

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И.Луковникова

« _____ » декабря 2018 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ТЕХНИКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Б1.В.ДВ.05.02

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ Электроснабжение

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	4
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ	
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	4
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	9
4.3 Лабораторные работы.....	29
4.4 Практические занятия.....	29
4.5 Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	29
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	30
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	30
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	31
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	
9.1 Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ практических работ	31
10 ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	43
11 ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	43
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	44
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	48
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	49

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Формирование у обучающихся теоретической и практической базы по изучению характеристик и принципа действия силовых электронных приборов, классификации, принципам действия и основным областями применения устройств силовой электроники, что позволит им успешно решать теоретические и практические задачи в их профессиональной деятельности, связанной с проектированием, испытаниями и эксплуатацией устройств силовой электроники.

Задачи дисциплины

Задачей дисциплины является приобретение необходимых знаний и умений для определения параметров оборудования, используемого в электроэнергетике.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ПК -5	Готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности	знать: <ul style="list-style-type: none">– классификацию, назначение, основные схмотехнические решения, принцип действия устройств силовых полупроводниковых приборов;– основные уравнения процессов, схемы замещения и характеристики электронных преобразователей электрической энергии;– алгоритмы управления электронными преобразователями электрической энергии; уметь: <ul style="list-style-type: none">– использовать полученные знания при решении практических задач по проектированию, испытаниями и эксплуатации устройств силовой электроники;– ставить и решать задачи моделирования силовых электронных устройств; владеть: <ul style="list-style-type: none">– навыками элементарных расчетов и испытаний силовых электронных преобразователей.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ДВ.05.02 Полупроводниковая техника в электроэнергетике относится к элективной части.

Дисциплина Полупроводниковая техника в электроэнергетике базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: Теоретические основы электротехники, Электротехническое и конструкционное материаловедение, Электроника. Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Полупроводниковая техника в электроэнергетике представляет основу для изучения таких дисциплин, как: Техника высоких напряжений, Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	2	4	180	72	18	18	36	72	-	экзамен
Заочная	3	-	180	18	4	4	10	153	-	экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	2	-	180	14	4	4	6	157	-	экзамен

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			4
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	72	-	72
Лекции (Лк)	18	-	18
Лабораторные работы (ЛР)	18	-	18
Практические занятия (ПЗ)	36	-	36
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	72	-	72

Подготовка к лабораторным работам	24	-	24
Подготовка к практическим занятиям	24	-	24
Подготовка к экзамену в течение семестра	24	-	24
III. Промежуточная аттестация экзамен	36	-	36
Общая трудоемкость дисциплины, час. зач. ед.	180	-	180
	5	-	5

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся*
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Силовые полупроводниковые вентили	24	4	-	4	16
1.1.	Виды и методы преобразования электрической энергии. Структура, характеристики и параметры электрических вентилей: выпрямительные диоды, тиристоры, биполярные и полевые силовые транзисторы.	10	2	-	-	8
1.2.	Режимы работы вентилей. Методы охлаждения вентилей и конструкции теплостоков: воздушное, водяное и испарительное охлаждение	14	2	-	4	8
2.	Неуправляемые выпрямители	30	2	4	16	8
2.1.	Однофазные выпрямители Трехфазные выпрямители	30	2	4	16	8
3.	Управляемые сетевые преобразователи	33	4	7	6	16
3.1.	Однофазный управляемый выпрямитель: фазоимпульсный способ управления, анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках, инверторный режим.	23	2	7	6	8
3.2.	Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель: анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках	10	2	-	-	8

4.	Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть	24	4	-	4	16
4.1	Влияние мощных выпрямителей на питающую сеть: гармонический состав входных токов.	10	2	-	-	8
4.2	Искажение кривой напряжения, коэффициент мощности. Основные направления борьбы с отрицательным влиянием преобразователей на питающую сеть.	14	2	-	4	8
5.	Автономные вентильные преобразователи	33	4	7	6	16
5,1	Виды автономных преобразователей и их использование. Схемная реализация автономных инверторов. Инверторы на силовых транзисторах и режимы их работы	20	2	4	6	8
5.2	Импульсные регуляторы мощности. Реверсивные регуляторы и их использование	13	2	3	-	8
ИТОГО		144	18	18	36	72

- для заочной формы обучения:

<i>№ раздела и темы</i>	<i>Наименование раздела и тема дисциплины</i>	<i>Трудоемкость, (час.)</i>	<i>Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)</i>			
			<i>учебные занятия</i>			<i>самостоятельная работа обучающихся*</i>
			<i>лекции</i>	<i>лабораторные работы</i>	<i>практические занятия</i>	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Силовые полупроводниковые вентили	35	1	-	-	34
1.1.	Виды и методы преобразования электрической энергии. Структура, характеристики и параметры электрических вентилей: выпрямительные диоды, тиристоры, биполярные и полевые силовые транзисторы.	17,5	0,5	-	-	17
1.2.	Режимы работы вентилей. Методы охлаждения вентилей и конструкции теплостоков: воздушное, водяное и	17,5	0,5	-	-	17

	испарительное охлаждение					
2.	Неуправляемые выпрямители	31,5	0,5	4	10	17
2.1.	Однофазные выпрямители. Трехфазные выпрямители	31,5	0,5	4	10	17
3.	Управляемые сетевые преобразователи	35	1	-	-	34
3.1.	Однофазный управляемый выпрямитель: фазоимпульсный способ управления, анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках, инверторный режим.	17,5	0,5	-	-	17
3.2.	Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель: анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках	17,5	0,5	-	-	17
4.	Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть	35	1	-	-	34
4.1	Влияние мощных выпрямителей на питающую сеть: гармонический состав входных токов.	17,5	0,5	-	-	17
4.2	Искажение кривой напряжения, коэффициент мощности. Основные направления борьбы с отрицательным влиянием преобразователей на питающую сеть.	17,5	0,5	-	-	17
5.	Автономные вентильные преобразователи	34,5	0,5	-	-	34
5.1	Виды автономных преобразователей и их использование. Схемная реализация автономных инверторов. Инверторы на силовых транзисторах и режимы их работы	17,25	0,25	-	-	17
5.2	Импульсные регуляторы мощности. Реверсивные регуляторы и их использование	17,25	0,25	-	-	17
	ИТОГО	171	4	4	10	153

- для заочной формы обучения (ускоренное обучение):

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся*
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Силовые полупроводниковые вентили	36,9	0,9	-	-	36
1.1.	Виды и методы преобразования электрической энергии. Структура, характеристики и параметры электрических вентилей: выпрямительные диоды, тиристоры, биполярные и полевые силовые транзисторы.	18,45	0,45	-	-	18
1.2.	Режимы работы вентилей. Методы охлаждения вентилей и конструкции теплостоков: воздушное, водяное и испарительное охлаждение	18,45	0,45	-	-	18
2.	Неуправляемые выпрямители	22,45	0,45	4	-	18
2.1.	Однофазные выпрямители. Трехфазные выпрямители	22,45	0,45	4	-	18
3.	Управляемые сетевые преобразователи	42,9	0,9	-	6	36
3.1.	Однофазный управляемый выпрямитель: фазоимпульсный способ управления, анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках, инверторный режим.	24,45	0,45	-	6	18
3.2.	Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель: анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках	18,45	0,45	-	-	18
4.	Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть	33,8	0,8	-	-	33
4.1	Влияние мощных выпрямителей на питающую сеть: гармонический состав входных токов.	18,4	0,4	-	-	18
4.2	Искажение кривой напряжения, коэффициент мощности. Основные направления борьбы с отрицательным влиянием	15,4	0,4	-	-	15

	преобразователей на питающую сеть.					
5.	Автономные вентильные преобразователи	34,95	0,95	-	-	34
5,1	Виды автономных преобразователей и их использование. Схемная реализация автономных инверторов. Инверторы на силовых транзисторах и режимы их работы	16,45	0,45	-	-	16
5.2	Импульсные регуляторы мощности. Реверсивные регуляторы и их использование	18,5	0,5	-	-	18
	ИТОГО	171	4	4	6	157

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Раздел 1. Силовые полупроводниковые вентили

Тема 1.1. Виды и методы преобразования электрической энергии. Структура, характеристики и параметры электрических вентилей выпрямительные диоды, тиристоры, биполярные и полевые транзисторы.

Виды преобразования электрической энергии

Электростанции производят электрическую энергию в виде переменного трехфазного тока стандартной частоты. Однако во многих случаях потребителям необходима энергия другого качества. Так около 40% всей электроэнергии потребляется в виде энергии постоянного тока, а 5...7% — в виде переменного тока, но отличной от промышленной частоты. Поэтому в электроэнергетике неизбежно возникает проблема преобразования энергии.

Необходимость преобразования возникает и при передаче электроэнергии на большие расстояния. Как известно при длине ЛЭП свыше 1000 км передача энергии на постоянном токе обеспечивает меньше потери, чем при переменном. Поэтому на передающем конце такой ЛЭП производят преобразования переменного тока в постоянный, а на приемном осуществляют обратное преобразование.

В будущем видное место займут электростанции с непосредственным преобразованием тепловой энергии в электрическую. Последняя будет получаться в МГД генераторах в виде постоянного тока при сравнительно низком напряжении и потому должна будет преобразована в энергию переменного трехфазного тока стандартной частоты.

Практически в электроэнергетике возникает необходимость в следующих видах преобразования:

- преобразование переменного тока в постоянный;
- преобразование постоянного тока в переменный однофазный или трехфазный;
- преобразование частоты переменного тока;
- трансформация постоянного тока, т.е. преобразование постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения;
- преобразование числа фаз.

Основные области применения постоянного тока — это электролиз (металлургия и химическая технология), электропривод с двигателями постоянного тока, электросварка и некоторые другие электротехнологические процессы, зарядка аккумуляторов.

