,05) * 175 + 2 * 2 = 139 \text{ В}$$

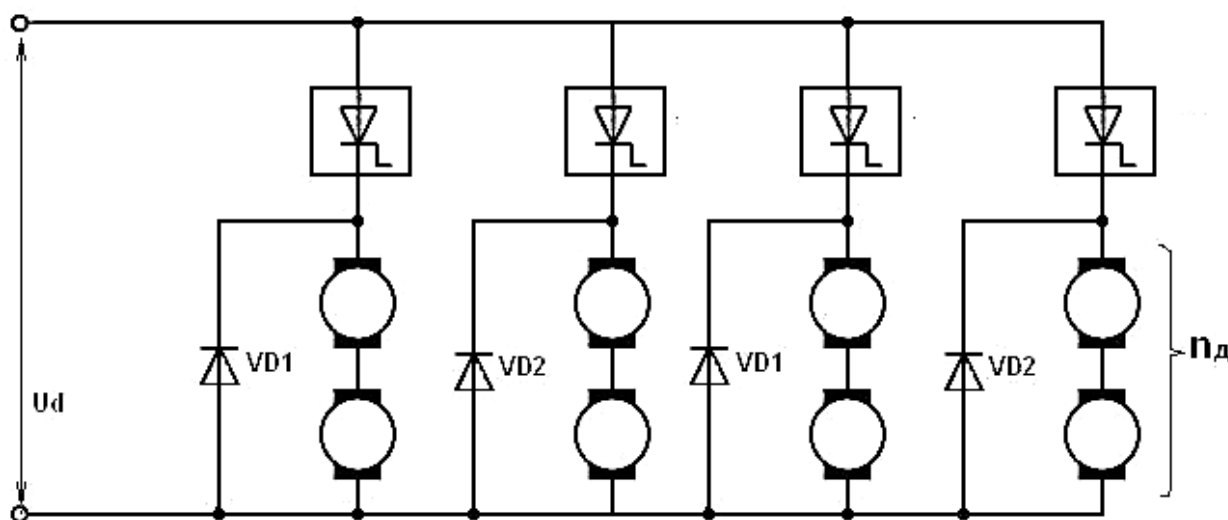


Рисунок 2.3- Расположение тяговых двигателей, соединенных последовательно в каждой из параллельных ветвей

3. Схема преобразователя. Алгоритм управления тиристорами. Диаграммы токов и напряжений.

На рисунке 3.1 представлена принципиальная схема преобразователя.

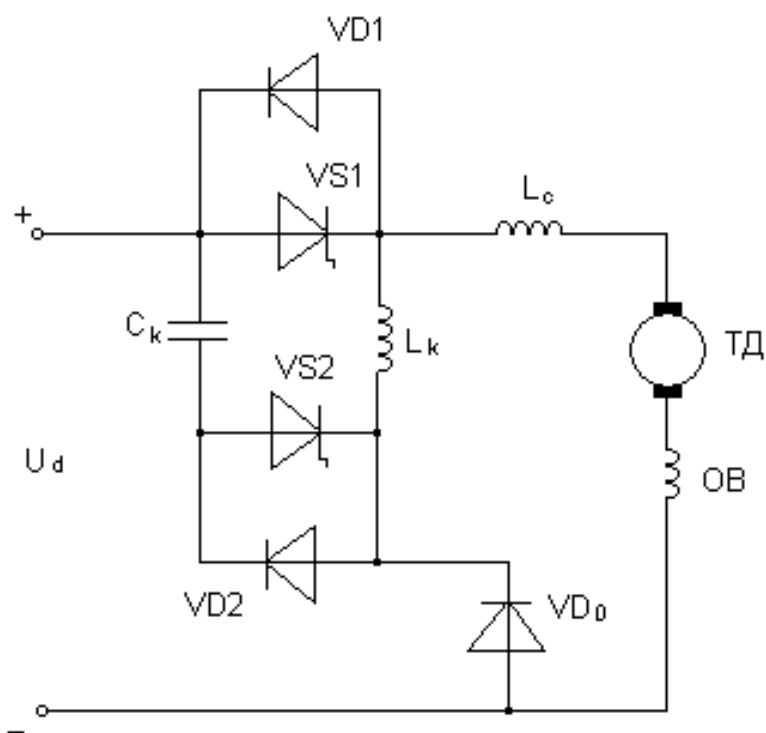


Рисунок 3.1- Принципиальная схема преобразователя

VS1 – главный тиристор.

C_k – коммутирующий конденсатор.

L_k – коммутирующий реактор.

VS2 – коммутирующий тиристор.

VD1 – коммутирующий диод.

VD2 – диод цепи подготовительной перезарядки C_k .

VD0 – обратный диод.

L_c – сглаживающий реактор.

Исходное состояние схемы приведено на рисунке 3.2

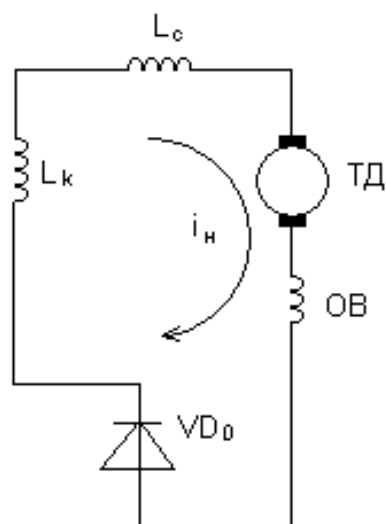


Рисунок 3.2- Исходное состояние схемы

При подаче сигнала управления на VS1: VS1 и VS2 заперты, напряжение коммутирующего конденсатора равно входному, ток нагрузки протекает за счет энергии накопленной в катушках индуктивности по контуру – ТД-ОВ-VD₀-L_k-L_c (Рисунок 3.3)

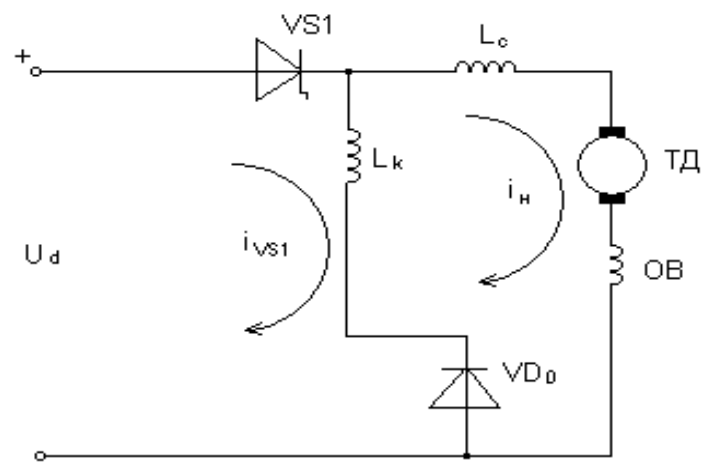


Рисунок 3.3- Состояние, когда управляющий сигнал подается на VS1

Тиристор VS1 включается и происходит замещение тока в цепи диода VD₀. Когда ток тиристора VS1 будет равен току нагрузки i_n , диод VD₀ закроется и нагрузка подсоединяется к источнику питания. Кроме того, образуется контур перезарядки коммутирующего конденсатора (Рисунок 3.4).

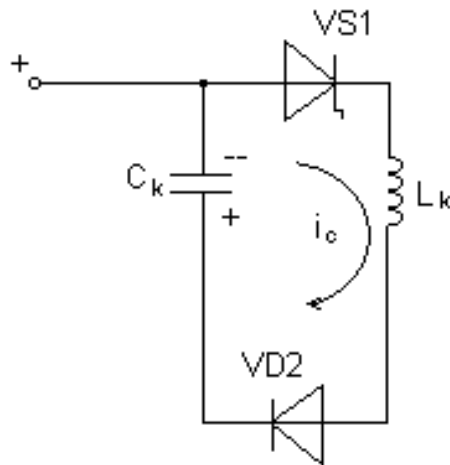


Рисунок 3.4- Контур перезарядки коммутирующего конденсатора

За время собственных колебаний контура L_k - C_k конденсатор перезаряжается до указанной полярности. При этом ток через главный тиристор равен сумме токов: $i_{VS1} = I_H + i_c(t)$

Для запираания тиристора VS1 отпирается тиристор VS2:

Конденсатор C_k начинает разряжаться, в результате чего ток через тиристор снижается до нуля и он закрывается. После закрытия тиристора VS1 конденсатор продолжает перезаряжаться по другому контуру.

Контур перезарядки при закрытом VS1 и зарядки конденсатора приведены на рисунках 3.5-3.6.

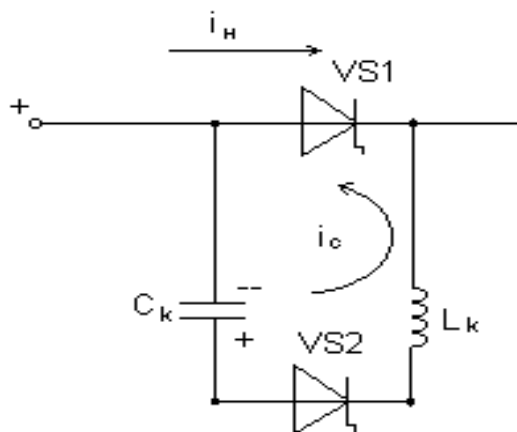


Рисунок 3.5- Контур перезарядки конденсатора при закрытом VS1

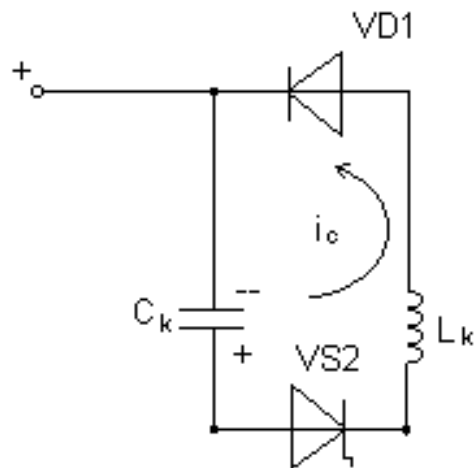


Рисунок 3.6- Контур зарядки конденсатора

Ток конденсатора начинает снижаться и при достижении значения тока нагрузки диод VD1 закрывается. Но напряжение на конденсаторе все еще меньше входного напряжения. Следовательно образуется контур дозаряда конденсатора. Контур дозаряда конденсатора (Рисунок 3.7)

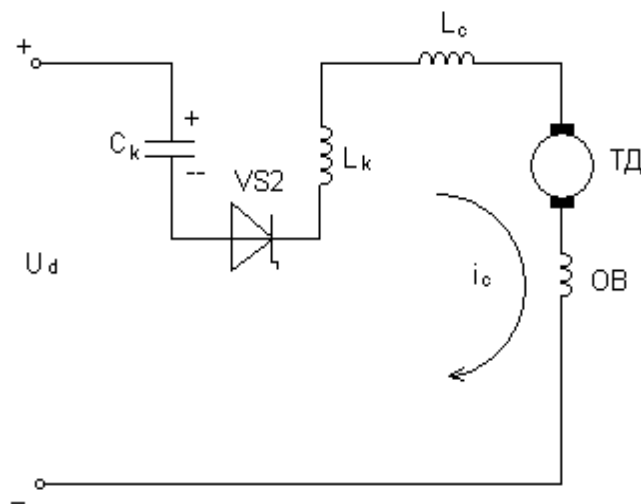


Рисунок 3.7- Контур дозарядки конденсатора

Как только напряжение на конденсаторе будет равно входному, закроется тиристор VS2 и схема вернется в исходное состояние. Конденсатор будет заряжен до входного напряжения и указанной полярности.

