

17/5/1

**Одобрено кафедрой
«Электрификация
и электроснабжение»**

ЭЛЕКТРОННАЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

**Рабочая программа
и задание на контрольную работу
с методическими указаниями
для студентов V курса
специальности
190302 ВАГОНЫ (В)**



Москва – 2008

Рабочая программа для данной дисциплины разработана в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки дипломированного специалиста по направлению «Подвижной состав железных дорог» специальности 190302 — Вагоны (В).

Составитель — канд. техн. наук, доц. Е.Г. Зенина

Рецензент — д-р техн. наук, проф. В.А. Бугреев

ЭЛЕКТРОННАЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Рабочая программа
и задание на контрольную работу
с методическими указаниями

Редактор *Д.Н. Тихонычев*
Корректор *В.В. Игнатова*
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

Тип. зак.	Изд. зак. 279	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 08.12.08	Гарнитура NewtonС	
Усл. печ. л. 2,0		Формат 60×90 _{1/16}

Издательский центр и Участок оперативной печати
Информационно-методического управления РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© **Российский государственный открытый технический университет
путей сообщения, 2008**

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

1. Цель и задачи дисциплины

1.1. **Целью** изучения дисциплины является освоение студентами методов использования силовых полупроводниковых приборов в электронных преобразователях и аппаратах, формирование навыков расчета, проектирования и выбора преобразователей для обеспечения эффективной работы устройств электрооборудования вагонов, автоматизированного электропривода и тяговой системы электрифицированного транспорта.

1.2. **Задачами** дисциплины является формирование у студентов необходимых знаний и навыков, получив которые студент должен:

- иметь представление об основах теории преобразования электрического тока, видах преобразования электрической энергии на тяговых подстанциях и электроподвижном составе;
- знать физические основы полупроводниковых и других электронных устройств, принцип их действия, предельные параметры;
- знать схемы преобразователей, принципы их работы, методы анализа и расчета устройств в различных режимах работы;
- уметь выбирать схемы преобразователей, тип полупроводникового или электронного прибора по заданным условиям эксплуатации, определять основные энергетические показатели: коэффициент мощности, КПД, гармонический состав выпрямленного и сетевого напряжения и тока, уметь строить внешнюю характеристику;
- владеть методами расчета и разработки конструкции преобразователей в виде системы, состоящей из полупроводниковых приборов, средств их охлаждения, токоведущих частей, коммутационных устройств, устройств управления, защиты и диагностики, в том числе с использованием современных вычислительных средств.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЯЗАТЕЛЬНОМУ МИНИМУМУ СОДЕРЖАНИЯ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ ДИПЛОМИРОВАННОГО СПЕЦИАЛИСТА

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ»

*(основные разделы дисциплины в соответствии
с Государственным образовательным стандартом)*

СД.07. Электронная техника и преобразователи в электро-снабжении: принципы действия и основные характеристики элементов силовой и информационной электроники; статические преобразователи электрической энергии (выпрямители, зависимые инверторы, импульсные регуляторы постоянного напряжения, непосредственные преобразователи частоты, автономные инверторы напряжения и тока): электрические схемы, расчет характеристик и показателей, выбор параметров основных элементов, конструктивное выполнение; системы управления и защита преобразовательных устройств.

3. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Введение

1.1. Электронная техника и преобразователи в электроснабжении как фактор ускорения научно-технического прогресса. Развитие преобразователей электрической тяги.

1.2. Основные виды преобразования электрической энергии и области их применения. Классификация элементов и устройств преобразовательной техники.

1.3. Современное состояние и основные тенденции развития силовой и информационной техники.

Тема 2. Основные элементы силовой и информационной электроники: полупроводниковые приборы

2.1. Теория электронно-дырочного перехода полупроводниковых структур. Собственная и примесная проводимости полу-

проводников. Образование и свойства электронно-дырочного перехода при включении его в электрическую цепь. Пробой электронно-дырочного перехода.

2.2. Полупроводниковые диоды. Принцип действия диодов, их классификация. Вольтамперная характеристика диода, влияние на нее температуры. Параметры диодов, их маркировка, разбросы параметров и характеристик диодов. Потери мощности в диодах и их температурный режим. Системы охлаждения силовых диодов, тепловое сопротивление диодов и охлаждающей системы.

2.3. Групповое соединение полупроводниковых диодов. Параллельное соединение: устройства для выравнивания тока. Последовательное соединение: технические способы обеспечения равномерного распределения напряжения. Схемные решения групповых соединений.

2.4. Транзисторы. Принцип действия биполярных транзисторов. Физические процессы в структуре биполярных транзисторов и схемы их включения в электрическую сеть. Характеристики, параметры и классификация биполярных транзисторов. Принцип действия, характеристики, схемы включения, параметры и классификация полевых транзисторов, типы переходов. Силовые транзисторы. Транзисторы *IGBT*.

2.5. Тиристоры. Принцип действия и физические процессы в четырехслойной полупроводниковой структуре. Вольтамперная характеристика тиристора. Предельные и характеризующие параметры тиристора. Потери мощности в тиристорах. Характеристика цепи управления тиристора, схемы принудительной коммутации тиристоров и их использование в преобразователях. Групповое соединение тиристоров. Классификация тиристоров, конструкции силовых тиристоров.

2.6. Специальные виды полупроводниковых приборов: стабилитроны, фото- и светодиоды, фототиристоры и фоторезисторы, туннельные диоды, термисторы, варисторы, варикапы и другие виды полупроводниковых приборов.

2.7. Системы защиты полупроводниковых приборов: защиты от сверхтоков и перенапряжений.

Тема 3. Основные элементы силовой и информационной электроники: транзисторные аналоговые, импульсные и цифровые устройства и микросхемы

3.1. Сообщения и сигналы в системах управления. Две формы представления информации: аналоговая и цифровая. Виды аналоговых, импульсных и цифровых устройств.

3.2. Усилительный и ключевой режимы работы транзистора. Усилительный каскад на транзисторе. Обратная связь в усилителях. Промежуточные и оконечные усилители. Стабилизация положения рабочей точки. Исследование транзисторов для усиления непрерывных электрических сигналов. Классы усиления.

3.3. Работа транзистора в ключевом режиме. Применение транзисторных ключевых схем в импульсных устройствах.

3.4. Логические элементы и логические схемы на транзисторах. Простейшие логические элементы и способы их схемной реализации. Аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи. Способы аналого-цифрового преобразования. Структурные схемы АЦП и ЦАП.