Преобразователи частоты используются в электротермии, в электроприводе с частотно-регулируемыми двигателями, в ультразвуковых установках.

Необходимость в трансформации постоянного тока или его преобразования в переменный возникает там, где единственным источником энергии являются аккумуляторы, солнечные или топливные батареи, вырабатывающие постоянный ток.

Наконец, преобразователи числа фаз оказываются необходимыми в тех случаях, когда у потребителя имеются трехфазные электроприемники, а его электроснабжение осуществляется однофазным током.

Электромашинное преобразование.

В первой половине XX столетия преобразование электрической энергии осуществлялось почти исключительно посредством электрических машин. В принципе, используя электрические машины, можно осуществить любой из перечисленных выше видов преобразования. Электромашинный преобразователь — это совокупность двух электрических машин (двигателя и генератора), причем в ряде случаев совмещенная в одной конструкции (т.е. однокорпусный преобразователь). Общим для всех подобных преобразователей является наличие промежуточного механического звена преобразования, что обусловило присущие им недостатки:

- низкий КПД;
- значительные масса и габариты;
- необходимость прочных фундаментов;
- повышенные шум и вибрация;
- необходимость периодического обслуживания.

В современной энергетике электромашинные преобразователи практически не используются.

Статическое преобразование.

В статических преобразователях отсутствует звено механического преобразования, благодаря чему существенно повышается КПД. Кроме того, статические преобразователи практически бесшумны и почти не требуют периодического обслуживания.

Известны 2 вида статических преобразователей: электромагнитные и вентильные.

Принцип электромагнитных преобразователей основан на использовании нелинейных свойств индуктивных элементов с ферромагнитными сердечниками. Такие преобразователи находят некоторое применение для преобразования частоты. В частности, известны электромагнитные умножители частоты для питания высокоскоростных асинхронных двигателей. Однако диапазон частот и мощностей таких преобразователей довольно узок, что не позволяет отнести их к числу перспективных.

Современная преобразовательная техника базируется на вентильных преобразователях (ВП). Преобразование энергии в ВП осуществляется путем изменения формы напряжения и тока за счет бесконтактных переключений (коммутаций), производимых электрическими вентилями. Электрическим вентилем принято называть нелинейный элемент, проводимость которого существенно зависит от направления тока. В зависимости от физического явления, на основе которого выполнен вентиль, различают электронно-вакуумные, ионные (газоразрядные) и полупроводниковые вентили. Первые два типа использовались на заре возникновения вентильной преобразовательной техники, и в настоящее время полностью вытеснены полупроводниковыми.

Используя свойства электрических вентилях, можно осуществлять разнообразные преобразования электрической энергии. Наиболее распространенными являются следующие виды ВП.

- 1). Выпрямители, преобразующие переменный ток в постоянный.
- 2). Инверторы, осуществляющие обратное преобразование, т.е. преобразующие постоянный ток в переменный фиксированной или регулируемой частоты.
- 3). Преобразователи частоты.
- 4). Трансформаторы постоянного тока (ТПТ)¹.
- 5). Вентильные регуляторы мощности переменного и постоянного тока.

Помимо преобразования энергии электрические вентили находят применение в бесконтактных коммутирующих электрических аппаратах.

Все ВП обладают весьма ценными достоинствами, к числу которых можно отнести:

- высокий КПД, достигающий у некоторых ВП 98%;

- высокую надежность, длительный срок службы;
- бесшумность, отсутствие необходимости в специальных фундаментах;
- относительно небольшие габариты и массу.

СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕНТИЛИ.

В ВП используются выпрямительные диоды, тиристоры и силовые транзисторы. Их основой являются монокристаллы кремния высокой степени очистки от примесей.

Выпрямительные диоды.

В выпрямительном диоде монокристалл кремния легирован таким образом, что в нем образуются 2 области с р и n проводимостями и одним электронно-дырочным переходом между ними (рис.2.1). Вывод от р-области называется анодом, вывод от n-области — катодом.

Электрические свойства диода определяет его вольтамперная характеристика (ВАХ), представленная на рис.2.2.

На ВАХ диода различают 2 ветви: прямую (построена в первом квадранте) и обратную. Следует иметь ввиду, что прямая и обратная ветви строятся в разных масштабах. Чтобы оценить различие масштабов, заметим, что отношение прямого тока к обратному достигает 10^5 , а отношение обратного и прямого напряжений 10^3 .

Прямая ветвь ВАХ имеет два характерных участка. На участке OA дифференциальное сопротивление диода довольно велико, прямой ток мал. На участке ABC дифференциальное сопротивление резко снижается, и даже небольшое увеличение прямого напряжения вызывает значительный рост тока. На участке OE обратной ветви ток очень мал и слабо зависит от напряжения. При напряжении $U_{проб.}$ происходит лавинный пробой р-п перехода, результатом которого является резкое увеличение тока при почти неизменном напряжении (участок DF). Увеличение мощности, выделяемой в р-п структуре, приводит к её сильному разогреву, вследствие чего наблюдается дальнейшее размножение носителей и некоторое снижение напряжения при одновременном росте тока (участок DG). Это явление называется термическим пробоем и сопровождается необратимым изменением структуры, в результате чего даже после охлаждения диод теряет вентиляльные свойства.

Чтобы предотвратить выход диодов из строя в результате термического пробоя при кратковременных повышении обратного напряжения, созданы специальные типы диодов — лавинные. Особенностью р-п структуры таких диодов является то, что при величине энергии, выделенной в результате лавинного пробоя, менее 3...5 Дж лавинный пробой не переходит в термический, и после прекращения импульса перенапряжения р-п переход восстанавливает свои запирающие свойства.

Электрические параметры выпрямительного диода соответствуют определенным точкам на его ВАХ. Основной точкой на прямой ветви является точка В, соответствующая предельной величине прямого тока, определяемой из условия допустимого нагрева. Напряжение, соответствующее этому току, называется прямым падением напряжения. Для силовых кремниевых диодов оно составляет 0,7..1,0 В. Точка D на обратной ветви соответствует напряжению лавинного пробоя. Точка E определяет величину напряжения, называемого допустимым повторяющимся обратным напряжением. Оно составляет $0,7U_{проб.}$ Этот запас по напряжению, который закладывается изготовителем.

Полупроводниковая промышленность выпускает выпрямительные диоды с предельными токами до нескольких тысяч ампер и допустимыми обратными напряжениями до нескольких киловольт.

Тиристоры.

Тиристор имеет 4-слойную полупроводниковую структуру, состоящую из чередующихся областей с проводимостями р и n типа. На границах раздела областей образуются 3 р-п перехода (рис.2.3). Вывод от крайней р-области является анодом, от крайней n-области — катодом. Помимо них у тиристора имеется вывод от средней р-области — управляющий электрод.

В зависимости от полярности напряжения между анодом А и катодом К тиристор может находиться в одном из трех устойчивых состояний: закрытом при обратном

напряжении ($U_{AK} < 0$), закрытом при прямом напряжении ($U_{AK} > 0$) и открытом (включенном) при прямом напряжении. Первому состоянию соответствует обратная ветвь ВАХ (рис.2.4), которая, в сущности, не отличается от таковой выпрямительного диода. Вид прямой ветви ВАХ зависит от режима управляющего электрода. При отсутствии тока через управляющий электрод и прямом напряжении, не превышающем значения $U_{вкл}$ прямой ток имеет такую же величину, что и обратный, тиристор закрыт (участок ОА). При $U_{AK} = U_{вкл}$ происходит скачкообразное увеличение тока с одновременным снижением напряжения. Рабочая точка переходит на участок ВС. Этот процесс называют включением тиристора. Во включенном состоянии его ВАХ имеет такой же вид, что и прямая ветвь ВАХ диода (ОВС). Включение повышением напряжения на практике не используется. Перевести тиристор во включенное состояние можно при напряжении меньше $U_{вкл}$, если к управляющему электроду приложить напряжение положительной по отношению к катоду полярности. При этом через переход p_2n_2 возникает ток, инициирующий генерацию основных носителей, что приводит к скачкообразному переходу тиристора в открытое состояние.

Важной особенностью рассматриваемого тиристора является то, что это состояние не изменится, т.е. тиристор останется в открытом состоянии, и после прекращения тока через управляющий электрод, а также и после изменения его направления. Таким образом, для включения тиристора достаточно управляющего воздействия в форме довольно короткого импульса, но его выключение каким-либо воздействием на управляющий электрод оказывается невозможным. Чтобы перевести тиристор в закрытое состояние, необходимо снизить ток до величины, меньшей некоторого значения, называемого током удержания, либо хотя бы кратковременно изменить полярность напряжения U_{AK} на обратную. Такой тиристор, обладающий неполным управлением, принято называть однооперационным.

Разновидностью однооперационных тиристорov являются симметричные тиристоры — симисторы. Свойство симистора можно уяснить, рассмотрев его физическую модель (рис.2.5а), состоящую из двух обычных тиристорov, включенных встречно-параллельно. Нетрудно видеть, что такая цепь способна коммутировать ток любого направления. В симисторе оба тиристора выполнены в объеме одного кристалла полупроводника и имеют общий управляющий электрод. Один из силовых электродов условно называют анодом, другой — катодом. ВАХ симистора симметрична для прямого и обратного напряжений (рис.2.5в).

К числу электрических параметров однооперационных тиристорov относятся предельный прямой ток и прямое падение напряжения, определяемые так же, как и у выпрямительных диодов. Однако вследствие многослойности структуры прямое падение напряжения у тиристорov выше, чем у диодов и составляет 1,5...2 В.

Для нормальной работы тиристора необходимо, чтобы при отсутствии управляющего тока он был закрыт при любой полярности анодного напряжения. Поэтому в паспорте тиристора приводится параметр максимальное значение повторяющегося прямого и обратного напряжения, определяющий класс тиристора по допустимому напряжению.