4. Расчет параметров узла коммутации преобразователя

В широтно-импульсных преобразователях электрического подвижного состава на основе однооперационных тиристоров необходимо использовать быстродействующие тиристоры. В этом случае могут быть получены параметры преобразователя, обеспечивающие размещение его на электровозе или моторном вагоне.

Таблица 4.1- Однооперационные тиристоры

Тип Type	$V_{max}/$ V_{max}	$I_{max}/$ I_{max}	I_{TAV} ($T_c, ^\circ C$)	I_{TAVmax}	I_{TAV} 10ms	i^2t	V_{max}/I_{max}	V_{TBO}	r_T	di/dt	dv/dt	V_{GT}	T_{max}	R_{thj-c}	t_{tr}	t_s	F	w	Корпус	Охлаждител Heatsinks
	V	mA	A	A	kA	A ² s10 ³	V/A	V	mΩ	A/μs	V/μs	V	mA	°C	°C/W	μs	μs	kN		
Таблеточное исполнение																				
ТАИ123-200	600-1300/7	30/150	200(93)	314	2.45	30	2.60/628	1.40/1.50	1000	500/1000	2.7/300	125/0.070	125/3.2		8-16				PT21	O123
ТАИ123-250	600-1300/7	30/150	250(92)	393	2.70	36	2.20/785	1.20/0.95	1000	500/1000	2.7/300	125/0.070	125/3.2		16-25				PT31	O242,O143,O243, O343,OM103,OM104
ТАИ133-400	600-1300/7	50/250	400(94)	628	5.00	125	2.75/1256	1.60/0.65	1000	500/1000	2.7/300	125/0.035	125/3.2		8-16				PT41	O242,O143,O243, O343,OM103,OM104
ТАИ133-500	600-1300/7	50/250	500(93)	785	5.50	151	2.10/1570	1.10/0.55	1000	500/1000	2.7/300	125/0.035	125/3.2		16-25				PT53-1	O153, O253
ТАИ143-630	600-1300/7	80/500	630(88)	989	9.00	405	2.50/1978	1.20/0.65	1000	500/1000	2.7/300	125/0.028	125/3.2		8-16					
ТАИ143-800	600-1300/7	80/500	800(86)	1256	10.5	551	2.05/2512	1.10/0.25	1000	500/1000	2.7/300	125/0.028	125/3.2		16-25					
ТАИ153-800	2400-2800/7	120/1000	800(87)	1256	16.0	1280	2.25/2512	1.35/0.45	1000	500/1000	2.5/300	125/0.020	125/4.0		50;63					
ТАИ253-800*	600-2000/7	120/1000	800(87)	1256	16.0	1280	2.80/2512	1.70/0.65	1000	500/1000	2.7/300	125/0.020	125/4.0		8;10 для 6-10кВ 12.5-20 для 12-20кВ					
ТАИ153-1000	2400-2800/7	120/1000	1000(81)	1570	16.0	1280	2.20/3140	1.20/0.35	1000	500/1000	2.5/300	125/0.020	125/4.0		50;63					

Таблица 4.2- Быстровосстанавливающие диоды таблеточной конструкции

БЫСТРОВОСТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ ДИОДЫ ТАБЛЕТОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

PRESS PACK FAST RECOVERY DIODES

Тип Type	V_{max}	I_{max}	I_{TAV} ($T_c, ^\circ C$)	I_{TAVmax}	I_{TAV} 10 ms	i^2t	V_{max}/I_{max}	V_{TBO}	r_T	t_{tr}	T_{max}	R_{thj-c}	F	w	Корпус Package	Реком.охлаждител. Rec. heatsinks
	V	mA	A	A	kA	A ² s10 ³	V/A	V	mΩ	μs	°C	°C/W	kN	kg		
Ø выпрямительного элемента 24мм																
ДЧ323-200	3000-4600	50	200(93)	400	3.0	45	3.20/628	1.40	2.70	5.0	140	0.08	4.5	0.091	PD22	O123
ДЧ423-200*	3000-4600	50	200(85)	314	2.7	36	3.50/628	1.40	2.70	300 ^{ns} ; 160 ^{ns}	140	0.08				
ДЧ523-200	600-1600	30	200(100)		3.0	45	2.00/628			1.0;1.6;2.0	150	0.08				
ДЧ323-250	1600-2400	50	250(100)	500	4.5	101	1.85/785	1.10	0.96	450 ^{ns} ; 250 ^{ns}	150	0.08	4.5	0.067	PD21	O123
ДЧ423-250*	1600-2600	50	250(95)	393	4.0	80	2.10/785	1.10	0.096	4.0	150	0.08				
ДЧ523-250*	600-1600	30	250(100)		3.5	61	2.10/785			1.6; 2; 2.5	150	0.08				
Ø выпрямительного элемента 32мм																
ДЧ333-400	1600-2400	50	400(100)	800	6.5	211	2.30/1256	1.20	0.88	450 ^{ns} ; 160 ^{ns}	150	0.04	10	0.180	PD32	O143, OM103
ДЧ433-400	1600-2600	40	400(95)	628	6.5	211	2.50/1256	1.20	0.88	4.0	150	0.04				
ДЧ533-400*	600-1600	40	400(100)		6.5	211	2.10/1256			2.0; 2.5	150	0.04				
Ø выпрямительного элемента 40мм																
ДЧ443-250*	4000-6000	70	250(120)	400	4.0	80	3.50/785	1.60	0.60	1500 ^{ns} ; 280 ^{ns}	140	0.035	16	0.240	PD42	O342,O243, OM103, OM104
ДЧ443-320*	3000-4500	70	320(119)	512	5.0	125	3.00/1005	1.35	0.60	1000 ^{ns} ; 250 ^{ns}	140	0.035				
ДЧ343-500	3000-3600	50	500(100)	785	10.5	551	3.00/1570	1.55	0.90	5.0	150	0.035				
ДЧ443-500*	1600-2500	60	500(120)	800	12.0	720	2.00/1570	0.95	0.50	500 ^{ns} ; 160 ^{ns}	150	0.035				
ДЧ343-800	600-1800	40	800(100)	1600	12.5	781	2.80/2500	1.30	0.60	4.0;5.0;6.3;8.0	175	0.035				
ДЧ343-1000	600-1800	40	1000(100)	2000	14.5	1051	2.30/3140	1.20	0.35	5.0;6.3;8.0	175	0.035				
Ø выпрямительного элемента 56мм																
ДЧ453-630*	1600-2200	85	630(100)		11.0	605	2.80/1980			1.6; 2; 2.5; 3.2	150	0.020	24	0.550	PD53	O153, O253
ДЧ353-800	3000-4600	50	800(93)	1600	9.5	451	3.50/2500	1.40	0.84	6.3	140	0.020				
ДЧ453-800*	3000-4600	100	800(90)	1280	16.0	1280	3.20/2512	1.40	0.84	1900 ^{ns} ; 700 ^{ns}	140	0.020				
ДЧ453-1000*	1600-2500	70	1000(100)	1600	25.0	3125	2.00/3140	1.10	0.50	1200 ^{ns} ; 600 ^{ns}	150	0.020				
Ø выпрямительного элемента 76мм																
ДЧ273-2000	1400-2200	150	2000(100)		32.0	2120	2.10/6280			5.0;6.3;8.0	140	0.011	45	1.300	PD73	O173,O273, OM107,OM207, OM108
ДЧ373-2000*	1000-2400	100	2000(113)	3200	48.0	4500	2.0/6280	1.08	0.125	4.0;5.0;6.3;8.0	150	0.011				

По заданному времени выключения с учетом напряжения питания и тока нагрузки из приведенных таблиц 4.1 и 4.2 выбирают тиристор и диод:

ТАИ143-630 – тип тиристора

ДЧ333-400 – тип диода

4.1. Расчет емкости коммутирующего конденсатора

Для запираания тиристора в базовой схеме преобразователя предусмотрен коммутационный узел, содержащий конденсатор (C_K), реактор (L_K), диод, включенный встречно-параллельно выключаемому тиристор (VD2), и коммутирующий тиристор (VS2), отпирание которого определяет начало коммутационного процесса.

Для запираания тиристора необходимо выполнить два условия:

- снизить прямой ток через тиристор до нуля;
- предоставить тиристор время, необходимое для восстановления запирающих свойств;

На рисунке 4.1 изображены диаграммы изменения тока и напряжения на обкладках конденсатора с момента включения коммутирующего тиристора (ток I_p нагрузки принимается неизменным по величине).

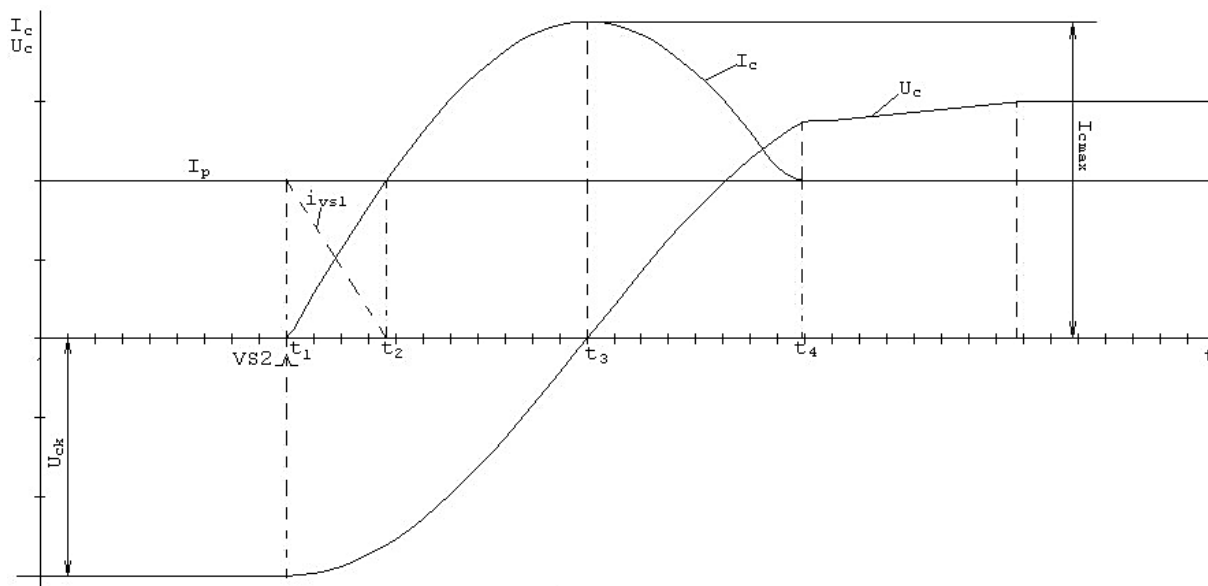


Рисунок 4.1- График диаграммы изменения тока и напряжения на обкладках конденсатора с момента включения коммутирующего тиристора

Интервалы времени (Рисунок 4.1):

$t_1 \dots t_2$ —замещение тока в запираемом тиристоре;

$t_2 \dots t_4$ —схемное время выключения тиристора;

$t_4 \dots t_5$ —дозаряд коммутирующего конденсатора током нагрузки.