3.5. Триггеры и их применение. Определение и классификация триггеров. Простейшие и универсальные триггеры. Триггеры со счетным входом. Триггеры, как элементы запоминающих и счетных устройств. Электронные двоичные счетчики, регистры, запоминающие устройства, шифраторы, дешифраторы.

3.6. Микроэлектроника, интегральная схема. Классификация интегральных микросхем. Функциональные элементы, классификация, обозначение, тип логики, основные электрические и схематические параметры, схемы и характеристики логических элементов. Серии интегральных микросхем и больших интегральных схем. Микропроцессор.

Тема 4. Статические преобразователи электрической энергии: выпрямители

4.1. Неуправляемые выпрямители. Понятие о выпрямителе, блок-схема, основные определения. Влияние пульсности выпрямления на состав гармоник сетевого тока и выпрямленно-

го напряжения. Задачи анализа электромагнитных процессов. Классификация и применение выпрямителей в электрической тяге.

4.2. Выпрямители однофазного тока. Однофазная нулевая и мостовая схемы. Электромагнитные процессы в схемах при идеализации параметров вентильных элементов и трансформатора при идеально сглаженном токе в цепи нагрузки, основные соотношения между токами и напряжениями. Коэффициент мощности. Пути повышения коэффициента мощности. Потери мощности в выпрямительных установках. Коэффициент полезного действия выпрямителя.

4.3. Работа выпрямителя на ЭДС. Роль индуктивности в цепях переменного и постоянного тока выпрямителей.

4.4. Теория коммутации тока в однофазных неуправляемых выпрямителях, влияние коммутации на показатели работы (внешние характеристики неуправляемых выпрямителей, условия работы вентилей). Сравнение двухпульсовой нулевой и мостовой схемы.

4.5. Выпрямление трехфазного тока. Классификация схем: нулевые и мостовые, простые и составные. Шести- и двенадцатипульсовые выпрямители. Принцип построения многопульсовых выпрямителей на основе трехфазных мостовых схем, их перспективы, преимущества и недостатки. Схемы и конструкции тяговых выпрямительных агрегатов. Особенности коммутации токов в трехфазном выпрямителе, уравнение внешней характеристики. Применение трехфазных выпрямителей на тяговых подстанциях постоянного тока магистральных дорог.

4.6. Схема выпрямления шестипульсовая мостовая. Вывод основных соотношений.

4.7. Схема выпрямления «две обратные звезды с уравнительным реактором». Вывод основных соотношений.

4.8. Схема выпрямления двенадцатипульсовая последовательного типа. Вывод основных соотношений.

4.9. Управляемые выпрямители. Способы регулирования выпрямленного напряжения. Амплитудное, фазовое и амплитудно-фазовое управление, их сравнение и области применения. Управляемые выпрямители однофазного тока, электромагнит-

ные процессы при фазовом управлении в нулевых и мостовых схемах. Особенности коммутации тока в управляемых выпрямителях, внешние характеристики. Управляемые выпрямители трехфазного тока.

4.10. Энергетические показатели выпрямителей. Качество электрической энергии в системах с преобразователями. Требования к качеству электрической энергии, ущерб от его снижения. Высшие гармонические составляющие в кривых выпрямленного напряжения и тока питающей сети. Коэффициент искажения формы сетевого тока, коэффициент мощности выпрямителя, коэффициент полезного действия.

4.11. Аварийные режимы выпрямителей. Расчет токов в элементах выпрямителя при коротких замыканиях.

Тема 5. Статические преобразователи электрической энергии: инверторы, ведомые сетью

5.1. Назначение инверторов. Принцип работы инвертора, ведомого сетью. Условия перевода выпрямителей в инверторный режим (признаки генераторного и двигательного режимов работы элементов схемы при переходе от выпрямления к инвертированию). Применение инвертирования при рекуперативном торможении электрического подвижного состава.

5.2. Схемы, характеристики и энергетические параметры ведомых сетью инверторов. Однофазные и трехфазные инверторы. Естественная коммутация токов в инверторах, ведомых сетью. Угол управления, угол коммутации, послекоммутационный угол. Коэффициент мощности инвертора, автоматическое регулирование инвертора на минимальное значение послекоммутационного угла. Опрокидывание инвертора. Внешняя характеристика ведомого сетью инвертора.

Тема 6. Статические преобразователи электрической энергии: импульсные преобразователи постоянного тока

6.1. Импульсные преобразователи постоянного тока. Их назначение и классификация. Принцип импульсного регулирова-

ния напряжения постоянного тока. Способы модуляции. Применение импульсных преобразователей на ЭПС.

6.2. Схемы импульсных преобразователей с широтным и частотным регулированием напряжения. Узлы принудительной коммутации. Электромагнитные процессы при импульсном регулировании напряжения.

Тема 7. Статические преобразователи электрической энергии: автономные инверторы

7.1. Назначение и классификация автономных инверторов. Автономные инверторы как источники переменного тока произвольной частоты.

7.2. Автономные инверторы напряжения (АИН). Принцип действия АИН, электромагнитные процессы в схеме АИН и анализ его работы на различные виды нагрузок (активную, активно-индуктивную, двигательную), основные расчетные соотношения.

7.3. Автономные инверторы тока (АИТ). Принцип действия АИТ, анализ процессов в его цепях и формы кривых тока и напряжения на входе и выходе АИТ, основные расчетные соотношения.

7.4. Применение автономных инверторов в тяговом электроприводе с асинхронными и синхронными двигателями трехфазного тока.

Тема 8. Статические преобразователи электрической энергии: преобразователи переменного тока в переменный ток других параметров

8.1. Назначение и классификация преобразователей переменного тока в переменный ток других параметров. Регуляторы напряжения и коммутаторы. Преобразователи частоты со звеном постоянного тока и непосредственные преобразователи частоты.

8.2. Области применения преобразователей в устройствах электрической тяги и для частотного регулирования электроприводов переменного тока.

Тема 9. Проектирование преобразователей

9.1. Общие требования к конструкциям преобразователей электроподвижного состава. Надежность и безотказность в нормальных и аварийных режимах. Быстрая восстанавливаемость. Изоляция элементов. Унификация и блочность конструкций, ремонтпригодность. Габариты и материалоемкость. Технологичность.