Для расчета управляющего устройства необходимы параметры, определяющие управляющий сигнал: отпирающий ток управления и отпирающее напряжение управления.

Помимо перечисленных статических параметров важными для тиристорov являются динамические параметры.

Время включения — это время между моментом подачи управляющего сигнала и моментом, когда анодный ток достигает определенного значения.

Время выключения — интервал между моментом перехода спадающим током через нулевое значение и моментом, когда к тиристорy может быть приложено прямое напряжение без самопроизвольного повторного включения. Это время определяется скоростью процесса рекомбинации носителей и часто называется временем восстановления.

Критическая скорость нарастания тока $\left(\frac{di}{dt}\right)$. При повышении допустимой скорости возможен перегрев отдельных участков полупроводниковой структуры и тепловое проплавление p-n переходов.

Допустимая скорость нарастания прямого напряжения $\left(\frac{du}{dt}\right)$. При ее повышении возможно самопроизвольное включение тиристора.

Тиристоры с высоким значением динамических параметров (малые значения времени включения и выключения, большие допустимые значения $\frac{di}{dt}, \frac{du}{dt}$) называются быстродействующими и используются в преобразователях, работающих при повышенной частоте.

В конце 60-х годов были разработаны двухоперационные или запираемые тиристоры. Такие тиристоры открываются управляющим импульсом положительной полярности и закрываются импульсом отрицательной полярности, т.е. являются полностью управляемыми. Их использование в силовой преобразовательной технике очень перспективно, однако выпуск мощных запираемых тиристоров с требуемыми динамическими параметрами электронной промышленностью пока не освоен.

Силовые транзисторы.

Мощные силовые транзисторы отличаются от транзисторов малой и средней мощности, используемых в радиоэлектронной аппаратуре, лишь большими значениями допустимых напряжений и токов.

В преобразовательных устройствах транзисторы обычно работают в ключевом режиме. Закрытому состоянию транзистора соответствует режим отсечки, когда управляющий ток базы равен нулю, а открытому — режим насыщения, при котором ток базы должен удовлетворять условию

$$I_b > \beta_{CT} I_k,$$

где β_{CT} — статический коэффициент передачи тока базы,

I_k — ток коллектора.

Транзисторы являются полностью управляемыми вентилями, к тому же они обладают лучшими динамическими свойствами, чем тиристоры. Поэтому их целесообразно использовать в высокочастотных инверторах.

Тема 1.2. Режимы работы вентилях. Методы охлаждения вентилях и конструкции теплостокков: воздушное, водяное и испарительное охлаждение

Ограниченные значения величин номинальных токов и допустимых напряжений вентилях в некоторых случаях заставляют использовать их групповое соединение.

Параллельное соединение предназначено для увеличения суммарного прямого тока. Оно используется с принятием мер, позволяющих обеспечить выравнивание прямых токов вентилях, входящих в группу. Наиболее простой из этих мер является подбор вентилях с одинаковыми значениями прямого падения напряжения. Однако эта мера оказывается недостаточной. Во-первых, на прямые ветви ВАХ вентилях существенно влияет температура, которая для вентилях, входящих в параллельную группу, может оказаться различной вследствие неодинаковых условий охлаждения. Во-вторых, на неравномерность токораспределения оказывают влияние неодинаковые сопротивления монтажных соединений. Поэтому повсеместное применение на практике находят индуктивные делители тока. Он представляет двухобмоточный дроссель на тороидальном магнитопроводе, включаемый так, как показано на рис.2.6. Противоположные направления токов в обмотках дросселя вызывает появление в них ЭДС самоиндукции, вследствие чего различие токов в параллельных ветвях, вызванное различием параметров вентилях, становится практически неощутимым.

Последовательное соединение используется для увеличения суммарного допустимого напряжения. Величина тока по цепочке последовательно соединенных вентилях одинакова, однако ввиду различия их характеристик общее напряжение будет распределено между ними неравномерно. Для выравнивания напряжений вентилях шунтируют резисторами. Выбор сопротивлений шунтирующих резисторов производят, исходя из того, чтобы ток, протекающий через резистор, был на порядок больше тока закрытого вентиля.

Раздел 2. Неуправляемые выпрямители

Тема 2.1. Однофазные выпрямители. Трехфазные выпрямители.

Общие сведения о выпрямителях.

Выпрямителем принято называть устройство с электрическими вентилями, предназначенное для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока. В общем случае в состав выпрямителя входят силовой трансформатор Т, вентильный блок ВБ и сглаживающий фильтр Ф (рис.3.1.). В отдельных случаях трансформатор и фильтр могут отсутствовать.

Вентильный блок содержит электрические вентили, соединенные между собой по соответствующей схеме. В неуправляемых выпрямителях в качестве вентилях используются кремниевые выпрямительные диоды.

Выходное напряжение выпрямителя, строго говоря, не является постоянным, а пульсирует с частотой, зависящей от схемы вентильного блока. Поэтому в его составе наряду с постоянной присутствует и переменная составляющая, содержащая основную гармонику и бесконечный ряд кратных ей высших гармоник. Поскольку переменная составляющая нежелательна, для ее ослабления в ряде случаев используют сглаживающий фильтр.

Приведем перечень основных величин, характеризующих работу выпрямителя.

1). Входное напряжение U_2 — действующее значение переменного напряжения на входе вентильного блока.

2). Входной ток I_2 — действующее значение переменного входного тока.

3). Выпрямленное напряжение U_d — постоянная составляющая выходного напряжения выпрямителя, определяемая как среднее за период повторения значение выходного напряжения:

$$U_d = \frac{1}{T_{II}} \int_0^{T_{II}} u_{вых} dt.$$

4). Выпрямленный ток I_d — постоянная составляющая выходного тока: $I_d = \frac{U_d}{R_H}$,

где R_H — сопротивление нагрузки.

5). Пульсность m — кратность частоты основной гармоники выходного напряжения по отношению к частоте входного напряжения (сети) f : $m = \frac{f_{осн}}{f}$

6). Среднее значение тока одного вентиля $I_{в.ср.}$

7). Максимальное обратное напряжение на непроводящем (закрытом) вентиле $U_{обр.макс.}$

Уровни постоянной составляющей и гармоник выходного напряжения, токи вентилях и обратные напряжения на них зависят от числа фаз входного напряжения и схемы соединения вентилях. Совокупность этих свойств принято оценивать системой выходных параметров выпрямителей.

1). Степень использования входного напряжения характеризует отношение выпрямленного напряжения к входному $\frac{U_d}{U_2}$. В неуправляемых выпрямителях это отношение

является постоянной величиной.

2). Коэффициент пульсаций определяется как отношение амплитуды основной гармоники выходного напряжения к выпрямленному напряжению: $q = \frac{U_{осн\ max}}{U_d}$

и характеризует качество выходного напряжения.

В случае идеально гладкого напряжения $q=0$. Чем больше q , тем больше размах пульсаций выходного напряжения. Между коэффициентом пульсаций и пульсностью выпрямителя существует простое соотношение: $q = \frac{2}{m^2 - 1}$.

Для снижения коэффициента пульсаций, а значит для повышения качества выходного напряжения в ряде случаев приходится использовать сглаживающие фильтры, содержащие реактивные элементы: дроссели и конденсаторы. Идеальный фильтр должен без потерь передавать в нагрузку постоянную и полностью подавлять переменную составляющую.

3). Отношение среднего тока вентиля к выпрямленному току $\frac{I_{в.ср}}{I_d}$ характеризует

использование вентиля по току.

4). Отношение максимального обратного напряжения к выпрямленному напряжению $\frac{U_{обр.мах}}{U_d}$ характеризует использование вентиля по напряжению.

5). Отношение габаритной мощности силового трансформатора к выпрямленной мощности $\frac{S_T}{P_d} = \frac{S_T}{U_d \cdot I_d}$ позволяет судить об использовании мощности трансформатора.

Параметры 3 и 4 необходимы для выбора вентиля по току и напряжению при заданных значениях U_d и I_d ; параметр 5 является исходным для расчета силового трансформатора.

При анализе работы выпрямителей свойства вентиля обычно идеализируют, полагая, что падение напряжения на открытом вентиле и ток закрытого вентиля равны нулю. ВАХ диода при такой идеализации может быть представлена отрезками прямых линий, совпадающими с осями координат (рис.3.2). При выводе формул для параметров выпрямителей пренебрегают также активными и индуктивными сопротивлениями обмоток трансформатора.

Трехфазный нулевой выпрямитель.

Схема выпрямителя, представленная на рис.3.3а, содержит силовой трансформатор, вторичные обмотки которого соединены звездой, и 3 вентиля. Выходные зажимы выпрямителя образованы точкой соединения катодов вентиля (+) и нейтралью n (-). Возможно и иное соединение вентиля, когда общая точка образована их анодами. В этом случае изменяется полярность выходного напряжения.

Из 3-х диодов, образующих вентиляльный блок, в проводящем состоянии может находиться лишь тот, для которого фазное напряжение, приложенное в прямом направлении, больше, чем у двух других. В интервале $\frac{5\pi}{6} > \omega t > \frac{\pi}{6}$ это условие выполняется для диода

VD1, в интервале $\frac{9\pi}{6} > \omega t > \frac{5\pi}{6}$ — для диода VD2, в следующем интервале для диода VD3

и т.д. Таким образом, каждый диод открыт в течении $\frac{1}{3}$ периода (рис.3.3б). За время,

равное одному периоду питающего напряжения, выходное напряжение изменяется трижды. Поэтому пульсность выпрямителя $m=3$, а коэффициент пульсаций в соответствии с равен

$$q = \frac{2}{3^2 - 1} = 0,25$$

Постоянную составляющую выходного напряжения можно найти, вычислив среднее его значение в интервале проводимости любого вентиля, например VD1. Полагая входное напряжение синусоидальным

$$u_a = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$$

и пренебрегая прямым падением напряжения на открытом диоде, имеем

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 = 1,17U_2$$

Таким образом, отношение $\frac{U_d}{U_2}$ для данного выпрямителя составляет 1,17. Поскольку

каждый вентиль открыт в течении $\frac{1}{3}$ периода, среднее значение его тока составляет также $\frac{1}{3}$

от тока нагрузки, т.е. $\frac{I_{в.ср}}{I_d} = \frac{1}{3}$.