Ёмкость коммутирующего конденсатора:

$$C_k = \frac{I_p \cdot t_q \cdot K_n}{2\alpha U_{d\min} \arccos \frac{1}{K_n}} = C_0 \frac{K_n}{2 \arccos \frac{1}{K_n}}; \quad (4.1)$$

Опыт показывает, что величина емкости конденсатора минимальна, если коэффициент коммутационной способности K_n составляет 1,4-1,65:

$$K_n = \frac{I_{c\max}}{I_p} \quad (4.2)$$

$$I_{c\max} = \frac{\alpha U_{d\min}}{\rho} \quad (4.3)$$

ρ —волновое сопротивление контура $C_k - L_k$

$$\rho = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$$

α —коэффициент снижения напряжения при подготовительном перезаряде конденсатора.

$$\alpha = 0,8 \dots 0,9.$$

$U_{d\min}$ —минимальное напряжение источника питания.

$$U_{d\min} = 0,75U_d.$$

В интервале схемного времени выключения Δt_{cx} к тиристоры VS1 прикладывается незначительное обратное напряжение (порядка 1В). Учитывая это, принимая во внимание скорость нарастания напряжения на тиристоре и разброс параметров узла коммутации, в формулу (4.1) вводят коэффициент γ , равный 3. Тогда:

$$C_k = C_0 \frac{K_n \gamma}{2 \arccos \frac{1}{K_n}}; \quad (4.4)$$

$$C_k = \frac{I_p \cdot t_q \cdot K_n \cdot \gamma}{2 \cdot \alpha \cdot U_{d\min} \cdot \arccos(1/K)} = \frac{175 \cdot 8 \cdot 1,5 \cdot 3}{2 \cdot 0,8 \cdot 2250 \cdot 0,84} = 2,1 \text{ мкФ}$$

Из таблицы выбирают тип конденсатора удовлетворяющего необходимым условиям:

РСТ-2-2 12 У2 $U_{\text{нк}}=3150 \text{ В}$, $f=800 \text{ Гц}$, $C=2,12 \text{ мкФ}$.

Количество параллельно соединённых конденсаторов для получения необходимой ёмкости:

$$N_{C_k} = C_k / C$$

Значение округляется в сторону большего целого:

$$N_{C_k} = 2,1 / 2,12 = 1$$

Тогда:

$$C_k = C \cdot N_{C_k} = 2,12 \cdot 1 = 2,12 \text{ мкФ}$$

Определение количества последовательно соединённых групп конденсаторов по напряжению.

Номинал напряжения на 1 конденсаторной сборке $U_{\text{сб}} = U_{\text{дmax}} / N_{\text{гр}}$, но должно выполняться условие $U_{\text{сб}} < U_{\text{нк}}$, $U_{\text{дmax}} = k_1 \cdot U_{\text{д}}$, где k_1 - коэффициент превышения напряжения питания, вызванный колебаниями напряжения в контактной сети $k_1 = 1,3-1,4$.

Тогда:

$$U_{\text{дmax}} = U_{\text{дmax}} = 3000 \cdot 1,35 = 4050 \text{ В}$$

Количество групп в последовательной сборке (значение округляется в сторону большего целого).

$$N_{\text{гр}} = U_{\text{дmax}} / U_{\text{нк}} = 4050 / 3150 = 2$$

$$U_{\text{сб}} = 4050 / 2 = 2025 \text{ В} < U_{\text{нк}}$$

Так как при последовательном соединении ёмкость конденсаторной сборки уменьшится в $N_{\text{гр}}$ раз, то их цепочку необходимо соединить в $N_{\text{гр}}$ параллельных ветвей.

4.2. Расчет индуктивности реакторов узла коммутации

Индуктивность коммутирующего контура:

$$L_k = \frac{C_0 U_{c\min}^2}{K_n^2 I_p^2}, \quad (4.5)$$

$$L_k = \frac{C_k \cdot U_{c\min}^2}{K^2 \cdot I_p^2} = \frac{2,12 \cdot 10^{-6} \cdot 2250^2}{1,5^2 \cdot 175^2} = 155,7 \text{ мкГн}$$

Используем реактор– ДК-6, $L_k = 25$ мкГн

$$L_k = 7 * L_{\text{ДК-6}} = 7 * 25 = 175 \text{ мкГн}$$

Индуктивность перезарядного реактора, обеспечивающего допустимую скорость нарастания тока тиристора:

$$L_{\Pi} = \frac{U_{c\max}}{\left(\frac{d_i}{d_t}\right)_{\text{crit}}} = \frac{3900}{1200} = 3,25 \text{ мкГн}$$

где $U_{C\max} = 1,3 * U_d = 1,3 * 3000 = 3900$ В

4.3. Определение максимально допустимой частоты регулирования

Если f – частота регулирования, то период:

$$T = \frac{1}{f} = \Delta t_{\text{и}} + \Delta t_{\text{п}}, \quad (4.7)$$

$\Delta t_{\text{и}}, t_{\text{п}}$ – продолжительность импульса и паузы выходного напряжения, средняя величина которого определяется из выражения:

$$U_{\text{н}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \lambda \cdot U_d \cdot \quad (4.8)$$

Относительное время потребления энергии от источника питания (коэффициент заполнения):

$$\lambda = \frac{\Delta t_{\text{и}}}{T} = \frac{T - \Delta t_{\text{п}}}{T} \quad (4.9)$$

В преобразователе с емкостной коммутацией продолжительности интервала $\Delta t_{\text{и}}$ и, следовательно, максимально допустимая (предельная для заданной величины тока нагрузки) частота регулирования зависит от параметров тиристорных двигателей, питающего напряжения.

Для заданной схемы преобразователя коэффициент заполнения, определяющий величину тока I_p при скорости тягового двигателя, равной нулю может быть определен из двух выражений:

$$\lambda_p = \frac{\Delta U}{U_d}; \lambda_p = \frac{\Delta t_{II}}{T}; \quad (4.10)$$

Тогда период регулирования:

$$T = \Delta t_{II} \cdot \frac{U_d}{\Delta U}; \quad (4.11)$$

В этом выражении:

ΔU – рассчитано по формуле

Δt_{II} – определяется из диаграммы токов и напряжений для схемы как сумма интервалов:

$$\Delta t_{II} = \Delta t_{III} + \Delta t_y + \Delta t_3 + \Delta t_k + \Delta t_{доз} \quad (4.12)$$

Δt_{III} – продолжительность подготовительного перезаряда коммутационного конденсатора:

$$\Delta t_{III} = \pi \sqrt{L_n C_k}; \quad (4.13)$$

$$\Delta t_{III} = \pi \cdot \sqrt{(175 \cdot 2,12) \cdot 10^{-12}} = 60,48 \text{ мкс.}$$

Δt_y – интервал регулируемый, задаваемый системой управления; для определения максимально допустимой частоты регулирования примем $\Delta t_y = 0$

Δt_3 – время замещения тока запираемого тиристора:

$$\Delta t_3 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{1}{K} \quad (4.14)$$

Здесь $\omega_k = \frac{1}{\sqrt{L_k \cdot C_k}}$ – собственная частота контура коммутации.

$$\omega_k = 1 / \sqrt{(175 \cdot 2,12) \cdot 10^{-12}} = 51917,4 \text{ с}^{-1}$$

$$\Delta t_3 = 1 / 51917,4 \cdot \arcsin(1/1,5) = 1 / 51917,4 \cdot 0,73 = 14 \text{ мкс}$$

Δt_k – схемное время выключения тиристора:

$$\Delta t_k = \frac{2}{\omega} \arccos \frac{1}{K} \quad (4.15)$$

$$\Delta t_k = 2/51917,4 \cdot 0,84 = 32,3 \text{ мкс}$$

Время дозаряда определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{доз}} = \frac{C_k \Delta U_c}{I_p}, \quad (4.16)$$

так как:

$$\frac{\Delta t_k}{2} = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{1}{K}, \quad (4.17)$$

$$u_c(t) = u_{c \min} \cdot \sin \omega \frac{\Delta t_k}{2} = U_{d \min} \cdot \alpha \cdot \sin \left(\arccos \frac{1}{K} \right) = U_{d \min} \cdot \alpha \frac{\sqrt{K^2 - 1}}{K}, \quad (4.18)$$

То:

$$\Delta U_c = U_{d \min} \cdot \alpha \left(\frac{K - \sqrt{K^2 - 1}}{K} \right), \quad (4.19)$$

и следовательно:

$$\Delta t_{\text{доз}} = \frac{C_k \cdot U_{d \min} \cdot \alpha (K - \sqrt{K^2 - 1})}{I_p \cdot K}, \quad (4.20)$$

$$\Delta t_{\text{доз}} = 2,14 * 2250 * 0,8 * (1,5 - \sqrt{(1,5^2 - 1)}) / 175 * 1,5 = 5,58 \text{ мкс}$$

Тогда частота регулирования с учетом (4.11) и (4.12) определяется из выражения:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\Delta U}{U_{d \max} (\Delta t_{III} + \Delta t_3 + \Delta t_k + \Delta t_{\text{доз}})}; \quad (4.21)$$

$$f = 139 / (3900 * (60,48 + 14,00 + 32,30 + 5,58)) = 317 \text{ Гц.}$$

Тогда: $T = 1/f = 1/317 = 3155 \text{ мкс}$

В заданной схеме Δt_y может изменяться от нуля до значения $T - (\Delta t_{III} + \Delta t_3 + \Delta t_k + \Delta t_{\text{доз}}) = 3155 - (60,48 + 14,00 + 32,30 + 5,58) = 3042,64 \text{ мкс}$

5. Расчет внешних характеристик преобразователя

Внешней характеристикой называется зависимость выходного напряжения преобразователя от тока нагрузки, т.е.:

$$U_{\text{вых}} = f(I_{\text{об}}).$$

Выходное напряжение определяется длительностью импульса напряжения Δt_H :

$$\Delta t_H = 60,48 + 0 + 14 + 32,30 + 5,58 = 112,36 \text{ мкс}$$

Расчет внешних характеристик удобно производить в относительных величинах, так как коэффициент заполнения:

$$\lambda = \frac{\Delta t_H}{T} = \frac{\Delta t_{III} + \Delta t_y + \Delta t_z + \Delta t_k + \Delta t_{\text{ооз}}}{T}; \quad (5.1)$$

Для расчета принимают базовые, независимые от тока нагрузки, величины:

T_k – период собственных колебаний контура $C_k - L_k$.

$$T_k = 2\pi \sqrt{L_k C_k}; \quad (5.2)$$

$$T_k = 2\pi \sqrt{(175 \cdot 2,12) \cdot 10^{-12}} = 121 \text{ мкс}.$$

$I_{c \text{ max}}$ – максимальное значение тока конденсатора C_k при его перезаряде (4.3)

так как:

$$\omega = 2\pi \cdot f_k, \quad \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} = \frac{2\pi}{T_k}, \text{ то с учетом (4.3):}$$

$$I_{c \text{ max}} = \frac{\alpha U_d C_k 2\pi}{T_k}; \quad (5.3)$$

$$I_{c \text{ max}} = 0,8 \cdot 3000 \cdot 2,12 \cdot 10^{-6} \cdot 6,28 / 121 \cdot 10^{-6} = 264 \text{ А}$$

Разделив числитель и знаменатель выражения (5.1) на период T_k , принимая во внимание выражения, получим выражение для коэффициента заполнения:

$$\lambda(k) = \frac{0,5\sqrt{\frac{L_n}{L_k}} + \frac{1}{2\pi} \cdot \arcsin \frac{1}{K} + \frac{1}{\pi} \arccos \frac{1}{K} + \frac{K - \sqrt{K^2 - 1}}{2\pi K} + \frac{\Delta t_y}{T_k}}{T/T_k}; \quad (5.4)$$

Обозначив:

$$\Delta t_y / T_k = K_1, \quad T / T_k = K_2, \quad 0,5\sqrt{\frac{L_n}{L_k}} = K_3$$

Тогда формула (5.4) будет иметь вид:

$$\lambda(k) = \frac{K_3 + \frac{1}{2\pi} \cdot \arcsin \frac{1}{K} + \frac{1}{\pi} \arccos \frac{1}{K} + \frac{K - \sqrt{K^2 - 1}}{2\pi K} + K_1}{K_2}; \quad (5.5)$$

Изменяя коэффициент K в пределах от 1,5 до 10 рассчитывают внешние характеристики в относительных единицах, т.е. $\lambda = \lambda(K)$ для нескольких значений K_1 в соответствии с (5.5) при фиксированном значении K_2 .