9.2. Принципы конструирования преобразователей.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Вид учебной работы	Всего часов
Общая трудоемкость дисциплины	
Аудиторные занятия:	20
лекции	8
лабораторные работы	12
Самостоятельная работа	
Контрольная работа	20
Вид итогового контроля	Зачет, экзамен

5. РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ ЗАНЯТИЙ

Разделы дисциплины	Лекции, ч	Лабораторные работы, ч
Полупроводниковые приборы	2	4
Выпрямители	2	8
Инверторы, ведомые сетью	1	
Импульсные преобразователи постоянного тока	1	
Автономные инверторы	1	
Преобразователи переменного тока в переменный ток других параметров	1	

6. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. — М.: Транспорт, 2001.

2. Засорин С.Н., Мицкевич В.А., Кучма К.Г. Электронная и преобразовательная техника: Учеб. для вузов ж.-д. тр-та / Под ред. С.Н. Засорина. — М.: Транспорт, 1981.

Дополнительная

3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

4. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: Уч. пос. для вузов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

5. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. — М., 1980.

6. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Под ред. М.Г. Шалимова. — М.: Транспорт, 1990.

7. Толстов Ю.Г. Автономные инверторы тока. — М.: Энергия, 1978.

8. Полупроводниковые выпрямители / Е.И. Беркович, В.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев и др. / Под ред. Ф.Н. Ковалева, Г.П. Мостковой — М.: Энергия, 1978.

9. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник — М.: Энергоатомиздат, 1985.

10. Давыдова И.К. и др. Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования. — М.: Транспорт, 1978.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Основной формой изучения дисциплины является самостоятельная работа студентов с литературой. Эта работа направляется рабочей программой, лекционными, лабораторными занятиями и выполнением контрольной работы.

Рекомендуется следующий порядок самостоятельной работы:

1. Прочитать раздел учебника.
2. Уяснить сущность процессов, происходящих в преобразовательных устройствах, освоить вывод основных соотношений, понять построение временных диаграмм.
3. Составить конспект по каждому разделу рабочей программы.

Подготовка краткого конспекта является обязательным условием успешного усвоения предмета.

Во время сессий студентам читаются обзорные лекции. Необходимо помнить, что в обзорных лекциях излагается не весь материал дисциплины, а только незначительная часть его, необходимая для того, чтобы ввести основные понятия и дать направление для дальнейшей работы по дисциплине.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Каждую работу оформляют на компьютере, с распечаткой на листах формата А4 с одной стороны. При этом должны выполняться требования по оформлению работы, предъявляемые к научно-техническим материалам:

- шрифт — *Times New Roman*;
- размер букв — 14;
- межстрочный интервал — 1 или 1,5;
- форматирование текста — по ширине страницы;
- абзац — 1,25 см;
- формулы выполняются по тексту латинским шрифтом или в редакторе формул;
- страницы работы должны быть пронумерованы.

Смешанное написание отдельных частей работы (печатным и рукописным текстом) не допускается.

При передаче работы на рецензирование к распечатанному варианту контрольной работы прикладывается дискета или диск с электронным вариантом работы.

2. Условие задачи должно быть полностью перенесено в контрольную работу со схемой и числовыми значениями своего варианта.

3. Расчетную часть задачи следует сопровождать краткими и четкими пояснениями.

4. Выдерживают следующий порядок записи при вычислениях: сначала приводят формулу, при необходимости показывают математические преобразования в общем виде до получения упрощенного выражения; заменяют символы их числовыми значениями и затем выполняют преобразования в числовом виде; приводят результат вычислений и указывают единицу измерения. При решении необходимо использовать Международную систему единиц СИ.

5. Все графические построения и электрические схемы, поясняющие или иллюстрирующие пункты задания, должны быть аккуратно выполнены с помощью чертежного инструмента, в

соответствии с утвержденным ГОСТом. По осям координат временных или векторных диаграмм указывают размерность и масштаб. Рекомендуется выполнять графические материалы на миллиметровой бумаге. Все рисунки должны быть пронумерованы, иметь подрисуночные надписи. На каждый рисунок должна быть ссылка в тексте работы.

6. В конце работы должны быть указаны: список используемой литературы, дата выполнения работы, подпись студента.

7. Работы, выполненные не по своему варианту, а также не удовлетворяющие вышеперечисленным требованиям, не рецензируются.

8. После возвращения работы с рецензирования с перечнем замечаний **не разрешается исправлять ошибки в тексте работы**. Все требуемые исправления и дополнения выполняются в конце работы: в той же тетради или после текста первоначальной работы. Первоначальный вариант работы обязательно прикладывается к исправлениям.

9. Правильно выполненная работа возвращается студенту с пометкой «Допущена к зачету».

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ И ВЫБОР ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ

Целью контрольной работы является закрепление и углубление теоретических знаний студентов, приобретение практических навыков по расчету и анализу схем преобразователей.

В контрольной работе студенты решают две задачи:

1. Расчет выпрямителя и фильтра.
2. Анализ работы инверторов напряжения и тока.

Варианты отличаются числовыми значениями заданных величин, которые выбираются по двум последним цифрам зачетки студента: по предпоследней цифре выбирают из таблицы 1 расчетную схему выпрямителя, по последней цифре учебного шифра — из таблицы 2 — параметры нагрузки и сглаживающего фильтра.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Задача 1 Расчет выпрямителя и фильтра

Для заданных по варианту схем и параметров фильтров (табл. 1, 2) **требуется:**

Таблица 1

Последняя цифра зачетки	Расчетная схема выпрямителя	Параметры выпрямителя	
		$m_1; m_2; n$	m
1	Однофазная схема с нулевым выводом	$m_1 = 1; m_2 = 2; n = 1$	$m = 2$
2	Однофазная мостовая схема	$m_1 = 1; m_2 = 1; n = 2$	
3	Трехфазная схема ($\Delta/Y-N$) с нулевым выводом	$m_1 = 3; m_2 = 3; n = 1$	$m = 3$
4	Трехфазная схема ($Y/Y-N$) с нулевым выводом	$m_1 = 3; m_2 = 3; n = 1$	
5	Трехфазная схема ($Y/Z-N$) с нулевым выводом	$m_1 = 3; m_2 = 3; n = 1$	
6	Трехфазная схема ($Y/\lambda-P$) с уравнительным реактором	$m_1 = 3; m_2 = 2 \times 3 = 6; n = 1$	$m = 6$
7	Трехфазная схема ($\Delta/Y-N$) с нулевым выводом	$m_1 = 3; m_2 = 2 \times 3 = 6; n = 1$	
8	Трехфазная мостовая схема (Y/Y) (Ларионова)	$m_1 = 3; m_2 = 3; n = 2$	
9	Трехфазная мостовая схема (Y/Δ) (Ларионова)	$m_1 = 3; m_2 = 3; n = 2$	$m = 12$
0	Трехфазная двухмостовая схема последовательного типа	$m_1 = 3; m_2 = 2 \times 3; n = 2$	

1. Представить принципиальную схему выпрямителя и описать его работу. Провести анализ электромагнитных процессов в схеме с помощью временных диаграмм мгновенных значений для напряжений и токов (нагрузка чисто активная и индуктивная).