На закрытых вентилях действуют обратные напряжения, равные линейным напряжениям. Например, в интервале проводимости VD1 обратным для VD3 является $u_{вс}$. Поэтому

$$U_{обр.мах} = \sqrt{3}U_2 \cdot \sqrt{2} = \sqrt{6}U_2$$

$$U_{обр.мах} = \frac{2\pi}{3} U_d = 2,09U_d$$

$$\text{или } \frac{U_{o \text{ бр. max}}}{U_d} = 2,09$$

Нетрудно видеть, что входные токи — это те же токи вентиляей: $i_a=i_{e1}$; $i_b=i_{e2}$; $i_c=i_{e3}$, а значит они содержат постоянные составляющие, равные $\frac{1}{3}$ выпрямленного тока.

Подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током вызывает в нем повышенные потери, а габаритная мощность трансформатора оказывается сравнительно большой: $\frac{S_T}{P_d} = 1,34$.

Этот недостаток, а также плохое использование вентиляей по напряжению объясняют то, что такой выпрямитель в мощных преобразовательных устройствах используется редко.

Часто нагрузка выпрямителя имеет индуктивный характер, как например, обмотка возбуждения электрической машины. В этом случае выходной ток хорошо сглажен, а токи вентиляей имеют форму прямоугольных импульсов продолжительностью $\frac{2\pi}{3}$

Трехфазный мостовой выпрямитель.

Вентильный блок выпрямителя содержит 6 диодов, образующих катодную (VD1, VD3, VD5) и анодную (VD2, VD4, VD6) группы.

В любой момент времени открыты те два вентиля из катодной и анодной групп, между которыми в проводящем направлении действует наибольшее линейное входное напряжение. В интервале $\frac{2\pi}{3} > \omega t > \frac{\pi}{3}$ открыты VD1 и VD4, в интервале $\pi > \omega t > \frac{2\pi}{3}$ — VD1 и VD6 и т.д. Таким образом, как и в нулевом выпрямителе, продолжительность интервала проводимости каждого из 6 вентиляей составляет $\frac{2\pi}{3}$ или $\frac{1}{3}$ периода. Однако продолжительность такта здесь $\frac{\pi}{3}$, а значит пульсность $m=6$. Коэффициент пульсаций

$q = \frac{2}{6^2 - 1} \approx 0,057$ свидетельствует о более высоком качестве выходного напряжения.

Использование вентиляей по току такое же, как в нулевом выпрямителе $\frac{I_{в.ср}}{I_d} = \frac{1}{3}$.

Для определения величины выпрямленного напряжения вычислим среднее значение выходного напряжения в интервале проводимости VD1, VD4:

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 1,35 U_2$$

$$\frac{U_d}{U_2} = 1,35$$

На закрытом вентиле действует линейное входное напряжение U_2 , поэтому

$$U_{o \text{ бр. max}} = \sqrt{2}U_2$$

или, учитывая, что $U_2 = U_d \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{2}}$, $U_{o \text{ бр. max}} = \frac{\pi}{3} U_d \approx 1,05 U_d$, $\frac{U_{o \text{ бр. max}}}{U_d} = 1,05$

Входные токи не содержат постоянной составляющей, но являются несинусоидальными.

Габаритная мощность трансформатора незначительно превышает выпрямленную мощность $\frac{S_T}{P_d} = 1,05$.

Как видно, трехфазный мостовой выпрямитель заметно превосходит нулевой по качеству выходного напряжения, использованию вентиляей и силового трансформатора. Выпрямители этого типа находят широкое применение в электроприводе и электротехнологии.

4. 12 - пульсные выпрямители.

Использование многопульсных выпрямителей позволяет повысить качество выходного напряжения, что в большинстве случаев позволяет отказаться от использования сглаживающих фильтров, лучше использовать вентиляи, избегая их группового

(параллельного или последовательного) соединения. Помимо этого многопульсные выпрямители оказывают меньшее отрицательное влияние на питающую сеть.

Для реализации 12-пульсных выпрямителей необходима 6-фазная симметричная система напряжений. Ее получают с помощью трехфазного трансформатора с двумя комплектами вторичных обмоток, причем один из них имеет соединение звездой, второй треугольником (рис.3.7). Благодаря этому, система abc сдвинута относительно системы cde на 30° . Равенство напряжений обеспечивается выбором числа витков вторичных обмоток в соответствии с соотношением $w_{\Delta}/w = \sqrt{3}$.

Вентильные блоки, питающиеся от вторичных обмоток трансформатора, могут соединяться последовательно или параллельно. На рис.3.8. представлена схема выпрямителя с последовательным соединением вентильных блоков и временные диаграммы выходных напряжений. Напряжение на нагрузке Z_n является суммой выходных напряжений $u_{\text{вых1}}$ и $u_{\text{вых2}}$. В результате суммирования двух пульсирующих напряжений, имеющих сдвиг в 30° , частота пульсаций удваивается, пульсность $m=12$, а коэффициент пульсаций в соответствии с (3.2) оказывается равным 0,014.

Выпрямленное напряжение равно сумме равных по величине напряжений U_{d1} и U_{d2} , поэтому $\frac{U_d}{U_2} = 2 \cdot 1,35 = 2,7$. На закрытых вентилях действует обратное напряжение, равное

вторичному линейному U_2 . Но, поскольку выпрямленное напряжение удваивается, то отношение $\frac{U_{o \text{ бр. max}}}{U_d} = 0,525$

Таким образом, данный выпрямитель превосходит 6-пульсный по качеству выходного напряжения, использованию входного напряжения и использованию вентиля по напряжению.

Поскольку вентильные блоки соединены последовательно, среднее значение тока вентиля составляет $\frac{1}{3}$ от выпрямленного тока, т.е. $\frac{I_{в.ср}}{I_d} = \frac{1}{3}$.

Схему с последовательным соединением вентильных блоков целесообразно использовать в выпрямителях с высоким значением выпрямленного напряжения.

Вариант 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением вентильных блоков представлен на рис.3.9.

Через нагрузку протекает сумма выпрямленных токов двух мостов. Поэтому $\frac{I_{в.ср}}{I_d} = \frac{1}{6}$.

Выходное напряжение равно полусумме выходных напряжений вентильных блоков (рис.3.9 б)

$$u_{\text{вых}} = \frac{u_{\text{вых1}} + u_{\text{вых2}}}{2}$$

поэтому пульсность выпрямителя $m=12$, а коэффициент пульсаций $q=0,014$. Использование выходного напряжения и обратное напряжение на вентиле такие же, как в 6-пульсном

$$\frac{U_d}{U_2} = 1,35; \quad \frac{U_{o \text{ бр. max}}}{U_d} = 1,05$$

Поскольку мгновенные значения выходных напряжений не равны, в контуре, образованном вентильными блоками, может возникнуть большой уравнивающий ток с частотой $12f=600$ Гц. Для его ограничения служит уравнивающий реактор L_u .

Благодаря хорошему использованию вентиля по току, этот выпрямитель используется при больших значениях выпрямленного тока.

Раздел 3. Управляемые сетевые преобразователи

Тема 3.1. Однофазный управляемый выпрямитель: фазоимпульсный способ управления, анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках, инверторный режим.

Общие сведения

Вентильные блоки управляемых выпрямителей собираются по тем же схемам, что и неуправляемых, но в отличие от последних в качестве вентилей полностью или частично используют тиристоры.

Благодаря этому, появляется возможность регулирования выпрямленного напряжения U_d без изменения переменного входного напряжения U_2 . Кроме того, выпрямитель, в вентильном блоке которого используются только тиристоры, может работать в режиме инвертирования. Это позволяет расширить функциональные возможности выпрямителей, создавая на их базе выпрямительно-инверторные агрегаты, реверсивные преобразователи и непосредственные преобразователи частоты.

Во многих случаях требуется не преобразование рода тока, а только регулирование мощности нагрузки, питающейся от сети переменного тока путем изменения величины питающего напряжения. Для этого используют тиристорные регуляторы мощности.

Непрерывной принадлежностью тиристорного преобразователя, работающего с сетью переменного тока, является блок фазоимпульсного управления (ФИУ). Его назначение — вырабатывать импульсы постоянной амплитуды и длительности, регулируемые по фазе относительно переменного питающего напряжения. Принцип фазового управления тиристором удобно рассмотреть на примере простейшего однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой (рис.4.1)

При замкнутом ключе S управляющие импульсы на тиристор не поступают, и он закрыт при любой полярности напряжения u_2 . При замкнутом контакте на управляющий электрод тиристора в моменты времени, соответствующие фазовым углам $\omega t = \alpha$, $\omega t = 2\pi + \alpha$, ... поступают управляющие импульсы положительной полярности u_y (рис.4.1б), открывающие тиристор, который остается открытым и после прекращения импульса до конца положительного полупериода. Угол α , соответствующий моменту открывания тиристора, называют углом управления, а интервал $\pi > \omega t > \alpha$ — интервалом проводимости тиристора. Если $\alpha = 0$, интервал проводимости равен полному полупериоду; такой режим принято называть полнофазным. Полнофазный режим аналогичен режиму неуправляемого выпрямителя, как если бы вместо тиристора был использован диод. При $\alpha > 0$ напряжение на нагрузке имеет форму усеченных полуволн синусоиды. Очевидно, что при $\alpha = 0$ напряжение на нагрузке будет максимальным, а при $\alpha = \pi$ равно нулю. Таким образом, изменяя угол управления, можно в широких пределах регулировать величину выходного напряжения.