В таблицах 5.1, 5.2 приведены внешние характеристики преобразователя в относительных и абсолютных значениях.

Таблица 5.1- Значения коэффициента K преобразователя

K	$\Delta t_y, \text{ мкс}$						
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000
1,5	0,0356	0,1944	0,3533	0,5125	0,6702	0,8302	0,9891
2	0,0362	0,1950	0,3539	0,5131	0,6708	0,8308	0,9896
4	0,0372	0,1961	0,3549	0,5141	0,6718	0,8318	0,9907
6	0,0376	0,1964	0,3553	0,5145	0,6722	0,8322	0,9910
8	0,0379	0,1967	0,3556	0,5148	0,6725	0,8325	0,9913
10	0,0380	0,1968	0,3557	0,5149	0,6726	0,8326	0,9914
	λ						

Пример расчета:

$$K_2 = T/T_K = 3155/121=26$$

$$K_3 = 0,5$$

$$K_1 = \Delta t_y / T_K = 500/121=4,13$$

$$K=1,5$$

$$\Delta t_y = 500 \text{ мкс}$$

$$\lambda = \frac{0,5 + 0,16 \cdot 0,73 + 0,32 \cdot 0,84 + \frac{1,5 - \sqrt{1,5^2 - 1}}{6,28} + 4,13}{26} = 0,1944$$

Для получения зависимостей $U_{\text{оэ}} = f(I)$ для нескольких значений коэффициента K определяют коэффициенты заполнения по характеристике $\lambda = f(K)$ и рассчитывают напряжение $U_{\text{оэ}}$ и ток I_H , пользуясь выражениями:

$$\lambda = \frac{U_{\text{оэ}}}{U_d}; K = \frac{I_{c \text{ max}}}{I}$$

Таблица-5.2 Расчет значения $I_{c \text{ max}}/K$ преобразователя

$I_{c \text{ max}}/K$	$\Delta t_y, \text{ мкс}$						
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000
176	106,8	583,2	1059,9	1537,5	2010,6	2490,6	2967,3
132	108,6	585,0	1061,7	1539,3	2012,4	2492,4	2968,8
66	111,6	588,3	1064,7	1542,3	2015,4	2495,4	2972,1
44	112,8	589,2	1065,9	1543,5	2016,6	2496,6	2973,0
33	113,7	590,1	1066,8	1544,4	2017,5	2497,5	2973,9
26,4	114,0	590,4	1067,1	1544,7	2017,8	2497,8	2974,2
$I_{\text{дв}}$	$U_{\text{вых}}$						

Пример расчета:

$$I_{\text{дв}} = I_{c \text{ max}}/K = 264/1,5 = 176 \text{ А}$$

$$U_{\text{вых}} = \lambda * U_{\text{вых}} = 0,0356 * 3000 = 106,8 \text{ В}$$

6. Расчет параметров фильтров

6.1. Входной фильтр

Импульсный преобразователь создает мешающее воздействие на устройства автоблокировки, локомотивной сигнализации, воздушные и кабельные линии связи в результате появления переменной составляющей в токе, потребляемого от источника питания.

Влияние на линии связи оценивается величиной напряжения шума $U_{ш}$ (1,0...2,5мВ) и эквивалентного мешающего напряжения $U_{ЭМ}$, в контактной сети, которое создает в соседней схеме такие же помехи, как действительное напряжение.

$$U_{ЭМ} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (U_k S_k)^2}, \quad (6.1)$$

U_k – действующее значение напряжения отдельной гармонической составляющей,

S – коэффициент акустического воздействия.

Высшие гармонические составляющие потребляемого тока оказывают влияние на устройства СЦБ и АЛСН, которое определяется эквивалентным мешающим током:

$$I_{ЭМ} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_k S_k)^2} \quad (6.2)$$

здесь

$I_{ЭМ}$ – действующее значение переменной составляющей тока сети,

I_k – действующее значение тока отдельной гармонической составляющей.

$I_{ЭМ}$ принимается равным 100 мА.

Для уменьшения пульсаций тока сети применяют входные фильтры, состоящие из реакторов и конденсаторов

В данном преобразователе используем Γ – образный фильтр (Рисунок 6.1)

Изменение напряжения на конденсаторе и тока реактора показано на рисунке 6.2.

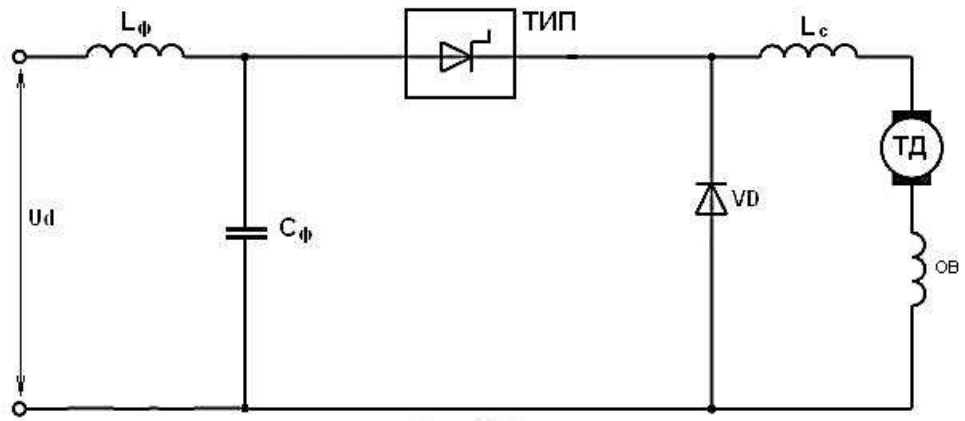


Рисунок 6.1- Г – образный фильтр, используемый в преобразователе

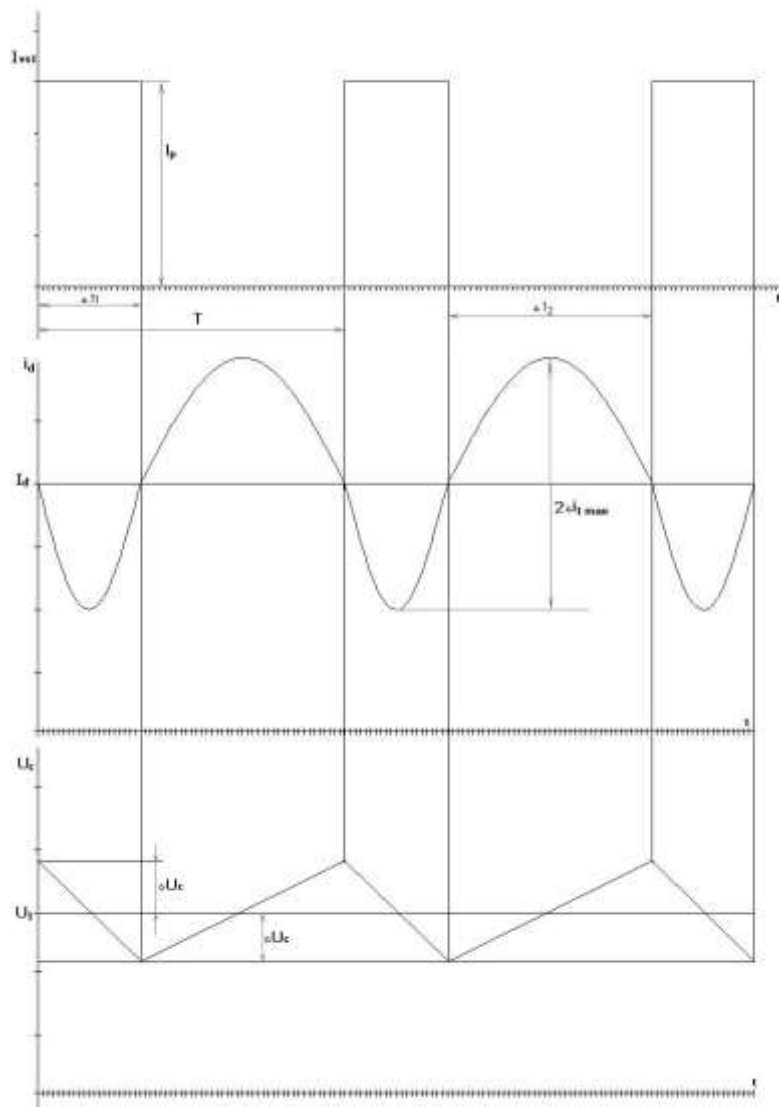


Рисунок 6.2- Изменение напряжения на конденсаторе преобразователя

В пределах каждого интервала времени периода регулирования можно без значительной погрешности заменить гармоническую функцию $U_c(t)$ на прямолинейные отрезки.

u_1 – средняя величина напряжения на конденсаторе C_ϕ ;

I_{TST1} – ток через рабочий тиристор в интервале времени Δt_1 принимаем постоянным.

Не учитывая потери в преобразователе и считая, что:

$$u_d = u_1$$

Можно записать для средних значений напряжения на нагрузке и тока, потребляемого из сети:

$$U_H = \lambda U_d; I_d = \lambda I_p,$$

I_d – ток, потребляемый из сети.