Таблица 2

Предпоследняя цифра зачетки	Действующее значение входного напряжения U_1 , кВ	Параметры выпрямителя		Параметры фильтра	
		средняя выпрямленная мощность $P_{ав}$, кВт	среднее выпрямленное напряжение $U_{ав}$, кВ	коэффициент сглаживания фильтра $S_{сгл}$	тип сглаживающего фильтра
1	27,5	6,7	2,7	15	<i>RC</i>
2	6,3	0,961	0,31	10	<i>L</i>
3	27,5	20,3	0,54	12	<i>RC</i>
4	10,0	3,6	0,36	20	<i>LC</i>
5	25	53,6	0,17	15	<i>L</i>
6	27,5	21,4	0,17	25	<i>LC</i>
7	25	455,3	5,6	10	<i>RC</i>
8	10	9,0	0,24	13	<i>L</i>
9	6,0	8,6	0,44	23	<i>LC</i>
10	6,0	2,9	0,17	18	<i>LC</i>

2. Провести количественный анализ, получив расчетные соотношения для всех элементов схемы.

- Установить связь между средним значением выпрямленного напряжения с действующим значением напряжения вторичной обмотки трансформатора из соответствующей временной диаграммы.

- Вычислить среднее значение выпрямленного тока.
- Вычислить среднее значение анодного тока вентиля.
- Вычислить действующее значение анодного тока вентиля.
- Вычислить максимальное значение анодного тока вентиля.

- Вычислить максимальное значение обратного напряжения на вентиле.

- Вычислить коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (тока).

- Вычислить действующее значение тока в первичной и во вторичной обмотке трансформатора.

- Вычислить полную мощность первичной, вторичной обмоток трансформатора и его типовую мощность.

3. Выбрать тип диодов выпрямителя с учетом возможности их группового соединения. Рассчитать количество последовательно соединенных силовых полупроводниковых приборов, сопротивление и емкость шунтирующих резисторов и конденсаторов.

4. Определить габаритную мощность трансформатора. Выбрать тип трансформатора.

5. Рассчитать параметры элементов фильтра, необходимого для получения заданного коэффициента пульсаций.

В табл. 1 приведены виды расчетных схем выпрямителя и их основные параметры.

В названиях расчетных схем выпрямителей в скобках обозначены схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:

- ($\Delta/Y-N$) — первичной обмотки — треугольник, вторичной обмотки — звезда с нейтральным проводом;

- ($Y/Y-N$) — первичной обмотки — звезда, вторичной обмотки — звезда с нейтральным проводом;

- ($Y/Z-N$) — первичной обмотки — звезда, вторичной обмотки — зигзаг с нейтральным проводом;

- ($Y/\lambda-Y$) — первичной обмотки — звезда, вторичной обмотки — звезда с уравнивающим реактором.

В двух последних столбцах табл. 1 даны основные параметры заданных расчетных схем, исключая разночтения в задании:

- m_1 и m_2 — количество первичных и вторичных обмоток трансформатора (количество фаз питания и количество фаз выпрямления);

- n — количество используемых полуволн в каждом периоде входного напряжения;

- $m=n \times m_2$ — количество пульсаций напряжения нагрузки за период.

В табл. 2 заданы параметры нагрузки, которые необходимо получить в результате расчета выпрямителя, и параметры сглаживающего фильтра.

Задача 2. Анализ работы инверторов напряжения и тока

В табл. 3 по последней цифре учебного шифра студента выбирается номер вопроса и соответствующее ему задание. Ответ на вопрос должен содержать не менее 3–4 страниц с обязательным выполнением схем, графиков, выводом основных уравнений и пояснениями по работе устройства.

Таблица 3

Последняя цифра шифра	Тема задания
0	Однофазные инверторы тока, ведомые сетью. Принцип действия, особенности работы, временные диаграммы напряжений и токов. Внешняя и регулировочная характеристики
1	Однофазные инверторы тока, ведомые сетью. Коммутация: вывод основных соотношений и временные диаграммы при коммутации
2	Трехфазные инверторы тока, ведомые сетью. Принцип действия, особенности работы, временные диаграммы напряжений и токов. Внешняя и регулировочная характеристики
3	Трехфазные инверторы тока, ведомые сетью. Коммутация: вывод основных соотношений и временные диаграммы при коммутации
4	Характеристики (регулирующая, внешняя и ограничительная) и энергетические показатели инверторов, ведомых сетью
5	Применение инверторов, ведомых сетью, на тяговых подстанциях и на электроподвижном составе при рекуперативном торможении. Применение автономных инверторов в тяговом электроприводе с асинхронными и синхронными двигателями трехфазного тока
6	Однофазный мостовой автономный инвертор напряжения, временные диаграммы его работы, вывод основных уравнений
7	Однофазный мостовой автономный инвертор тока, временные диаграммы его работы, вывод основных уравнений
8	Трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения, временные диаграммы его работы, вывод основных уравнений
9	Трехфазный мостовой автономный инвертор тока, временные диаграммы его работы, вывод основных уравнений

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Для схем выпрямителей, заданных вариантом, необходимо представить принципиальную схему выпрямителя с указанием выбранных условно-положительных направлений токов первичных и вторичных обмоток трансформатора, анодного тока вентилей и напряжений на нем. В качестве нагрузки в общем случае использовать активно-индуктивную нагрузку.