Для устойчивого открывания тиристорov необходимо, чтобы амплитуда управляющих импульсов U_y была больше отпирающего напряжения управления, а его продолжительность — больше времени включения.

Однофазные управляемые выпрямители.

На рис.4.2 представлена схема однофазного нулевого выпрямителя. Проанализируем его работу при чисто активной нагрузке полагая, что коммутация тиристорov происходит мгновенно.

Блок ФИУ подает импульсы u_y на управляющие электроды тиристорov в те интервалы времени, когда их аноды положительны. В результате поочередного открывания тиристорov в моменты времени $\omega t = \alpha$; $\alpha + \pi$; $\alpha + 2\pi$... напряжение на нагрузке имеет форму, показанную на рис.4.3а. Выпрямленное напряжение определяется интегрированием выходного напряжения в интервале проводимости тиристора:

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Обозначив величину выпрямленного напряжения в полнофазном режиме ($\alpha = 0$) как U_{do} , где

$$U_{do} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9 U_2,$$

получим
$$U_{d\alpha} = U_{do} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

Выражение (4.1), представляющее зависимость выпрямленного напряжения от угла управления, является уравнением регулировочной характеристики выпрямителя при чисто активной нагрузке (рис.4.4, кривая 1), из которой видно, что возможный диапазон регулирования угла α составляет $0..180^\circ$.

При углах управления $\alpha > 0$ в кривой выходного тока имеются бестоковые паузы, что приводит к увеличению коэффициента пульсаций. Если пренебречь коммутационными процессами, для коэффициента пульсаций будет справедливо выражение

$$q_\alpha = q_0 \sqrt{1 + \frac{tg^2 \alpha}{m^2}},$$

где $q_0 = 2/3$ — коэффициент пульсаций для полнофазного режима;
 $m = 2$ — пульсность выпрямителя.

Это же выражение справедливо для рассматриваемых ниже многофазных выпрямителей с $m > 2$.

Для выпрямителей большой мощности типична не активная, а активно-индуктивная нагрузка, о характере которой удобно судить по постоянной времени $\tau = \frac{L_H}{R_H}$. На рис.4.3б

показаны временные диаграммы, соответствующие работе выпрямителя на идеальную индуктивную нагрузку ($\tau \rightarrow \infty$). Поскольку ток нагрузки в этом случае идеально сглажен, токи вентилей $i_{в1}$ и $i_{в2}$ имеют вид прямоугольных импульсов продолжительностью в половину периода.

В момент времени $\omega t = \alpha$ открывается тиристор VS1. При $\omega t = \pi$ напряжение u'_2 становится равным нулю и затем изменяет свой знак. Однако за счет энергии, накопленной в индуктивности нагрузки, VS1 остается открытым до момента $\omega t = \pi + \alpha$, когда включается тиристор VS2. В интервале $\pi.. \pi + \alpha$ выходное напряжение выпрямителя становится отрицательным. Наличие в кривой выходного напряжения отрицательных участков приводит к снижению выпрямленного напряжения по сравнению с активной нагрузкой. Уравнение регулировочной характеристики теперь имеет вид

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha$$

или
$$U_{d\alpha} = U_{do} \cos \alpha$$

Регулировочная характеристика (кривая 2 на рис.4.3) свидетельствует, что при идеальной индуктивной нагрузке диапазон регулирования α составляет $0..90^\circ$.

В реальных нагрузках постоянная времени является конечной величиной, и картина несколько изменяется. Если при $\tau \rightarrow \infty$ выходной ток непрерывен во всем диапазоне регулирования, то теперь он будет непрерывным только в интервале $\alpha = 0.. \alpha_{кр}$. При углах больше критического энергии, накопленной в индуктивности, становится недостаточно для поддержания тока тиристора в течении целого полупериода, и ток нагрузки становится прерывистым. До $\alpha < \alpha_{кр}$ регулировочная характеристика описывается уравнением (4.2); это зона непрерывного тока. При $\alpha > \alpha_{кр}$ начинается зона прерывистого тока, а регулировочная характеристика (кривая 3 рис.4.4) описывается иным уравнением, которое здесь не приводится. Величина угла $\alpha_{кр}$, являющегося границей зон, зависит от постоянной времени нагрузки.

На рис.4.5 представлена схема двухполупериодного выпрямителя, выполненного по мостовой схеме. Здесь блок ФИУ осуществляет попарное управление тиристорами: в положительные полупериоды входного напряжения открываются VS1 и VS2, в отрицательные — VS3 и VS4. В остальном работа мостового выпрямителя ничем не отличается от работы нулевого.

В мостовом выпрямителе тиристоры анодной группы (VS2, VS4) можно заменить диодами, это позволит несколько упростить конструкцию блока ФИУ. Свойства выпрямителя при этом не изменяются, однако он не может работать в инверторном режиме.

Инверторный режим однофазного управляемого выпрямителя.

Инвертированием принято называть процесс, обратный выпрямлению, т.е. преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Различают автономные инверторы, работающих независимо от каких-либо источников переменного тока и ведомые, частота и напряжение которых определяются сетью переменного тока, поскольку преобразованная энергия поступает в сеть.

Между ведомым инвертором и управляемым выпрямителем не существует схемотехнического различия, речь может идти лишь о выпрямительном или инверторном режиме вентильного преобразователя. Для перевода выпрямителя в режим инвертирования необходимо:

— к выходу выпрямителя подключить источник постоянной ЭДС согласно с его выходным напряжением;

— установить угол управления $\alpha > 90^\circ$.

Рассмотрим особенности инверторного режима на примере однофазного мостового преобразователя (рис.4.6). Будем полагать, что источником постоянной ЭДС E является генератор постоянного тока, а сглаживающий дроссель L имеет достаточно большую индуктивность, чтобы считать выходной ток преобразователя хорошо сглаженным.

В момент времени $\omega t = \alpha$ на управляющий электрод тиристора $VS1$ от блока ФИУ поступает управляющий импульс. В интервале $\pi > \omega t > \alpha$ цепь нагрузки питается через открытый $VS1$ от левой полуобмотки трансформатора с напряжением u'_2 . Ток вентиль i_{v1} и выходное напряжение имеют одно направление, следовательно энергия передается из сети в источник ЭДС. В момент времени $\omega t = \pi$ полярность напряжения u'_2 изменяется, но $VS1$ остается открытым за счет энергии, накопленной в дросселе и ЭДС E , приложенной к тиристорам в прямом направлении. На интервале $\pi + \alpha > \omega t > \pi$ ток i_{v1} и выходное напряжение имеют противоположные направления, что означает изменение направления потока энергии: теперь она поступает от источника в сеть. Поскольку продолжительность второго интервала больше чем первого, среднее значение мощности преобразователя имеет знак “-”, что свидетельствует о его работе в режиме инвертирования.

В качестве регулирующего фактора в инверторах принято считать не угол управления α , а угол опережения $\beta = \pi - \alpha$. Зависимость среднего значения выходного напряжения от угла опережения $U_d(\beta)$ является регулировочной характеристикой инвертора. При отсутствии потерь в дросселе она представляет зеркальное отображение характеристики выпрямителя для $\tau_n \rightarrow \infty$ (рис.4.7). Теоретически максимум инвертируемой мощности имел бы место при $\beta = 0$. Однако на практике такой режим неосуществим. Действительно, для восстановления запирающих свойств тиристора ему отводится время, равное β/ω . Если $\beta = 0$, при открывании очередного тиристора ранее проводивший также остается открытым, и возникает аварийный режим, называемый опрокидыванием инвертора. Чтобы его исключить в блоке ФИУ должно быть предусмотрено ограничение максимального значения угла α величиной $178...179^\circ$.

Инверторный режим вентильного преобразователя используется в мощных электроприводах постоянного тока для эффективного торможения. При этом двигатель переводят в режим генератора, кинетическая энергия, накопленная при движении, преобразуется в электрическую и, преобразованная инвертором, поступает в сеть. Такое торможение, называемое рекуперативным, особенно эффективно на электрическом транспорте, т. к. дает существенную экономию энергии. Мощные выпрямительно-инверторные агрегаты установлены на передающем и приемном концах высоковольтных ЛЭП постоянного тока.

Тема 3.2. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель: анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках.

Однофазные выпрямители имеют повышенный уровень пульсаций выходного напряжения и не обеспечивают равномерную нагрузку фаз питающей сети. Поэтому вентильные блоки мощных преобразователей выполняют по многофазным схемам. В частности, широкое применение находит трехфазная мостовая схема (рис.4.8.).

Если считать коммутацию мгновенной, в любой момент времени должны быть открыты один из тиристоров анодной (VS2, VS4, VS6) и один из катодной (VS1, VS3, VS5) групп. Поэтому блок ФИУ должен выдавать управляющие импульсы одновременно на 2 тиристора в порядке вступления их в работу.

За начало отсчета угла α принимают момент естественной коммутации соответствующей пары тиристоров. При $\alpha=0$ (полнофазный режим) кривая выходного напряжения будет такой же, как у неуправляемого выпрямителя (рис.3.6б). Если управляющие импульсы подаются с задержкой относительно моментов естественной коммутации, кривая выходного напряжения состоит из отрезков входных линейных напряжений. Ее форма для некоторых значений угла управления при активной нагрузке показана на рис.4.9.

В интервале $60^\circ > \alpha > 0$ имеет место режим непрерывного тока. При $\alpha > 60^\circ$ в кривых напряжения и тока появляются паузы, а при $\alpha = 120^\circ$ выходное напряжение и ток становятся равными нулю. Таким образом возможный диапазон регулирования угла α оказывается равным $0 \dots 120^\circ$.