При выключенном рабочем тиристоре средний ток сети равен току заряда конденсатора фильтра. Тогда полное изменение напряжения на конденсаторе за интервал Δt_2 равно:

$$2\Delta u_c = \frac{I_d(T - \Delta t_1)}{C_\phi}; \quad (6.3)$$

$$2\Delta u_c = \frac{\lambda I_p(T - \Delta t_1)}{C_\phi} = \frac{I_p \cdot T}{C_\phi}(\lambda - \lambda^2); \quad (6.4)$$

Максимальная величина пульсаций напряжения конденсатора фильтра Δu_c может быть определена из условия:

$$2 \frac{d\Delta u_c}{d\lambda} = \frac{I_p T}{C_\phi} (1 - 2\lambda) = 0 \quad (6.5)$$

$$\lambda = 0.5$$

Подставляя значение $\lambda = 0,5$ в выражение (6.4), получаем:

$$2\Delta u_c = \frac{I_p T}{C_\phi} \cdot \frac{1}{4}; \quad \Delta u_c = \frac{I_p T}{C_\phi 8} = \frac{I_p}{8fC_\phi} \quad (6.6)$$

Емкость конденсатора и индуктивность реактора для одного преобразователя определяют по формулам:

$$C_\phi = \frac{I_p}{8f\Delta u_c} [\Phi] \quad (6.7)$$

$$L_\phi = \frac{I_p}{32f^2 C_\phi 2\Delta i_d} [\Gamma H] \quad (6.8)$$

Для расчета можно принять $2\Delta u_c = 100B$, $2\Delta i_d = 1A$.

Так как от одного входного фильтра питаются через $N_{пр.}$ преобразователей несколько групп тяговых двигателей, причем, главные тиристоры отпираются со сдвигом по времени на $T/N_{пр.}$, то емкость и индуктивность, рассчитанные по формулам (6.7) и (6.8) уменьшаются в $N_{пр.}$ раз.

$$C_\phi = \frac{I_p}{8 \cdot f \cdot \Delta U_c} = \frac{175}{8 \cdot 317 \cdot 50 \cdot 4} = 345 \text{ мкФ}$$

$$L_\phi = \frac{I_p}{32 \cdot f^2 \cdot C_\phi \cdot 2\Delta i_d \cdot N_{пр}} = \frac{175}{32 \cdot 317^2 \cdot 345 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 4} = 39,4 \text{ мГн}$$

Собственная частота фильтра:

$$f_\phi = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{C_\phi \cdot L_\phi}} = \frac{1}{6,28 \cdot \sqrt{345 \cdot 10^{-6} \cdot 39,4 \cdot 10^{-3}}} = 43,2 \text{ Гц}$$

Для исключения возникновения резонансных колебаний в контуре “конденсатор фильтра – сеть “ необходимо выполнить условие: $f_\phi \leq \frac{2}{3} f$.

$$43,2 < 2/3 * 317, \text{ что удовлетворяет условию } f_\phi \leq 2/3 f$$

6.2 Выходной фильтр

При импульсном регулировании напряжения ток нагрузки (тяговых двигателей) имеет пульсирующий характер. Высшие гармонические составляющие влияют на потери в двигателе, ухудшая КПД.

Размах пульсации тока определяют из выражения:

$$\Delta I = \frac{U_d \lambda (1 - \lambda)}{L f} \quad (6.14)$$

Здесь:

$$L = L_c + L_{я},$$

где L_c , $L_{я}$ – индуктивность сглаживающего реактора и обмотки якоря.

$$L_{я} = \beta \frac{U_H}{p I_H \omega} \quad (6.15)$$

В этом выражении:

p – число пар полюсов двигателя ($p=2$), $\beta=0,25$ и $0,6$ для компенсированного и некомпенсированного двигателя соответственно, ω – круговая частота вращения двигателя

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad n = 800 - 900 \text{ об/мин.}$$

$$n = 850 \text{ об/мин}$$

$$\omega = 89,0 \text{ с}^{-1}$$

Примем $\beta = 0,25$, $p=2$

$$L_{я} = \beta \cdot \frac{U_H}{p \cdot I_H \cdot \omega} = 0,25 \cdot \frac{1500}{2 \cdot 125 \cdot 89} = 16,9 \text{ мГн}$$

Принимая величину $\Delta I = 0,1 I_p$ и $\lambda = 0,5$, определяем значение индуктивности L .

$$L = \frac{U_d \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)}{0,1 \cdot I_p \cdot f} = \frac{3000 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}{0,1 \cdot 175 \cdot 317} = 135 \text{ мГн}$$

Тогда индуктивность сглаживающего реактора с учетом числа последовательно включенных якорей $n_{я}$:

$$L_c = L - n_{я} \cdot L_{я} \quad (6.16)$$

$$L_c = 135 - 2 \cdot 16,9 = 101,2 \text{ мГн.}$$

Принимая вычисленное значение L неизменным, рассчитывают зависимость $\Delta I(\lambda)$.

В соответствии с формулой (6.14) строят зависимость $\Delta I = f(\lambda)$ для расчетной частоты регулирования (Рисунок 6.3).

Таблица-6.1 Значения зависимости $\Delta I = U_{\partial B} = f(\lambda)$

λ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\Delta I, A$	0	6,3	11,2	14,7	16,8	17,5	16,8	14,7	11,2	6,3	0

Пример расчета:

$$\Delta I = \frac{U_d \cdot \lambda(1-\lambda)}{L \cdot f} = \frac{3000 \cdot 0,1 \cdot (1-0,1)}{135 \cdot 10^{-3} \cdot 317} = 6,3A$$

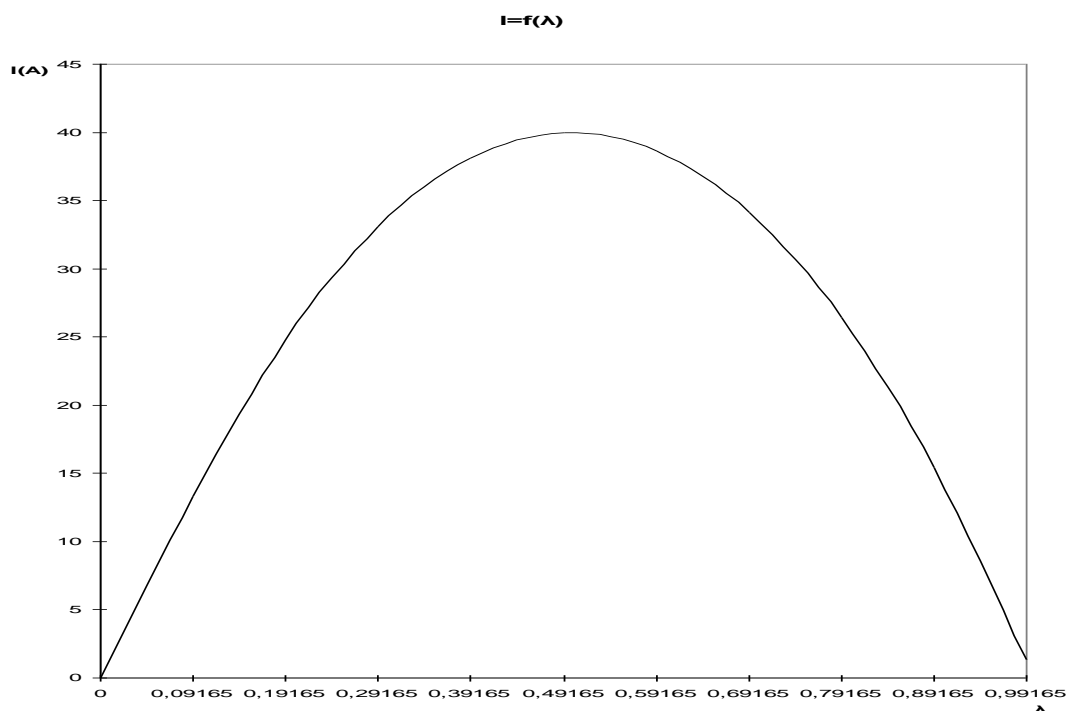


Рисунок 6.3- График зависимости $\Delta I(\lambda)$

7. Расчет числа полупроводниковых приборов

Необходимо иметь следующие данные:

- максимальное напряжение на участке схемы преобразователя;
- наибольший средний ток элементов преобразователя;
- типы тиристоров и диодов;
- максимально допустимый средний ток тиристора и диода при заданных условиях работы;

7.1 Последовательно соединенные приборы

Максимальное напряжение на входе преобразователя с учетом пульсации напряжения на конденсаторе входного фильтра:

$$U_{\max} = U_{d\max} + \frac{\Delta U_{C\Phi}}{2} = (1,35 - 1,4)U_d \quad (7.1)$$

Число последовательно включенных СПП:

$$m_{\text{ПВС}} = \frac{U'_{\max}}{U_{RRM} \cdot k_1} + 1 \quad (7.2)$$

где U_{RRM} – повторяющееся напряжение; $U_{RRM} = 1300$ В (в соответствии с выбранным тиристором) U'_{\max} – максимальное мгновенное напряжение на участке схемы:

$$U_{\max} = U'_{\max} = 1,35 \cdot 3000 = 4050 \text{ В.}$$

k_1 – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение напряжения на приборах из-за разброса сопротивлений шунтирующих резисторов; $k_1 = 0,8$; для лавинных приборов $k_1 = 1$.

$$m_{\text{ПВС}} = \frac{U'_{\max}}{U_{RRM} \cdot k_1} + 1 = \frac{4050}{1300 \cdot 0,8} + 1 = 4,89 \approx 5 \text{ шт}$$

С учетом коммутационных и атмосферных перенапряжений:

$$m_{\text{ПВС}} = \frac{U'_{\max} \cdot H}{U_{RSM} \cdot k_1} + 1 = \frac{4050 \cdot 1,2}{1508 \cdot 0,8} + 1 = 5,0 \text{ шт} \quad (7.3)$$

где U_{RSM} – не повторяющееся напряжение $U_{RSM} = 1,16 U_{RMM} = 1,16 \cdot 1300 = 1508$ В

N – коэффициент, учитывающий атмосферные коммутационные перенапряжения.

$$N=1.16\dots 1.3$$

Полученные по формулам (7.2) и (7.3) результаты округляются до ближайшего большего целого числа и из них выбирается большее значение.

Число последовательно соединённых диодов:

$$m_{IVD} = \frac{4050}{1600 \cdot 1} + 1 = 3,53 \approx 4шт$$

Число последовательно включённых диодов с учётом коммутационных и атмосферных перенапряжений:

$$m_{IVD} = \frac{4050 \cdot 1,2}{1856 \cdot 1} + 1 = 3,62 \approx 4шт$$

Окончательные значения:

$$m_{IVS}=5$$

$$m_{IVD}=4$$

7.2 Параллельно соединенные приборы

Число параллельно включённых приборов в плече преобразователя:

$$a_{II} = \frac{I_p}{I_{AVMm} \cdot k_2 \cdot k_\tau \cdot k_I};$$

где:

I_p –средний расчетный ток нагрузки;

k_2 – коэффициент, учитывающий снижение скорости охлаждающего воздуха при уменьшении напряжения контактной сети; $k_2=0,8$;

k_τ –коэффициент, учитывающий подогрев охлаждающего воздуха в преобразователе при последовательном расположении нескольких охладителей; $k_\tau=0,9$;

k_I –коэффициент, учитывающий неравномерность деления тока по параллельным цепям;

При наличии делителей тока $k_I=0,9$ при их отсутствии $k_I=0,8$.

I_{AVM} –максимально допустимый средний ток прибора для заданных условий работы.