Провести анализ электромагнитных процессов в схеме с помощью временных диаграмм мгновенных значений для напряжений и токов на входе и выходе выпрямителя:

- напряжение и ток на первичной обмотке трансформатора — $u_1(\omega t) = U_{1m} \sin(\omega t)$ и $i_1(\omega t) = I_{1m} \sin(\omega t)$;
- напряжения и ток на вторичной обмотке трансформатора — $u_2(\omega t) = U_{2m} \sin(\omega t)$ и $i_2(\omega t) = I_{2m} \sin(\omega t)$;
- выпрямленное напряжение — $u_d(\omega t)$;
- ток на нагрузке — $i_d(\omega t)$ при активной и индуктивной нагрузке;
- напряжение и ток на диодах в открытом состоянии — $u_a(\omega t)$ и $i_a(\omega t)$;
- напряжение на диодах в запертом состоянии — $u_{VD}(\omega t)$.

Временные диаграммы токов построить для случаев чисто активной и реактивной (индуктивной) нагрузки.

Построение временных диаграмм необходимо выполнить на отдельном листе (удобно — миллиметровой бумаги), на интервале, составляющем два периода питающего напряжения, т.е. при изменении ωt от нуля до 4π ($0^\circ < \omega t < 360^\circ \times 2$). Временные диаграммы строятся в одних масштабах напряжений, токов и времени (угла), должны располагаться одна под другой так, чтобы в любом вертикальном сечении графика значения всех величин соответствовали одному и тому же моменту времени и углу.

2. Провести количественный анализ, получив расчетные соотношения для всех элементов схемы. Теоретический материал и примеры расчета приведены в соответствующей литературе по преобразовательной технике [например: 1, 2, 3, 4, 5, 8].

3. При выборе по справочнику типа диодов выпрямителя необходимо знать два основных параметра диода: максималь-

ное обратное напряжение на диоде U_{VDmax} и среднее значение прямого тока диода I_a .

Для обеспечения надежной работы диодов в выпрямителях требуется выполнение условий превышения значений прямого тока и обратного напряжения не менее чем на 30% по сравнению с расчетными:

$$I_a^{доп} \geq 1,3 \cdot I_a \quad \text{и} \quad U_{bmax}^{доп} \geq 1,3 \cdot U_{bmax}. \quad (1)$$

На основании выполненных расчетов по справочной литературе выбирается соответствующий тип диода с указанием основных его параметров [9, глава 2].

Примечание. Для выбора типа полупроводниковых элементов и трансформаторов может быть использована любая соответствующая справочная литература.

Для повышения экономичности и надежности предпочтительно применение одного силового полупроводникового прибора в одном плече схемы преобразователя. При невозможности такого решения из-за отсутствия приборов с требуемыми значениями предельного тока и напряжения выполняется расчет числа параллельных и последовательных приборов в одном плече.

Расчет числа последовательных силовых полупроводниковых приборов. Число последовательно соединенных силовых полупроводниковых приборов определяется из соотношения

$$s = k_s k_{кп} \frac{U_{VDmax}}{U_{RSM}}, \quad (2)$$

где k_s — коэффициент неравномерности распределения напряжения (допускается $k_s = 1,1$);

$k_{кп}$ — кратность перенапряжения (для тяговых преобразователей принимают равной 1,7–1,8);

U_{VDmax} — максимальное обратное напряжение плеча преобразователя в нормальном режиме, В;

U_{RSM} — неповторяющееся напряжение, В ($U_{RSM} = 1,16 U_{RRM}$) [1, с. 54].

Для обоснованного повышения надежности к полученному значению s прибавляют один силовой полупроводниковый прибор и округляют в большую сторону до целого числа.

В групповом соединении a параллельных и s последовательных силовых полупроводниковых приборов в одном плече преобразователя из-за разброса их параметров применяют меры выравнивания тока в параллельных и напряжения в последовательных соединениях: используются шунтирующие RC -цепи, обеспечивающие выравнивание напряжения, прикладываемого к прибору в течение непроводящей части периода.

Сопротивления шунтирующих резисторов принимается примерно в 5 раз меньше, чем максимальное сопротивление прибора в последовательной цепи и рассчитывается по формуле

$$R_{ш} = \frac{sU - U_{\max}}{(s-1)I_{RRM}}, \quad (3)$$

где s — число последовательно соединенных приборов;

U — наибольшее допустимое напряжение для одного прибора данного класса, В;

U_{\max} — наибольшее напряжение на плече из s последовательных силовых полупроводниковых приборов, В;

I_{RRM} — наибольший повторяющийся импульсный обратный ток прибора, А.

Емкость шунтирующих конденсаторов, обеспечивающих выравнивание напряжения в переходных режимах, рассчитывается по формуле (в мкФ):

$$C_{ш} \geq \frac{(s-1)\Delta Q_{rr}}{sU - U_{\max}} \times 10^6, \quad (4)$$

где ΔQ_{rr} — наибольшее значение разброса по заряду восстановления в последовательной цепи прибора, Кл (рекомендуется принимать $\Delta Q_{rr} = Q_{rr\max} - Q_{rr\min} \approx Q_{rr\max}$ — максимальное значение заряда восстановления для прибора данного типа).

4. При определении типа трансформатора необходимо учитывать первичные и вторичные действующие значения напря-

жения и тока. Тогда расчетные мощности первичной и вторичной обмоток определяются соответственно:

$$S_1 = m_1 U_1 I_1 \quad \text{и} \quad S_2 = m_2 U_2 I_2. \quad (5)$$

Коэффициент трансформации можно приближенно определить через напряжения: $k_T = \frac{U_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$.

Сопротивление нагрузки:

$$R_n = \frac{U_d}{I_d}. \quad (6)$$

Расчетная или типовая мощность преобразовательного трансформатора определяется как полусумма мощностей первичной и вторичной обмоток:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2}. \quad (7)$$

Исходя из рассчитанного значения типовой мощности и номинальных напряжений первичной и вторичной обмоток выбрать по справочнику тип трансформатора.

5. Кривая выходного напряжения выпрямителя всегда имеет пульсирующий характер независимо от схемы выпрямления. Ее можно представить как сумму постоянной и переменной составляющих. Чем меньше амплитуда переменной составляющей, тем меньше пульсация кривой выходного напряжения. Таким образом, качество выпрямленного напряжения можно оценивать по отношению амплитуды переменной составляющей к среднему значению выпрямленного напряжения. Это отношение называют *коэффициентом пульсации*:

$$q_n = \frac{U_{n\max}}{U_d}, \quad (8)$$

где q_n — коэффициент пульсации n -й гармоники;

$U_{n\max}$ — амплитуда n -й гармоники.