Для зоны непрерывного тока регулировочная характеристика соответствует уравнению (4.2), т.е.

$$U_d = U_{do} \cos \alpha,$$

где $U_{do} = 1,35U_2$.

Для зоны прерывистого тока уравнение регулировочной характеристики имеет другой вид

$$U_d = U_{do} [1 + \cos(60^\circ + \alpha)]$$

При индуктивной нагрузке диапазон регулирования составляет $0 \dots 90^\circ$. Причиной сужения диапазона регулирования, как и в однофазном выпрямителе, являются отрицательные участки в кривой выходного напряжения, которые появляются при $\alpha > 60^\circ$. Ток остается непрерывным во всем диапазоне регулирования, а регулировочная характеристика описывается уравнением (4.2). Вид регулировочных характеристик при активной и индуктивной нагрузках показан на рис.4.10. Следует иметь в виду, что уравнения (4.2) и (4.3) выведены без учета коммутационных процессов.

При $\alpha > 90^\circ$ возможна работа выпрямителя в инверторном режиме. Для этого к его выходу должен быть подключен источник энергии постоянного тока.

Раздел 4. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть

Тема 4.1. Влияние мощных выпрямителей на питающую сеть: гармонический состав входных токов.

По своей природе вентильные преобразователи для питающей сети являются нелинейной нагрузкой. Во многих случаях их мощности соизмеримы с мощностями трансформаторных подстанций, поэтому влияние на питающую сеть оказывается весьма заметным.

В основном это влияние сводится к искажению формы кривой напряжения и загрузке сети дополнительной реактивной мощностью. В связи с расширяющимся применением мощных вентильных преобразователей в различных отраслях промышленности становится актуальной проблема борьбы с сопутствующими их работе отрицательными последствиями.

Ранее было показано, что входной ток имеет синусоидальную форму лишь у двухпульсных выпрямителей в полнофазном режиме при работе на активную нагрузку. Во всех остальных случаях кривая входного тока отличается от синусоиды. В частности, при индуктивной нагрузке у однофазного выпрямителя она прямоугольная, а у трехфазных — кусочно-прямоугольная. Вследствие этого в составе входного тока наряду с основной (первой) гармоникой $i_{1(1)}$ присутствуют высшие гармоники нечетного ряда (рис.4.19). Номера содержащихся гармоник соответствуют выражению

$$n = am \pm 1,$$

где n — номер гармоники;
 a — 1,2,3... натуральное целое число;
 m — пульсность выпрямителя.

Отношение действующего значения первой гармоники к действующему значению тока I_1 называется коэффициентом искажения

$$\kappa_u = \frac{I_{I(1)}}{I_1} = \frac{I_{I(1)}}{\sqrt{I_{I(1)}^2 + I_{I(3)}^2 + \dots}}$$

Приведенные на рис. 4.19 диаграммы свидетельствуют о том, что с увеличением пульсности кривая тока приближается к синусоиде, а содержание высших гармоник и коэффициент искажения уменьшаются. Данные о гармоническом составе потребляемых токов и коэффициентах искажения наиболее распространенных выпрямителей приведены в таблице

Таблица

Гармонический состав и коэффициенты искажений
первичного тока выпрямителей

Пульсность m	Номера высших гармоник n	Коэффициент искажения κ_u
2	3, 5, 7, 9...	0,9
6	5, 7, 11, 13, 17, 19...	0,955
12	11, 13, 23, 25, 35, 37...	0,9886

Тема 4.2. Искажение кривой напряжения, коэффициент мощности. Основные направления борьбы с отрицательным влиянием преобразователей на питающую сеть.

Падения напряжения от высших гармоник на сопротивлениях элементов электрических сетей вызывают искажение формы кривой напряжения. Несинусоидальность напряжения приводит к увеличению потерь в электрических сетях и оказывает отрицательное влияние на работу многих электроприемников.

Среди способов снижения вредного влияния гармоник наиболее эффективными оказываются повышение пульсности выпрямителей и установка на вводах потребителей электрических фильтров.

Вентильный преобразователь как нагрузка электрической сети характеризуется коэффициентом мощности

$$\lambda = \frac{P_1}{S},$$

где P_1 — активная мощность, поступающая из сети,
 S — полная мощность.

Если пренебречь потерями в вентильном блоке выпрямителя и в силовом трансформаторе, активную мощность можно принять равной выпрямленной мощности

$$P_1 = U_d I_d.$$

В однофазном режиме активная мощность определяется первой гармоникой входного тока

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_{I(1)}.$$

Полную же мощность определяет действующее значение входного тока, который помимо основной содержит высшие гармоники

$$S = \sqrt{3} U_1 I_1.$$

В таком случае коэффициент мощности в однофазном режиме оказывается равным коэффициенту искажения

$$\lambda = \frac{P_1}{S} = \frac{\sqrt{3} U_1 I_{I(1)}}{\sqrt{3} U_1 I_1} = \frac{I_{I(1)}}{I_1} = \kappa_u$$

При фазовом регулировании выпрямленного напряжения кривая тока отстает от напряжения на угол α , в связи с чем потребление реактивной мощности возрастает, а коэффициент мощности снижается

$$\lambda = \kappa_u \cdot \cos \alpha.$$

Приведенные рассуждения позволяют сформулировать рекомендации по поддержанию коэффициента мощности на приемлемом уровне.

1) Желательно использование многопульсных выпрямителей, коэффициент искажения которых близок к 1.

2) Поскольку в управляемом выпрямителе с RL нагрузкой $U_{d\alpha} = U_{d0} \cos \alpha$, то $\cos \alpha = U_{d\alpha} / U_{d0}$. Поэтому глубокое регулирование выпрямленного напряжения нежелательно.

Все сказанное справедливо не только для выпрямителей, но и для других сетевых вентильных преобразователей.

Раздел 5. Автономные вентильные преобразователи

Тема 5.1. Виды автономных преобразователей и их использование. Схемная реализация автономных инверторов. Инверторы на силовых транзисторах и режимы их работы.

В отличие от преобразователей, работающих с сетью переменного тока, источниками энергии для автономных преобразователей являются источники постоянного тока: аккумуляторные и солнечные батареи, батареи топливных элементов или выпрямители. Нагрузкой преобразователя может быть единичный электроприемник (двигатель, электротехнологическая установка) или группа потребителей. Типичными преобразователями этого класса являются автономные инверторы, импульсные регуляторы и трансформаторы постоянного тока.

Основой автономного преобразователя является коммутатор тока, в котором в качестве ключей используют транзисторы, двухоперационные и однооперационные тиристоры. Вентили первых двух типов являются полностью управляемыми, т.е. могут быть как открыты, так и закрыты путем подачи на соответствующие электроды сравнительно слабых управляющих сигналов. В отличие от них однооперационные тиристоры относятся к вентилям с неполным управлением. В сетевых преобразователях закрывание таких тиристоров происходит в моменты перехода тока через нулевые значения, т.е. в результате естественной коммутации. В автономных преобразователях закрывание однооперационных тиристоров осуществляется с помощью устройств искусственной коммутации, в состав которых входят конденсаторы, индуктивные элементы, а в ряде случаев и вспомогательные вентили. Необходимость искусственной коммутации приводит к усложнению конструкции преобразователя и увеличению потерь. Поэтому коммутаторы на транзисторах и двухоперационных тиристорах следует признать более перспективными.

Способы искусственной коммутации однооперационных тиристоров.

Для выключения однооперационного тиристора к нему необходимо приложить обратное напряжение, под действием которого прекращается анодный ток и происходит восстановление его запирающих свойств. Источником такого напряжения служит конденсатор, предварительно заряженный до необходимого напряжения.

Основные схемы искусственной коммутации представлены на рис.5.1.

Рассмотрим процесс коммутации по схеме рис.5.1а. Момент начала запирающего открытого тиристора VS соответствует замыканию ключа К. При этом конденсатор C_k , заряженный до напряжения U_{co} , подключается параллельно тиристорам. В этот момент времени (t_1) напряжение на тиристоре становится равным — U_{co} , и ток через тиристор прекращается. Вследствие перезаряда тиристора током нагрузки напряжение на тиристоре сначала снижается до нуля (момент t_2), а затем возрастает в положительном направлении до ЭДС источника. Чтобы не произошло повторного включения тиристора, продолжительность интервала $t_2 - t_1$ должна быть не меньше времени выключения. Из этого соображения с учетом величины тока и характера нагрузки рассчитываются емкость коммутирующего конденсатора и величина напряжения U_{co} .

Коммутация в схеме рис.5.1б происходит с тем отличием, что в момент начала коммутации напряжение на тиристоре равно — $(U_{co} - E)$. Рассмотренные варианты вследствие особенностей подключения коммутирующего конденсатора получили название параллельной коммутации.

При последовательной коммутации (рис.5.1в) конденсатор вводится в цепь последовательно с тиристором. Для этого в анодной цепи тиристора имеется дроссель, параллельно которому в момент t_1 подключается заряженный конденсатор. В этот момент

напряжение на тиристоре становится равным $-(U_{co}-E)$, и тиристор закрывается. В перезаряде конденсатора нагрузка не участвует, поэтому напряжение на ней не зависит от процессов на интервале коммутации.

Принципы схемной реализации автономных инверторов.

В зависимости от количества и схемы соединения вентилях различают инверторы, выполненные по мостовой, полумостовой и нулевой схемам. Особенности каждой из схем можно уяснить, рассмотрев модели инверторов с механическими ключами (рис.5.2).

В мостовой схеме (рис.5.2а) коммутатор содержит 4 ключа, замыкающиеся попарно. При замыкании ключей К1, К2 напряжение на нагрузке имеет положительную полярность (указана без скобок), при замыкании К3, К4 — отрицательную. В результате периодической коммутации ключей с частотой f напряжение на нагрузке будет переменным прямоугольной формы с амплитудой, равной ЭДС источника.