Предельный ток тиристоров и диодов импульсных преобразователей необходимо рассчитывать, исходя из заданных условий работы по формулам:

$$I_{FAV_m} = \frac{\sqrt{U_{(TO)}^2 + 4k_\phi^2 r_T \frac{T_{jm} - T_a}{R_{thja}}} - U_{(TO)}}{2k_\phi^2 r_T}; \quad (7.5)$$

$$I_{TAV_m} = \frac{\sqrt{U_{T(TO)}^2 + 4k_\phi^2 r_T \frac{T_{jm} - T_a}{R_{thja}}} - U_{T(TO)}}{2k_\phi^2 r_T}; \quad (7.6)$$

Для диода и тиристора соответственно.

В этих выражениях:

$U_{(TO)}$, $U_{T(TO)}$ – пороговое напряжение;

r_T – дифференциальное сопротивление;

T_{jm} – максимально допустимая температура перехода;

T_a – температура охлаждающей среды;

R_{thja} – тепловое сопротивление переход–среда;

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}; \quad (7.7)$$

R_{thjc} –тепловое сопротивление переход–корпус;

R_{thch} –тепловое сопротивление корпус–контактная поверхность охладителя;

R_{thha} –тепловое сопротивление контактная поверхность охладителя– охлаждающая среда;

Для главного тиристора VS1:

$$K_\phi = \sqrt{\frac{1}{\lambda_p}} = \sqrt{\frac{1}{0,85}} = 1,08$$

$$I = I_p \cdot \lambda_p = 175 \cdot 0,85 = 148,75A$$

$$I_{TAVm} = \frac{\sqrt{0,95^2 + 4 \cdot 1,08^2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{125 - 25}{0,198}} - 0,95}{2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 1,08^2} = 468A$$

$$a_{nVS1} = \frac{148,75}{468 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 0,55 \approx 1;$$

для коммутирующего тиристора VS2:

$$K_\phi = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T}{t_2}} = \frac{3,14}{2} \sqrt{\frac{121 \cdot 10^{-6}}{60,48 \cdot 10^{-6}}} = 2,22$$

$$I = \frac{2}{\pi} \cdot I_{Cmax} \cdot \frac{\Delta t_2}{T} = \frac{2}{3,14} \cdot 264 \cdot \frac{60,48 \cdot 10^{-6}}{121 \cdot 10^{-6}} = 84A$$

$$I_{TAVm} = \frac{\sqrt{0,95^2 + 4 \cdot 2,22^2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{125 - 25}{0,198}} - 0,95}{2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 2,22^2} = 369A$$

$$a_{nVS2} = \frac{84}{369 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 0,4 \approx 1$$

для обратного диода VD0:

$$K_\phi = \sqrt{\frac{1}{1 - \lambda_p}} = \sqrt{\frac{1}{1 - 0,85}} = 2,58$$

$$I = I_p \cdot (1 - \lambda_p) = 175 \cdot (1 - 0,85) = 26,25A$$

$$I_{TAVm} = \frac{\sqrt{1,2^2 + 4 \cdot 2,58^2 \cdot 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150 - 25}{0,145}} - 1,2}{2 \cdot 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot 2,58^2} = 115A$$

$$a_{nVD0} = \frac{26,25}{288 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 0,4 \approx 1$$

8. Определение параметров защитных элементов для тиристоров и диодов

Для выравнивания токов при параллельном соединении СПП используют делители тока, многотактные и многофазные схемы.

Равномерное распределение напряжения по последовательно включенным СПП достигается за счет активных в статических и емкостных делителей напряжения в динамических режимах. Скорость нарастания напряжения и тока ограничивается R-C-L цепями и насыщающимися реакторами (Рисунок 8.1).

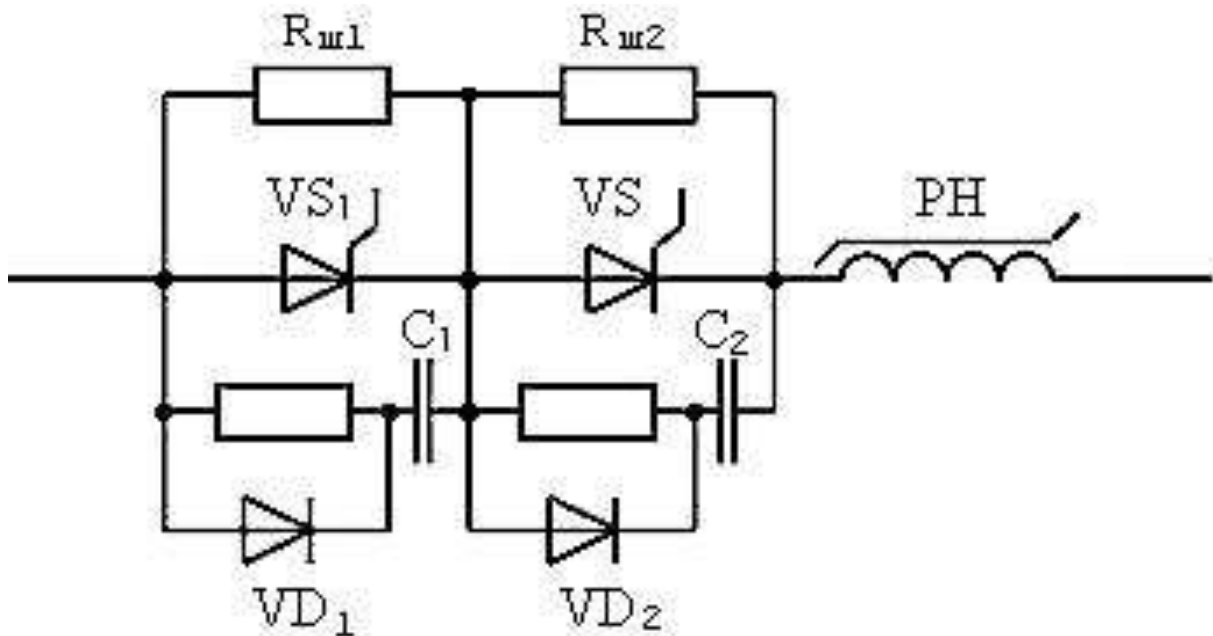


Рисунок 8.1- R-C-L цепи преобразователя

8.1. Расчет делителей напряжения

Сопротивление шунтирующего резистора $R_{ш}$ определяется из выражения:

$$R_{ш} = \frac{m_n U - U_m}{(m_n - 1) I_{R_M}}, \quad (8.1)$$

где m_{Π} –число последовательно включенных приборов;
 U –наибольшее допустимое напряжение прибора;
 U_m –наибольшее напряжение ветви с последовательно включенными приборами;
 I_{RM} –наибольший обратный ток (амплитудное значение).

$$R_{ш} = \frac{m_{\Pi} \cdot U - U_{\max}}{(m_{\Pi} - 1) \cdot I_{RM}} = \frac{5 \cdot 1300 - 4050}{(5 - 1) \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 12,25 \text{ кОм}$$

Мощность резисторов $P_{ш}$ рассчитывается по действующему значению напряжения

$$P_{ш} = \frac{U_{TRSM}^2}{R_{ш}} \quad (8.2)$$

$$U_{TRSM} = \frac{U_{\max}}{m_{\Pi}} = \frac{4050}{5} = 810 \text{ В}$$

$$P_{ш} = P_{ш} = 810^2 / 12250 = 53,6 \text{ Вт}$$

Емкость шунтирующего конденсатора:

$$C > \frac{(m_{\Pi} - 1) \Delta Q_{rr}}{m_{\Pi} U - U_m} 10^{-6} \quad (8.3)$$

Здесь ΔQ_{rr} –наибольшая возможная разность зарядов восстановления последовательно включенных приборов:

$$\Delta Q_{rr} = 190 \text{ мкКл}$$

$$C > \frac{(m_{\Pi} - 1) \Delta Q_{rr}}{m_{\Pi} U - U_{\max}} = \frac{(5 - 1) \cdot 190 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 1300 - 4050} = 0,31 \text{ мкФ}$$

Сопротивление r резисторов принимают равным 30–50 Ом

8.2. Расчет реакторов насыщения

Насыщающийся реактор, ограничивающий величину (di_T/dt) , должен обеспечивать выполнение указанного условия при активном минимальном и реактивном сопротивлении после включения тиристора. Число витков реактора определяется током I , обеспечивающим нормальное развитие процесса включения, равным 1,5–2 А, и временем задержки $t_{зад}$, принимаемым в пределах 10–20 мкс.

$$W = \frac{t_{зад} \cdot U_D}{S \cdot B_r}, \quad (8.4)$$

где U_D – напряжение перед коммутацией;
 $B_r = 1 \text{ Тл}$ – остаточная индукция

С другой стороны по закону полного тока:

$$I_w = H \cdot \ell_{cp} \quad (8.5)$$

Здесь H – коэрцитивная сила, А/м;
 ℓ_{cp} – средняя длина магнитной линии, м.

Для реакторов насыщения необходимы материалы с малой коэрцитивной силой, большой индукцией насыщения, имеющие прямоугольную петлю гистерезиса и минимальные потери энергии в динамическом режиме перемагничивания. К таким материалам относится железоникелевый сплав (пермаллой).

Для ленты из пермаллоя 50 НП толщиной 0,05 можно принять $H=18 \text{ А/м}$ [2].

Примем $t_{зад} = t_{зад} = 10 \text{ мкс}$

$$S \cdot W = \frac{t_{зад} \cdot U_D}{B_r} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 3000}{1} = 0,03 \text{ м}^2 \cdot \text{вит}$$

9. Расчет перегрузочных характеристик тиристора

Исходными данными для расчета рабочих перегрузочных характеристик являются:

- тип прибора и охладителя;
- температура окружающей среды;
- способ и интенсивность охлаждения;
- форма тока.

При рабочих перегрузках диод должен выдерживать обратное напряжение, а тиристор при отсутствии управляющего сигнала не должен переключаться.

Для расчета перегрузочных характеристик рабочего тиристора преобразователя определяют:

максимально допустимый средний ток тиристора I_{TAVm} по формуле при $\lambda = 0,5$;

значения тока предварительной нагрузки и мощность потерь (Таблица-9.1).

$$K_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \sqrt{\frac{1}{0,5}} = 1,41$$

$$I_{TAVm} = \frac{\sqrt{U_{T(ТО)}^2 + 4k_{\phi}^2 r_T \frac{T_{jm} - T_a}{R_{thja}} - U_{T(ТО)}}}{2k_{\phi}^2 r_T}$$

$$I_{TAVm} = \frac{\sqrt{0,95^2 + 4 \cdot 1,41^2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{125 - 25}{0,198}} - 0,95}{2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 1,41^2} = 437A$$

Таблица 9.1- Значения тока предварительной нагрузки и мощность потерь

$\frac{I_T}{I_{TAVm}}$	I_T	$P_T = U_{T(ТО)} \cdot I_T + k_{\phi}^2 \cdot r_T \cdot I_T^2$	$T_j = T_a + R_{thja} \cdot P_T$
0,2	87	86	42
0,4	175	180	61
0,6	262	280	80
0,8	350	389	102

Пример расчета: $I_T = 0,2 \cdot 437 = 87 \text{ A}$

$$P_T = U_{T(ТО)} \cdot I_T + k_\phi^2 \cdot r_T \cdot I_T^2 = 0,95 \cdot 87 + 1,41^2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 87^2 = 86 \text{ Вт}$$

$$T_j = T_a + R_{thja} \cdot P_T = 25 + 0,198 \cdot 86 = 42 \text{ }^\circ\text{C}$$

При расчете температуры T_j используют значение теплового сопротивления R_{thja} , полученное по (8.7).