Чаще коэффициент пульсации определяют для первой гармоники напряжения m -фазного выпрямителя:

$$q_1 = \frac{U_{1\max}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1}. \quad (9)$$

Очевидно, что с ростом числа фаз выпрямления резко уменьшается коэффициент пульсаций. При питании конкретного потребителя требуемый коэффициент пульсаций должен быть не выше заданного значения.

Для уменьшения коэффициента пульсаций необходимо снизить амплитуду пульсации выпрямленного напряжения, что достигается использованием сглаживающих фильтров. Параметры фильтра рассчитываются из условия подавления самой низшей гармоники выходного напряжения выпрямителя. Степень эффективности (сглаживания) фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания, который определяется как отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра:

$$S_{\text{сгл}} = \frac{q_{\text{вх}}}{q_{\text{вых}}}. \quad (10)$$

Сглаживающие фильтры подразделяются на *пассивные* и *активные*. Задачей контрольной работы является расчет простейшего пассивного фильтра.

Индуктивный фильтр. Индуктивный фильтр состоит из дросселя с индуктивностью L_{ϕ} , включенного между схемой выпрямления последовательно с нагрузкой сопротивлением $R_{\text{н}}$ (3).

Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра:

$$S_{\text{сгл}} = \frac{q_{\text{вх}}}{q_{\text{вых}}} = \frac{\sqrt{R_{\text{н}}^2 + (m\omega_{\text{с}}L_{\phi})^2}}{R_{\text{н}}}, \quad (11)$$

где $\omega_{\text{с}} = 2\pi f_{\text{с}}$ — угловая частота напряжения питающей сети;
 m — число фаз выпрямления.

Для получения заданного коэффициента пульсаций необходимо, чтобы индуктивность дросселя фильтра определялась из выражения:

$$L_{\phi} = \frac{R_{\text{н}}\sqrt{S_{\text{сгл}}^2 - 1}}{2\pi m f_{\text{с}}}. \quad (12)$$

Как видно из полученного соотношения (10), индуктивность дросселя зависит от сопротивления нагрузки, поэтому простой индуктивный фильтр целесообразно применять при нагрузках с малым активным сопротивлением (сильноточных).

Г-образный LC-фильтр. Параметры реактивных элементов фильтра выбираются таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$X_L \gg X_C \ll R_n. \quad (13)$$

В этом случае дроссель сглаживает ток нагрузки, а конденсатор шунтирует ток нагрузки по переменной составляющей. Поскольку $X_C \ll R_n$, то коэффициент сглаживания фильтра практически не зависит от сопротивления нагрузки.

Коэффициент сглаживания LC-фильтра:

$$S_{\text{сгл}} = \frac{q_{\text{вх}}}{q_{\text{вых}}} = \frac{Z_L + (Z_C R_n) / (Z_C + R_n)}{(Z_C R_n) / (Z_C + R_n)} = \frac{Z_L}{Z_C} + 1 \cong \left| \frac{Z_L}{Z_C} \right| = (m\omega_c)^2 L_\phi C_\phi, \quad (14)$$

где $\omega_c = 2\pi f_c$ — угловая частота напряжения питающей сети;
 m — число фаз выпрямления.

Как видно из полученного соотношения, коэффициент сглаживания фильтра зависит от произведения $L_\phi C_\phi$. Каждый из этих сомножителей можно выбрать с учетом разных условий: оптимальных габаритных размеров, минимальной стоимости компонентов и др. Обычно индуктивность дросселя выбирают из условия обеспечения непрерывности тока в дросселе. Для этого необходимо, чтобы амплитуда переменной составляющей тока была меньше минимального среднего значения выпрямленного тока (выходного тока выпрямителя):

$$I_{1\text{max}} \leq I_{d\text{min}}. \quad (15)$$

С учетом того, что $X_L \gg X_C$ (11), индуктивность может быть определена из соотношения:

$$L_\phi \geq \frac{U_{1\text{max}} R_{n\text{max}}}{U_d m \omega_c} = \frac{q_{\text{вх}} R_{n\text{max}}}{m \omega_c}. \quad (16)$$

Принимая во внимание зависимость коэффициента пульсаций от числа фаз выпрямления (7), получаем:

$$L_{\phi} \geq \frac{2R_{\text{нmax}}}{m(m^2-1)\omega_c} = \frac{R_{\text{нmax}}}{m(m^2-1)\pi f_c}. \quad (17)$$

Далее из соотношения (15) определяют емкость фильтра. Полученные значения проверяют на условие отсутствия резонансных явлений. Для этого рекомендуется обеспечить соотношение

$$\omega_1 \gg \omega_{\phi}, \quad (18)$$

где $\omega_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{L_{\phi}C_{\phi}}}$ — собственная резонансная частота фильтра.

При невыполнении условия (16) следует увеличить емкость фильтра.

Используя LC -фильтр, можно получить наибольший коэффициент сглаживания из всех однозвенных фильтров.

Г-образный RC -фильтр. Так же как и при расчете LC -фильтра необходимо выполнить соотношение $X_C \ll R_{\text{н}}$.

При использовании RC -фильтра $U_d \neq U_{\text{н}}$, поэтому коэффициент сглаживания RC -фильтра:

$$S_{\text{сгл}} = \frac{q_{\text{вх}}}{q_{\text{вых}}} = \frac{U_{1\text{maxd}}/U_d}{U_{1\text{maxн}}/U_{\text{н}}} = \frac{U_{1\text{maxd}}U_{\text{н}}}{U_{1\text{maxн}}U_d} = \frac{I_{1\text{maxd}}Z_1}{I_{1\text{maxн}}Z_2} \gamma = \gamma \frac{\sqrt{R_{\phi}^2 + X_C^2}}{X_C}, \quad (19)$$

где $\gamma = \frac{U_{\text{н}}}{U_d} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\phi} + R_{\text{н}}}$ — коэффициент передачи по постоянному току;

$Z_1 = \sqrt{R_{\phi}^2 + X_C^2}$ и $Z_2 \cong X_C = \frac{1}{m\omega_c C_{\phi}}$ — модули комплексных сопротивлений.

Выразив из формулы коэффициента передачи по постоянному току активное сопротивление фильтра

$$R_{\phi} = \frac{R_{\text{н}}(1-\gamma)}{\gamma}, \quad (20)$$

получим окончательную формулу для коэффициента сглаживания:

$$S_{\text{сгл}} = \gamma m \omega_c R_{\phi} C_{\phi}. \quad (21)$$

Значение сопротивления R_{ϕ} выбирается из условия обеспечения коэффициента передачи по постоянному току $\gamma = 0,75 \dots 0,90$.