В полумостовой схеме коммутацию осуществляют 2 ключа, поочередно подключающие нагрузку к источникам с одинаковыми ЭДС (рис.5.2б). Достоинство схемы — меньшее число ключей, недостаток — необходимость двухполярного источника.

В нулевой схеме (рис.5.2в) ключи К1 и К2 поочередно подключают источник постоянной ЭДС к верхней и нижней первичным обмоткам трансформатора. В результате напряжение на нагрузке, подключенной к его вторичной обмотке, будет переменным также прямоугольной формы. В отличие от мостовой и полумостовой схем, где амплитуда напряжения равна ЭДС источника, в нулевой схеме она связана с ЭДС соотношением

$$U_{max} = \frac{E}{k},$$

где k — коэффициент трансформации.

Во всех вариантах схем среднее значение тока ключа равно половине тока нагрузки. Напряжение на разомкнутом ключе в мостовой схеме равно E , в полумостовой и нулевой схемах — $2E$.

Инверторы рассмотренного типа, для которых характерна прямоугольная форма кривой выходного напряжения, принято называть инверторами напряжения. Наряду с ними некоторое применение находят инверторы тока. Мостовая модель инвертора тока с механическими ключами показана на рис.5.3. В цепь источника включен дроссель L с большой индуктивностью, благодаря чему источник приобретает свойства источника тока. Параллельно нагрузке включен конденсатор C . Ключи осуществляют периодическую коммутацию тока I_d , представляющего сумму токов нагрузки i_n и конденсатора i_c . Кривая напряжения состоит из участков экспонент перезаряда конденсатора (рис.5.3б), кривая тока нагрузки определяется ее характером.

Трехфазные инверторы обычно выполняют по мостовой схеме (рис.5.4). Порядок коммутации ключей должен быть таким, чтобы линейные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} были сдвинуты друг относительно друга на 120° .

Транзисторные инверторы.

Преобразовательные устройства на транзисторах широко известны и успешно используются в слаботочной электронике. Благодаря разработке и освоению промышленностью транзисторов на токи и напряжения в несколько сотен ампер и вольт соответственно, транзисторные инверторы стали широко использоваться и в силовой преобразовательной технике. Преимуществами транзисторов как коммутирующих ключей является их быстроедействие, что позволяет выполнять инверторы на частоту в сотни килогерц. Немаловажно и то, что транзисторы являются полностью управляемыми вентилями и не требуют сложных устройств искусственной коммутации.

На рис.5.5 показана схема мостового транзисторного инвертора. Коммутация тока в нагрузке осуществляется транзисторами VT1...VT4, каждый из которых зашунтирован диодом. Пара транзистор-диод является аналогом ключа с двухсторонней проводимостью. Управление транзисторами осуществляется задающим генератором ЗГ, который питает их базовые цепи напряжением прямоугольной формы. Управляющие напряжения транзисторов VT1, VT2 и VT3, VT4 находятся в противофазе, поэтому в нечетные полупериоды будут открыты VT1, VT2; в

четные — VT3, VT4. Отрицательное напряжение на базах закрывающихся транзисторов способствует их форсированному запираанию, что снижает коммутационные потери.

Работу инвертора на активную нагрузку иллюстрируют временные диаграммы, представленные на рис.5.6а. В момент времени $\omega t=0$ открыты VT1, VT2; напряжение и ток нагрузки имеют положительную полярность. При $\omega t=\pi$ VT1 и VT2 закрываются, но открываются VT2, VT4, полярности напряжения и тока изменяются на противоположные. В результате напряжение и ток нагрузки имеют прямоугольную форму и совпадают по фазе. Ток, потребляемый от источника $i_{и}$, представляет сумму коллекторных токов транзисторов $i_{Т1-2}$ и $i_{Т3-4}$. Диоды VD1...VD4 в коммутации тока участия не принимают.

При активно-индуктивной нагрузке кривая тока нагрузки состоит из участков экспонент и отстает от напряжения на угол ψ (рис.5.6б). В интервале $\psi > \omega t > 0$ ток и напряжение нагрузки имеют противоположные знаки. Поскольку транзисторы VT1 и VT2 обладают односторонней проводимостью, эта часть тока нагрузки протекает по диодам VD1, VD2. В следующем полупериоде участниками процесса будут диоды VD3, VD4 и транзисторы VT3, VT4. В кривой тока источника имеются отрицательные участки, что свидетельствует о возврате части энергии от нагрузки к источнику. Такую циркуляцию реактивной энергии обеспечивают обратные диоды. Циркуляция реактивной энергии возможна лишь в случае, если источник обладает двухсторонней проводимостью. Чтобы обеспечить нормальный режим коммутации, источник с односторонней проводимостью необходимо зашунтировать конденсатором.

Если мощность нагрузки не превышает несколько десятков ватт, Инверторы выполняются по схеме с самовозбуждением (генератор Розра). Нулевой вариант такого инвертора представлен на рис.5.7. Инвертор выполнен на двух транзисторах и трансформаторе с магнитопроводом из материала, имеющего прямоугольную петлю гистерезиса. Транзисторы поочередно подключают источник питания к первичным обмоткам w'_1 и w''_1 трансформатора, вызывая изменение магнитной индукции от $-B_s$ до $+B_s$. Цепи баз транзисторов питаются от обмоток w'_2, w''_2 . При фазировке обмоток, показанной на схеме, обратная связь будет положительной, благодаря чему возникает генерация. Переключение транзисторов происходит в моменты достижения индукцией положительного или отрицательного насыщения. Частота генерации с достаточной точностью соответствует уравнению

$$f = \frac{E \cdot 10^4}{4B_s \cdot S \cdot w_1} \text{ Гц,}$$

где E — ЭДС источника, В;
 B_s — индукция насыщения, Тл;
 S — площадь сечения магнитопровода, см²;
 w_1 — число витков первичной обмотки трансформатора.

Чтобы обеспечить устойчивый запуск, на базы транзисторов подается небольшое положительное напряжение с делителя R1-R2.

Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах.

На рис.5.8 представлен инвертор напряжения, выполненный по полумостовой схеме. Элементами принудительной коммутации однооперационных тиристорov являются конденсатор C_k и дроссель L_k . Последний имеет две магнитосвязанные обмотки с одинаковыми числами витков $w_1=w_2=w$. Управление тиристорами осуществляет блок управления, подающий на управляющие электроды импульсы положительной полярности с частотой, соответствующей частоте инвертирования.

В момент времени t_1 (рис.5.8б) открывается тиристор VS1, и на нагрузке появляется напряжение $+E$. До этой же величины заряжается конденсатор C_k (полярность на схеме указана без скобок). Через половину периода (момент t_2) открывается VS2. При этом к обмотке w_2 дросселя прикладывается напряжение, равное $2E$. Это напряжение трансформируется в обмотку w_1 , в результате чего к тиристору VS1 прикладывается обратное напряжение, равное $-2E+E=-E$, в результате чего он закрывается. Теперь напряжение на нагрузке и конденсаторе меняет знак (полярность в скобках). При отпирании VS1 точно так же будет закрыт VS2. Таким образом, отпирание очередного тиристора приводит к принудительному закрыванию ранее открытого.

Форма напряжения нагрузки — прямоугольная, форма тока определяется характером нагрузки. Величины L_k и C_k рассчитываются так, чтобы продолжительность отрицательного импульса на запираемом тиристоре была больше времени его восстановления. Обратные диоды VD1, VD2 выполняют ту же функцию, что и в транзисторных инверторах. Инвертор работоспособен в широком интервале сопротивления нагрузки, включая режим холостого хода.

Увеличение частоты приводит к тому, что интервал коммутации занимает все большую часть продолжительности полупериода. Поэтому максимальная частота, на которую выполняют тиристорные инверторы напряжения обычно не превышает 500...1000 Гц.

Резонансные инверторы.

Этот тип инверторов находит применение для преобразования постоянного тока в переменный повышенной (10-20 кГц) частоты. Основная область использования — индукционный нагрев металлов. При этом нагрузкой инвертора является индуктор с помещенными внутри его металлическими изделиями и заготовками.

Рассмотрим работу простейшего резонансного инвертора, выполненного по полумостовой схеме (рис.5.9).

Цепь нагрузки инвертора включена между точками а и о, причем R_n , L_n — элементы схемы замещения нагруженного индуктора, а C_k — коммутирующий конденсатор. Нормальная работа инвертора обеспечивается лишь при резонансном характере этой цепи, для чего должно соблюдаться условие

$$R_n < 2\sqrt{\frac{L_n}{C_k}}.$$

При этом резонансная частота будет равна $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_n C_k}}$.

Частота переключения тиристорov VS1, VS2 должна быть меньше резонансной частоты цепи нагрузки. Форма напряжения на цепи нагрузки u_{ao} и тока показана на рис.5.9б. Запирание тиристорov происходит за счет естественного спада тока до нулевого значения. Форма полуволн тока практически синусоидальна, между полуволнами имеются бестоковые паузы, необходимые для восстановления тиристорov. В зависимости от массы нагреваемых изделий, материала и температуры параметры L_n и R_n могут изменяться довольно в широких пределах, из-за чего изменяется и собственная частота. Чтобы не произошло аварийного включения обоих тиристорov, для всех режимов нагрузки должно выполняться условие

$$\frac{1}{2f} - \frac{1}{2f_o} > t_e,$$

где t_e — время выключения (восстановления) тиристора.

Отметим, что восстановление тиристора в данной схеме происходит в условиях отсутствия на нем отрицательного напряжения, поэтому время выключения относительно велико. Это обстоятельство ограничивает частоту инвертирования величиной порядка 8...10 кГц даже при использовании высокочастотных тиристорov.

Более совершенным является инвертор с обратными диодами (рис.5.10).