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha} = 0,028 + 0,02 + 0,15 = 0,198 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

Допустимая амплитуда тока нагрузки при длительной перегрузке 10мс:

$$I_{T(OV)} = \frac{\sqrt{U_{T(ТО)}^2 + 4r_T \left(\frac{T_{jm} - T_j}{z_t} + P_T \right)} - U_{T(ТО)}}{2r_T} \quad (9.1)$$

при длительности импульса 0,1...100 с:

$$I_{T(ТО)} = \frac{\sqrt{U_{T(ТО)}^2 + 4r_T \frac{T_{jm} - T_j + P_T z_x}{z_x k_c^{-1} + (1 - k_c^{-1}) z_\tau - z_T + z_t}} - U_{T(ТО)}}{2r_T} \quad (9.2)$$

В этих выражениях:

z_t – переходное тепловое сопротивление за время, соответствующее эквивалентному прямоугольному импульсу мощности ($t=6\text{мс}$);

$$z_t = 0,009 \text{ Ом}$$

z_T – переходное тепловое сопротивление переход–корпус, соответствующее времени 20 мс;

$$z_T = 0,01 \text{ Ом}$$

z_{τ} –переходное тепловое сопротивление переход–корпус, соответствующее времени $\tau=26\text{мс}$;

$$z_{\tau} = 0,0110\text{М}$$

k_c –коэффициент скважности импульсов тока; $k_c = 3,5$;

z_x –переходные тепловые сопротивления за время $x=0,1$; 1; 10; 100 с.

Величины z_t , z_T , z_{τ} , $z_{0.1\text{с}}$, $z_{1\text{с}}$, $z_{10\text{с}}$ принимают в соответствии со справочными данными на выбранный тип полупроводникового прибора; величины $z_{10\text{с}}^h$, $z_{1\text{с}}^h$ и т.д.– по данным выбранного типа охладителя.

Значение переходного теплового сопротивления прибора с охладителем за время x рассчитывают по формуле:

$$z_x = z_x^h + z_x^{np} + R_{thch} \quad (9.3)$$

где z_x^{np} – тепловое сопротивление прибора.

Указанные в (10.3) величины принимаются по [3].

Расчёт значений переходного сопротивления для всех значений времени:

При длительности перегрузки 0,1 с:

$$z_{0,1} = z_{0,1}^h + z_{0,1}^{np} + R_{thch} = 0 + 0,015 + 0,02 = 0,04 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

При длительности перегрузки 1 с:

$$z_1 = z_1^h + z_1^{np} + R_{thch} = 0 + 0,032 + 0,02 = 0,052 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

При длительности перегрузки 10 с:

$$z_{10} = z_{10}^h + z_{10}^{np} + R_{thch} = 0,02 + 0,035 + 0,02 = 0,075 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

При длительности перегрузки 100 с:

$$z_{100} = z_{100}^h + z_{100}^{np} + R_{thch} = 0,05 + 0,035 + 0,02 = 0,105 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Bm}$$

Используя формулы (9.1) и (9.2) и данные таблицы 9.1, рассчитывают значения допустимой амплитуды тока нагрузки при различных длительностях перегрузки. Результаты расчета перегрузочных характеристик сводятся в таблице 9.2.

Таблица 9.2- Значения допустимой амплитуды тока нагрузки при различных длительностях перегрузки

Длительность перегрузки, с.	Допустимая амплитуда тока перегрузки, А, при предварительной нагрузке (относительно I_{TAVm}).				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
0,01	5185	4624	3933	3152	2066
0,1	3345	2803	2551	2123	1592
1,0	3097	2586	2274	1960	1519
10	2581	2161	1940	1716	1427
100	2133	1807	1667	1532	1356

Пример расчета:

$$I_{T(тo)} = \frac{\sqrt{U_{T(тo)}^2 + 4r_T \cdot \left(\frac{T_{jm} - T_j}{z_t} + P_T \right)} - U_{T(тo)}}{2r_T} = \frac{\sqrt{0,95^2 + 4 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{125 - 42}{0,009} + 86 \right)} - 0,95}{2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3}} = 4624\text{A}$$

$$I_{T(тo)} = \frac{\sqrt{U_{T(тo)}^2 + 4r_T \cdot \left(\frac{T_{jm} - T_j + P_T \cdot z_x}{z_x \cdot k_C^{-1} + (1 - k_C^{-1}) \cdot z_\tau - z_T + z_t} \right)} - U_{T(тo)}}{2r_T} = \frac{\sqrt{0,95^2 + 4 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{125 - 42 + 86 \cdot 0,04}{0,04 \cdot \frac{1}{3,5} + (1 - \frac{1}{3,5}) \cdot 0,011 - 0,01 + 0,009} \right)} - 0,95}{2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3}} = 2803\text{A}$$

По результатам расчета строятся зависимости $I_{T(OV)}=f(t_{п})$ (Рисунок 9.2). Время по оси абсцисс откладывают в логарифмическом масштабе.

10. Расчет КПД преобразователя

$$\eta = \frac{P - \sum \Delta P}{P} \quad (10.1)$$

Здесь P – мощность, потребляемая от источника питания;

$P = U_d I_d$;

$\sum \Delta P$ – суммарные потери мощности.

Основные элементы преобразователя, влияющие на КПД, и электрические величины показаны на рисунке 10.1.

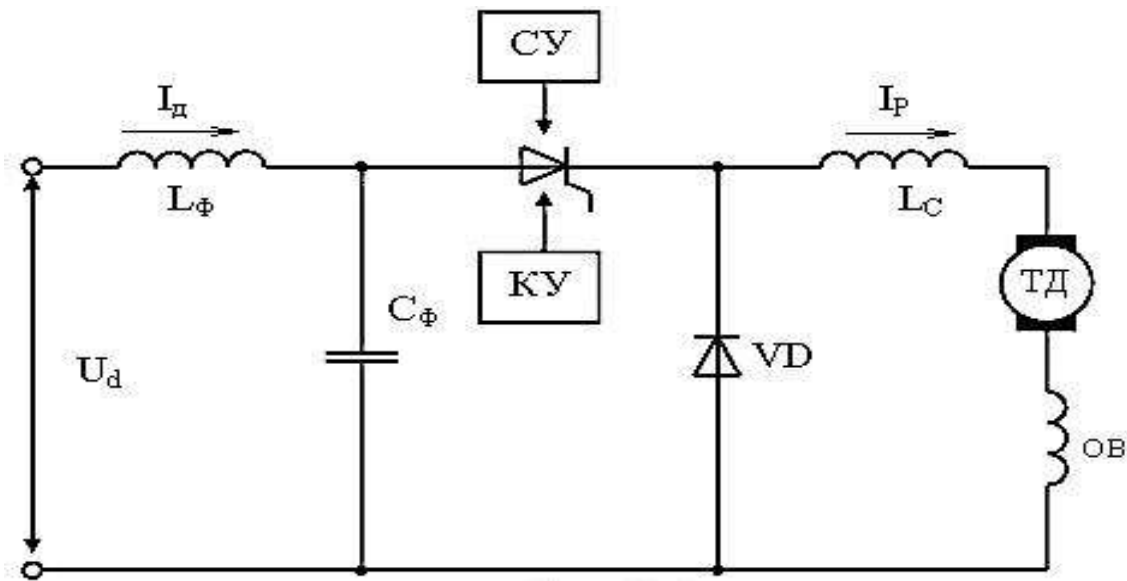


Рисунок 10.1- Основные элементы преобразователя

10.1 Потери в силовых полупроводниковых приборах (СПП)

Потери при прямом токе:

для диода

$$P_{F(AV)} = U_{(TO)} I_{FAV} + k_{\phi T}^2 r_{\phi T} I_{FAV}^2 \quad (10.2)$$

для тиристора

$$P_{T(AV)} = U_{T(TO)} I_{TAV} + k_{\phi T}^2 r_{\phi T} I_{TAV}^2 \quad (10.3)$$

Пренебрегая пульсацией тока нагрузки и влиянием перезаряда на ток главного тиристора выражения для определения потерь в диоде, шунтирующем нагрузку, и в главном тиристоре можно записать в следующем виде:

для диодов:

$$P_{F(AV)} = (1 - \lambda) \cdot \left(U_{(TO)} \cdot \frac{I_p}{a_{\Pi_{VD}}} + r_T \cdot \frac{I_p^2}{a_{\Pi_{VD}}^2} \right) \cdot m_{\Pi_{VD}}; \quad (10.4)$$

для главного тиристора:

$$P_{T(AV)} = \lambda \cdot \left(U_{(TO)} \cdot \frac{I_p}{a_{\Pi_{VS}}} + r_T \cdot \frac{I_p^2}{a_{\Pi_{VS}}^2} \right) \cdot m_{\Pi_{VS}}; \quad (10.5)$$

Потери в СПП контура коммутации рассчитывают по формуле:

$$P'_{T(AV)} = \frac{I_{C \max}}{a_{\Pi_{VS}}} \cdot \frac{T_K}{2T} \cdot \left(U_{T(TO)} \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} r_T \cdot \frac{I_{C \max}}{a_{\Pi_{VS}}} \right); \quad (10.6)$$

Потери при включении тиристора:

$$P_{TT} = \frac{U_d \cdot I_p}{6} \cdot \frac{t_{gt} - t_{gd}}{T}; \quad (10.7)$$

Здесь t_{gt} – время включения тиристора; $t_{gt} = 1,5$ мкс

t_{gd} – время задержки; $t_{gd} = 0,7$ мкс

U_d – напряжение на тиристоре в выключенном состоянии.

Потери при выключении тиристора:

$$P_{R\theta} = \theta_{rr} U_R f \quad (10.8)$$

где U_R – обратное напряжение на тиристоре при его выключении.

Потери в цепи управления определяются параметрами импульса управления:

$$P'_G = \frac{U_{GT} \cdot i_{FG} \cdot t_H}{T}; \quad (10.9)$$

Ввиду незначительности ($P_G \cong 1\text{Вт}$) потерями в цепях управления можно пренебречь (аналогично потерям от токов утечки).

Потери в коммутирующем конденсаторе за время одного цикла перезаряда:

$$P'_{C_k} = \frac{U_d^2}{2} \omega_k C_k \text{tg} \delta \quad (10.10)$$

Здесь $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь (принимается $\text{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$).

Среднее значение потерь за период:

$$P_{C_k} = \frac{T_k}{T} P'_{C_k}; \quad (10.11)$$

Потери в коммутирующем реакторе:

$$P_{L_k} = I_{\text{эф}}^2 r_{L_k} = I_{C_{\text{max}}}^2 \frac{T_k}{2T} r_{L_k} \quad (10.12)$$

Потери в реакторе L_{ϕ} входного фильтра:

$$P_{L_{\phi}} = \lambda^2 I_p^2 r_{L_{\phi}} \quad (10.13)$$

Потерями в конденсаторе C_{ϕ} можно пренебречь.