RC -фильтр используется при нагрузке, имеющей большое активное сопротивление, так как на активном сопротивлении фильтра имеет место большая потеря мощности от постоянной составляющей тока нагрузки.

Если необходимо получить большой коэффициент сглаживания, то используют многозвенные фильтры. В этом случае результирующий коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов сглаживания составляющих звеньев:

$$S_{\Sigma} = S_1 S_2 S_3 \dots \quad (22)$$

По окончании расчетов сделайте выводы о количественных параметрах и качественных особенностях рассчитанного выпрямителя и фильтра.

Пример. В качестве примера рассмотрим расчет однофазного мостового выпрямителя, работающего на активную нагрузку. Исходные параметры рассчитываемого выпрямителя заданы в табл. 4. Схема однофазного мостового выпрямителя и диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 1 и 2.

Таблица 4

Действующее значение входного напряжения U_1 , кВ	Параметры выпрямителя		Параметры фильтра	
	средняя выпрямленная мощность $P_{\text{до}}$, кВт	среднее выпрямленное напряжение $U_{\text{до}}$, кВ	коэффициент сглаживания фильтра $S_{\text{сгл}}$	тип сглаживающего фильтра
6,0	3,2	0,2	30	LC

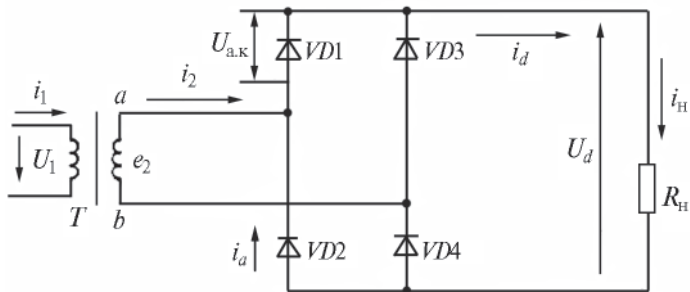


Рис. 1. Схема однофазного мостового выпрямителя, работающего на активную нагрузку

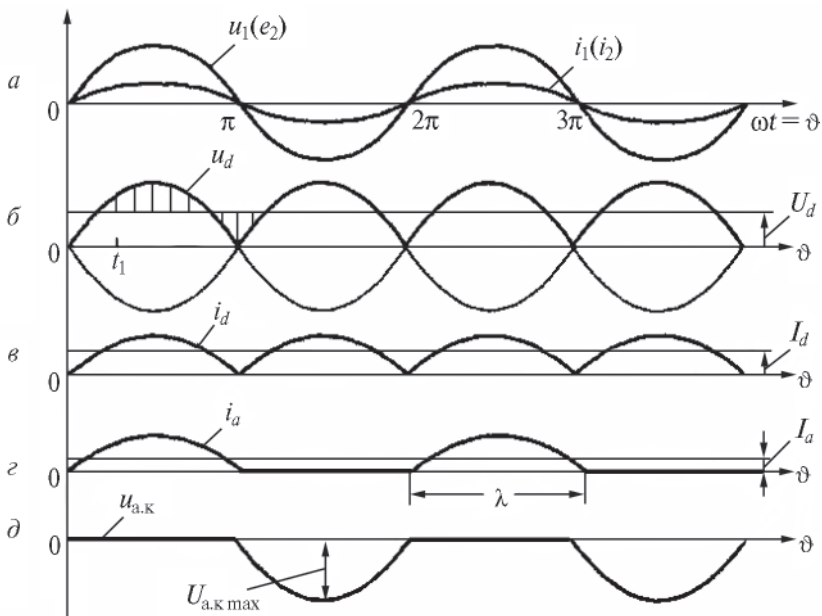


Рис. 2. Временные диаграммы работы однофазного мостового выпрямителя

Количественный анализ однофазного мостового выпрямителя

Устанавливаем связь между средним значением выпрямленного напряжения с действующим значением напряжения вторичной обмотки трансформатора в соответствии с временной диаграммой (рис. 2):

$$U_{d0} = \int_0^{\pi} u_d d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}u_2 \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2,$$

откуда $U_2 = 1,11 U_{d0} = 1,11 \times 0,2 \cdot 10^3 = 0,222$ кВ, а коэффициент трансформации равен: $k_{\tau} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6,0 \cdot 10^3}{0,222 \cdot 10^3} \approx 27$.

Среднее значение выпрямленного тока:

$$I_{d0} = \frac{P_{d0}}{U_{d0}} = \frac{3,2 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 10^3} \approx 16 \text{ А.}$$

Среднее значение анодного тока через диод определим, воспользовавшись временными диаграммами рис. 2, в, г:

$$I_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_a d\vartheta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_d d\vartheta = \frac{I_{d0}}{2} = \frac{16}{2} = 8 \text{ А.}$$

Действующее значение анодного тока вентиля:

$$I_{ad} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_a^2 d\vartheta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_d^2 d\vartheta = \frac{I_{d0}}{\sqrt{2}} = \frac{16}{\sqrt{2}} = 11,3 \text{ А.}$$

Коэффициент формы анодного тока вентиля: $K_{\phi} = \frac{I_{ad}}{I_a} = \sqrt{2}$.

Максимальное значение анодного тока через вентиль:

$$I_{amax} = I_{dmax} = \frac{U_{2max}}{R_H} = \frac{\sqrt{2}U_2}{R_H} = \frac{\sqrt{2}\pi U_d}{2\sqrt{2}R_H} = \frac{\pi I_{d0}}{2} = \frac{\pi \times 16}{2} = 25,13 \text{ А.}$$

Максимальное значение напряжения, прикладываемое к вентилю в закрытом состоянии (рис. 2, д), находится по формуле:

$$U_{VDmax} = \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi U_{d0}}{2} = \frac{\pi \times 0,2 \cdot 10^3}{2} = 0,314 \text{ кВ.}$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (тока):

$$q = \frac{U_{1\max}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0,667.$$

Выбор типа диодов выпрямителя

Исходя из рассчитанных значений максимального обратного напряжения на диоде $U_{VD\max} = 314$ В и среднего значения прямого тока диода $I_a = 8$ А, с учетом выполнения условий превышения значений прямого тока и обратного напряжения не менее чем на 30% по сравнению с расчетными, по (1) определяем допустимые значения тока и напряжения:

$$I_a^{\text{доп}} \geq 1,3I_a = 1,3 \times 8 = 10,4 \text{ А};$$

$$U_{VD\max}^{\text{доп}} \geq 1,3U_{VD\max} = 1,3 \times 314 = 408 \text{ В}.$$

По справочнику [9] выбираем диод ДЛ112-10 со следующими параметрами:

$$U_{RRM} = 100 \div 1400 \text{ В};$$

$$I_{FRMS} = 15 \text{ А}, \quad I_{RRM} = 1 \text{ мА},$$

задаемся значениями: $U_{RRM} = 150$ В на каждый диод;

$$R_{RSM} = 1,16U_{RRM} = 1,16 \cdot 150 = 174 \text{ В}.$$

Определяем число последовательно соединенных силовых полупроводниковых приборов по формуле (2) и учитываем увеличение на единицу для повышения надежности:

$$s = k_s k_{\text{кп}} \frac{U_{VD\max}}{U_{RSM}} + 1 = 1,1 \times 1,7 \times \frac{314}{174} + 1 = 3,37 + 1 \approx 5.$$

Рассчитываем шунтирующую RC-цепь, обеспечивающую выравнивание напряжения, прикладываемого к прибору в течение непроводящей части периода.

Сопrotивления шунтирующих резисторов по формуле (3):

$$R_{\text{ш}} = \frac{sU_{RRM}^{\text{на диод}} - U_{VD\max}}{(s-1)I_{RRM}} = \frac{5 \times 150 - 314}{(5-1) \times 1 \cdot 10^{-3}} = \frac{436}{4 \cdot 10^{-3}} = 109 \text{ кОм}.$$

Ближайшее наименьшее сопротивление резистора выбираем из ряда номинальных значений по табл. 5: $R_{\text{ш}} = 100$ кОм.

**Ряд номинальных (кратных) значений сопротивлений резисторов
с допуском 5% и более**

1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0
2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3
4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

Емкость шунтирующих конденсаторов, обеспечивающих выравнивание напряжения в переходных режимах, рассчитываем по (4):

$$C_{ш} \geq \frac{(s-1)\Delta Q_{rr}}{sU - U_{\max}} \cdot 10^6 = \frac{(5-1) \times 63 \cdot 10^{-6}}{5 \times 150 - 314} \cdot 10^6 = 0,578 \text{ мкФ.}$$

Выбор типа трансформатора

Воспользовавшись рисунком 2, а, с учетом одинаковых форм первичного и вторичного токов, определим их действующие значения:

$$I_2 = I_{ad} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_a^2 d\vartheta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_d^2 d\vartheta = 1,11 I_{d0} = 1,11 \times 16 = 17,76 \text{ А.}$$

С учетом соотношения для коэффициента трансформации ток в первичной обмотке трансформатора:

$$I_1 = \frac{I_2}{k_{\tau}} = \frac{1,11 \times I_{d0}}{k_{\tau}} = \frac{17,76}{28,38} = 0,62 \text{ А.}$$

Полная мощность первичной обмотки трансформатора:

$$S_1 = m_1 U_1 I_1 = k_{\tau} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{d0} \frac{1,11 I_{d0}}{k_{\tau}} = 1,11^2 \times P_{d0} = 1,23 \times 3,2 \cdot 10^3 = 3,9 \text{ кВА.}$$

Полная мощность вторичной обмотки трансформатора:

$$S_2 = m_2 U_2 I_2 = 1,11 U_{d0} \times 1,11 I_{d0} = 1,23 \times P_{d0} = 1,23 \times 3,2 \cdot 10^3 = 3,9 \text{ кВА.}$$

Типовая мощность трансформатора:

$$S_{\tau} = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,23 U_{d0} I_{d0} = 1,23 P_{d0} = 3,9 \text{ кВА.}$$

По справочнику [10] выбираем однофазный двухобмоточный трансформатор ОМ-4/6 со следующими параметрами:

Номинальная мощность — $S = 4$ кВА;

Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения — $U_{ВН} = 6$ кВ;

Номинальное напряжение обмотки низшего напряжения — $U_{НН} = 0,23$ кВ;

Потери холостого хода и короткого замыкания — $P_{xx} = 0,055$ кВт и $P_{кз} = 0,14$ кВт;

Ток холостого хода и напряжение короткого замыкания — $i_{xx} = 8\%$ и $u_{кз} = 4\%$.

Уточняем коэффициент трансформации выбранного трансформатора:

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6,0 \cdot 10^3}{0,23 \cdot 10^3} \approx 26.$$

Расчет Г-образного LC-фильтра

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (тока):

$$q = \frac{U_{1\max}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0,667.$$

Сопrotивление нагрузки $R_n = \frac{U_{2\max}}{I_{a\max}} = \frac{0,314 \cdot 10^3}{25,13} = 12,5$ Ом.

Индуктивность фильтра определяем по формуле (17):

$$L_\Phi \geq \frac{R_{n\max}}{m(m^2 - 1)\pi f_c} = \frac{12,5}{2(2^2 - 1)\pi 50} = \frac{12,5}{942} = 0,013 \text{ Гн} = 13 \text{ мГн}.$$

Емкость фильтра определяем по формуле (14):

$$C_\Phi \geq \frac{S_{\text{сгл}}}{(m\omega_c)^2 L_\Phi} = \frac{30}{(2 \times 314)^2 \times 0,013} = \frac{30}{5127} = 5,85 \text{ мФ}.$$

Проверяем отсутствие резонансных явлений на частоте сети 50 Гц (18):

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{C_\Phi L_\Phi}} = \frac{1}{\sqrt{5,85 \cdot 10^{-3} \times 0,013}} = 114,67 \text{ с}^{-1},$$

откуда $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{114,67}{6,28} = 18,26 \text{ Гц} < 50 \text{ Гц}$, значит условие (18) выполняется.

Проверяем соотношение (13) $X_L \gg X_C \ll R_H$:

$$X_L = \omega_c L = 314 \times 0,013 = 4,082 \text{ Ом},$$

$$X_C = \frac{1}{\omega_c C} = \frac{1}{314 \times 5,85 \cdot 10^{-3}} = 0,544 \text{ Ом}.$$

Соотношение $4,082 \gg 0,544 \ll 12,5$ выполняется, значит, расчеты параметров фильтра проведены правильно.

Устройство, принцип действия и качественный анализ процессов, происходящих в выпрямителе, описан в соответствующей литературе, поэтому в данном примере не рассматривается.