Потери в сглаживающем реакторе:

$$P_{L_c} = I_p^2 r_{L_c} \quad (10.14)$$

Сопротивления реакторов в соответствии с [6] рассчитывают по формуле:

$$r_L = \frac{40\sqrt{L}}{I} \quad (10.15)$$

Расчет КПД преобразователя сводим в таблицу 10.1.

Таблица 10.1- Расчет КПД преобразователя

Составляющие потерь	Коэффициент заполнения λ							
	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$P_{F(AV)}, Bm$	1008	967	916	814	611	407	204	0
$P_{T(AV)}, Bm$	8,7	43,3	86,7	173,3	346,6	519,9	693,2	866,5
$P'_{F(AV)}, Bm$	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4
P_{TT}, Bm	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
P_{RQ}, Bm	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
P_{C_K}, Bm	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
P_{L_K}, Bm	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
P_{L_ϕ}, Bm	0,14	3,4	13,8	55,1	220,5	496,1	882	1378
P_{L_C}, Bm	2205	2205	2205	2205	2205	2205	2205	2205
$\Sigma \Delta P, Bm$	3323,54	3320,4	3323,2	3349,1	3484,8	3729,7	4085,9	4551,2
η	0,37	0,87	0,94	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99
$\eta = \eta' \cdot 0,98$	0,36	0,86	0,92	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97

Пример расчета:

$$P_{F(AV)} = (1 - \lambda) \cdot \left(U_{(TO)} \cdot \frac{I_p}{a_{IVD}} + r_T \cdot \frac{I_p^2}{a_{IVD}^2} \right) \cdot m_{IVD} = (1 - 0,01) \cdot \left(1,3 \frac{175}{1} + 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{175^2}{1^2} \right) \cdot 4 = 1008 Bm$$

$$P_{T(AV)} = \lambda \cdot \left(U_{(TO)} \cdot \frac{I_p}{a_{IVS}} + r_T \cdot \frac{I_p^2}{a_{IVS}^2} \right) \cdot m_{IVS} = 0,01 \cdot \left(0,95 \cdot \frac{175}{1} + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{175^2}{1} \right) \cdot 5 = 8,7 Bm$$

$$P'_{T(AV)} = \frac{I_{C_{max}}}{a_{IVS}} \cdot \frac{T_K}{2T} \cdot \left(U_{T(TO)} \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} r_T \cdot \frac{I_{C_{max}}}{a_{IVS}} \right) = \frac{264}{1} \cdot \frac{121}{2 \cdot 3155} \cdot \left(0,95 \cdot \frac{2}{3,14} + 0,5 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{264}{1} \right) = 32,4 Bm$$

$$P_{TT} = \frac{U_d \cdot I_p}{6} \cdot \frac{t_{gt} - t_{gd}}{T} = \frac{3000 \cdot 175}{6} \cdot \frac{1,5 - 0,7}{3155} = 22,2 Bm$$

$$P_{RQ} = Q_{rr} \cdot U_R \cdot f = 190 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \cdot 317 = 36,1 Bm$$

$$P'_{C_K} = \frac{U_d^2}{2} \cdot \omega_K \cdot C_K \cdot tg \delta = \frac{3000^2}{2} \cdot 5191,74 \cdot 2,12 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 247,6 Bm$$

$$P_{C_K} = \frac{T_K}{T} \cdot P'_{C_K} = \frac{121}{3155} \cdot 247,6 = 9,5 Bm$$

$$r_{L_K} = \frac{40 \cdot \sqrt{L}}{I} = \frac{40 \cdot \sqrt{25 \cdot 10^{-6}}}{175} = 1,1 мОм$$

$$P_{L_K} = I_{\Phi}^2 \cdot r_{L_K} = I_{C_{max}}^2 \cdot \frac{T_K}{2T} \cdot r_{L_K} = 264^2 \cdot \frac{121}{2 \cdot 3155} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = 1,5 Bm$$

$$r_{L_\phi} = \frac{40 \cdot \sqrt{L}}{I} = \frac{40 \cdot \sqrt{39,4 \cdot 10^{-3}}}{175} = 45 мОм$$

$$P_{L_\phi} = \lambda^2 \cdot I_p^2 \cdot r_{L_\phi} = 0,01^2 \cdot 175^2 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = 0,14 Bm$$

$$r_{LC} = \frac{40 \cdot \sqrt{L}}{I} = \frac{40 \cdot \sqrt{101,2 \cdot 10^{-3}}}{175} = 72 \text{ мОм}$$

$$P_{Lc} = I_p^2 \cdot r_{Lc} = 175^2 \cdot 72 \cdot 10^{-3} = 2205 \text{ Вт}$$

$$P = U_d \cdot I_d$$

$$P = U_d \cdot I_p \cdot \lambda = 3000 \cdot 175 \cdot 0,01 = 5250 \text{ Вт}$$

$$\eta' = \frac{P - \sum \Delta P}{P} = \frac{5250 - 3323,54}{5250} = 0,37$$

$$\eta = \eta' \cdot 0,98 = 0,37 \cdot 0,98 = 0,36$$

По результатам расчета строится зависимость $\eta(\lambda)$ (Рисунок 10.2)

КПД η

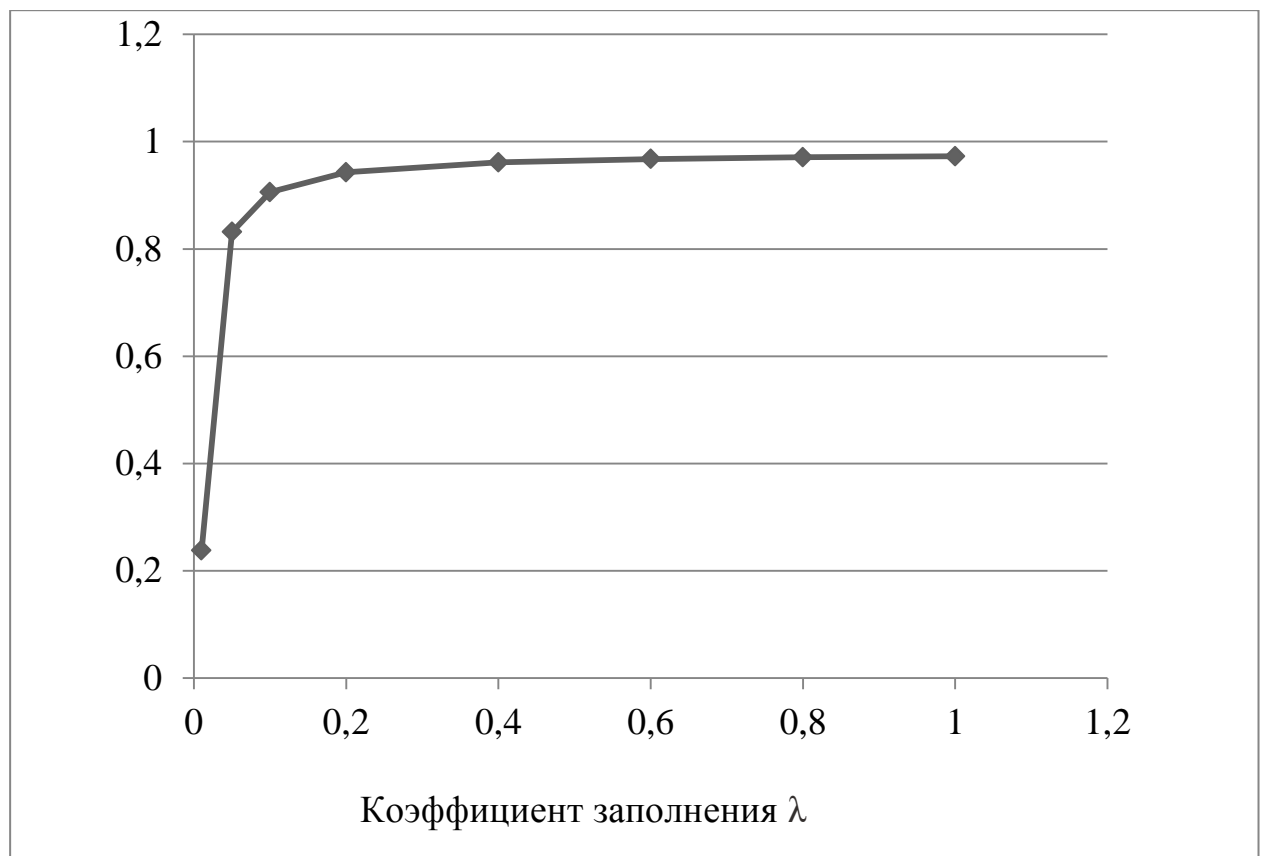


Рисунок 10.2- Зависимость $\eta(\lambda)$

10.2 Определение массы реакторов

Согласно имеющейся формуле определяем массу реакторов:

$$M_p = (0,7...1,0)LI^2 = 0,85 \cdot (0,0394 + 0,1014 + 0,000025) \cdot 175^2 = 3665,8 \text{ кг}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной курсовой работе был произведен расчет параметров импульсного регулятора напряжения для регулирования скорости тяговых электродвигателей постоянного тока. Дано описание работы базовой схемы, приведены диаграммы токов и напряжений в схеме преобразователя за период регулирования, рассчитаны параметры узла коммутации и предельная частота регулирования, определено число последовательно и параллельно соединенных силовых приборов и защитных элементов с учетом их группового соединения, произведен расчет внешних характеристик преобразователя, расчет перегрузочных характеристик главного тиристора базовой схемы при коэффициенте заполнения $\lambda=0,5$, также были определены параметры входных и выходных фильтров, произведен расчет КПД преобразователя и расчет массы реакторов.

Литература

1. Штерн М. И. Силовая электроника. Расчеты и схемотехника. – СПб.: Наука и техника, 2017.
2. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. Учебник. –М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
3. Бирзниекс Л.В. Импульсные преобразователи постоянного тока – М.: Энергия, 2009
4. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. Учебное пособие. –М.: Юрайт, 2015.
5. Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook. USA: Butterworth-Heinemann, 2017.
6. Москатов Е.А. Силовая электроника. Теория и конструирование. – СПб.: Корона-век, 2013.
7. Полуянович Н.К. Силовая электроника. Учебное пособие. -Т.: ТРТУ, 2005.
8. Barry W. Williams. Principles and elements of power electronics. Devices, drivers, applications and passive components. Glasgow, 2006.

Содержание

Введение.....	3
1. Цель курсовой работы.....	4
2. Задачи курсовой работы.....	4
3. Тематика курсовой работы.....	4
4. Выбор темы курсовой работы.....	4
5. Оценка технического задания курсовой работы.....	5
6. Структура и содержание пояснительной записки.....	5
7. Основное содержание элементов курсовой работы.....	5
8. Объем и оформление пояснительной записки.....	7
9. Оформление и нумерация разделов и параграфов.....	8
10. Графическая часть отчета курсовой работы.....	9
11. Формулы и порядок записи уравнений.....	9
12. Оформление приложений курсовой работы.....	10
13. Порядок выполнения курсовой работы.....	11
14. План-график контроля выполнения курсовой работы.....	11
15. Подготовка и защита презентации курсовой работы.....	12
16. Сдача курсовой работы.....	13
17. Критерии оценивания курсовой работы.....	13
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	15
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	16
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	17
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	18
Литература.....	61

Редактор Ахметжанова Г.М.