В зависимости от соотношения между собственной частотой цепи нагрузки f_o и частотой инвертирования f возможны два режима работы инвертора.

На рис.5.11а представлены идеализированные временные диаграммы для режима, когда $f < f_o/2$. В момент времени t_1 открывается тиристор VS1, и в цепи нагрузки возникает ток i_n , который становится равным нулю в момент t_2 вследствие резонансного характера цепи. В интервале t_3-t_2 конденсатор C_k перезаряжается через диод VD1. Вследствие расходования энергии в сопротивлении нагрузки и потерь в контуре амплитуда тока в этом интервале меньше амплитуды тока в интервале проводимости тиристора. В момент времени t_4 открывается VS2, и процесс повторяется в зеркальном отображении. В интервале t_4-t_3 ток нагрузки и напряжение u_{ao} равны нулю. Таким образом в этом режиме ток нагрузки имеет прерывистый характер.

Во втором режиме $f > f_o/2$ (рис.5.11б) очередной тиристор открывается раньше, чем ток через диод спадает до нуля. В результате кривая тока нагрузки становится непрерывной и приобретает характерную двугорбую форму. Мощность, выделяемая в нагрузке, возрастает и теоретически была бы максимальной при $f=f_o$. Однако при этом время, отводимое для восстановления тиристорov, становится равным нулю, что привело бы к опрокидыванию

инвертора. Чтобы этого не произошло, продолжительность интервала, в течение которого к тиристорам приложено обратное напряжение, равное прямому падению напряжения на диоде, должно быть не меньше времени восстановления тиристора

$$t_3 - t_2 = \frac{1}{2f} - \frac{1}{2f_0} \geq t_e$$

Из этого условия получено выражение для максимальной частоты инвертирования

$$f_{max} = \frac{f_0}{1 + 2t_e f_0}$$

Нагрузку можно подключать и к точкам *a-o* инвертора. В этом случае потребуется отдельный коммутирующий дроссель, а напряжение на нагрузке будет иметь прямоугольную форму. Характер участка цепи между точками *ao* должен быть резонансным.

На практике подобные инверторы обычно выполняют по мостовой схеме (рис.5.12).

Улучшение формы выходного напряжения автономных инверторов.

В большинстве случаев кривая выходного напряжения инверторов имеет прямоугольную форму, и требуются специальные меры по приближению ее к синусоидальной. Одной из таких мер является использование электрических фильтров, включаемых между инвертором и нагрузкой.

В общем случае звено электрического фильтра содержит последовательный и параллельный элементы. В качестве первого используют индуктивный элемент, в качестве второго — конденсатор (рис.5.13). В большинстве случаев одного звена для эффективной фильтрации напряжения бывает недостаточно, что вынуждает использовать более сложные многозвенные фильтры. При этом увеличиваются габариты и стоимость преобразователя, ухудшаются его энергетические показатели.

Существует способ формирования выходного напряжения, позволяющий снизить содержание наиболее значимых 3-й, 5-й и 7-й гармоник. Сущность способа заключается в том, что полупериод выходного напряжения формируется в виде прямоугольных импульсов постоянной амплитуды, но переменной длительности. Если длительность импульсов изменяется по закону синуса, огибающая выходного напряжения имеет форму синусоиды, а содержание гармоник низких порядков резко снижается (рис.5.14). Правда, при этом увеличиваются уровни гармоник высших порядков (13, 15, 17 и т.д.), однако их фильтрация уже не представляет трудности. Усложнение инвертора за счет устройств, обеспечивающих широтную модуляцию выходного напряжения, окупается снижением габаритов, массы и стоимости фильтра.

Тема 5.2. Импульсные регуляторы мощности. Реверсивные регуляторы и их использование.

Импульсные регуляторы постоянного тока.

Импульсные регуляторы используются для регулирования мощности электроприемников, питающихся от аккумуляторных или солнечных батарей. В частности, их применение целесообразно на транспортных средствах с тяговыми двигателями постоянного тока, для которых аккумуляторные и солнечные батареи являются автономными источниками энергии.

Принцип импульсного регулирования рассмотрим на примере активной нагрузки, периодически подключаемой к источнику постоянной ЭДС с помощью ключа (рис.5.15). Частота коммутации и относительная продолжительность импульса задаются управляющим устройством УУ. Напряжение на нагрузке имеет форму прямоугольных импульсов продолжительностью t_n и периодом повторения T . Среднее значение напряжения на нагрузке будет равно

$$U_{н\text{ ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T E dt = E \frac{t_n}{T} = \gamma E$$

где $\gamma = \frac{t_n}{T}$ — коэффициент заполнения.

Действующее значение напряжения

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt} = \sqrt{\gamma} E$$

и мощность нагрузки

$$P_H = \gamma \frac{E^2}{R_H},$$

Таким образом, изменением коэффициента заполнения напряжение и мощность нагрузки можно регулировать от нуля до максимальных значений. Заметим, что если ключ идеальный, потери на регулирование отсутствуют полностью. Действующим значением напряжения пользуются в тех случаях, когда нагрузкой являются осветительные лампы или нагревательные элементы. При электрохимической или двигательной нагрузке следует пользоваться средним значением.

На практике такие регуляторы обычно работают с активно-индуктивной нагрузкой (двигатели постоянного тока, активная нагрузка с сглаживающим дросселем). Возможность регулирования при этом полностью сохраняется, однако для устранения перенапряжений нагрузку следует шунтировать обратным диодом (рис.5.16).

В интервале $0 \dots t_n$ ключ замкнут, ток i_k поступает в нагрузку, диод VD закрыт. После размыкания ключа ток нагрузки замыкается через диод. Кривая тока нагрузки состоит из участков возрастающей и спадающей экспонент. Размах пульсаций тока тем меньше, чем больше постоянная времени $\tau = \frac{L_H}{R_H}$ и чем выше частота коммутации. Среднее и

действующие значения напряжения соответствуют выражениям (5.1), (5.2).

Регулирование коэффициента заполнения возможно двумя способами: широтноимпульсным и частотноимпульсным. При широтноимпульсном регулировании частота остается неизменной, а изменяется продолжительность импульса. При частотноимпульсном — постоянной является продолжительность импульса, но изменяется частота. В обоих случаях диапазон регулирования коэффициента заполнения составляет $\gamma=0 \dots 1$, в энергетическом отношении оба способа равноценны. Выбор того или иного из них отражается лишь на конструкции управляющего устройства.

В качестве ключей могут быть использованы силовые транзисторы, двухоперационные тиристоры или однооперационные тиристоры с узлами искусственной коммутации.

При больших мощностях возникает необходимость параллельного соединения нескольких вентилях, что по ряду причин нежелательно. Кроме того, возникают трудности в изготовлении дросселей, рассчитанных на большие токи. В таких случаях преобразователи выполняются по многотактным схемам. Многотактный регулятор состоит из нескольких одноконтурных, работающих с временным сдвигом на общую нагрузку. В качестве примера на рис.5.17 представлены схема и временные диаграммы двухтактного регулятора.

Ключи K1, K2 работают с фазовым сдвигом в 180° , поэтому каждый из них, а также дроссели L_1, L_2 нагружены лишь половиной тока нагрузки. Снижаются требования к динамическим свойствам ключей, поскольку частота их коммутации также снижается в два раза. Поскольку каждый вентиль ключа подключен к нагрузке через собственный дроссель, не требуется и подбор вентилях по прямому падению напряжения, как это требуется при параллельном соединении.

Реверсивные регуляторы и их использование.

На рисунке представлен инвертор напряжения, выполненный по полумостовой схеме. Элементами принудительной коммутации однооперационных тиристоров являются конденсатор C_k и дроссель L_k . Последний имеет две магнитосвязанные обмотки с одинаковыми числами витков $w_1=w_2=w$. Управление тиристорами осуществляет блок управления, подающий на управляющие электроды импульсы положительной полярности с частотой, соответствующей частоте инвертирования.

В момент времени t_1 (рис.5.8б) открывается тиристор VS1, и на нагрузке появляется напряжение $+E$. До этой же величины заряжается конденсатор C_k (полярность на схеме указана без скобок). Через половину периода (момент t_2) открывается VS2. При этом к обмотке w_2 дросселя прикладывается напряжение, равное $2E$. Это напряжение трансформируется в обмотку w_1 , в результате чего к тиристору VS1 прикладывается обратное напряжение, равное $-2E+E=-E$, в результате чего он закрывается. Теперь напряжение на нагрузке и конденсаторе меняет знак (полярность в скобках). При отпирании

VS1 точно так же будет закрыт VS2. Таким образом, отпирание очередного тиристора приводит к принудительному закрыванию ранее открытого.

Форма напряжения нагрузки — прямоугольная, форма тока определяется характером нагрузки. Величины L_k и C_k рассчитываются так, чтобы продолжительность отрицательного импульса на запираемом тиристоре была больше времени его восстановления. Обратные диоды VD1, VD2 выполняют ту же функцию, что и в транзисторных инверторах. Инвертор работоспособен в широком интервале сопротивления нагрузки, включая режим холостого хода.

Увеличение частоты приводит к тому, что интервал коммутации занимает все большую часть продолжительности полупериода. Поэтому максимальная частота, на которую выполняют тиристорные инверторы напряжения обычно не превышает 500...1000 Гц.

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель	4	-
2	3.	Управляемый выпрямитель и ведомый инвертор	4	-
3	3.	Симисторный регулятор мощности	3	-
4	5.	Импульсный регулятор постоянного тока	4	-
5	5.	Высокочастотный автономный инвертор	3	-
ИТОГО			18	-

4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Выбор вентиля по заданным выходным параметрам	4	-
2	2.	Структура, использование, выходные параметры выпрямителей	8	-
3	2.	Сравнительная характеристика выпрямителей	8	-
4	3.	Анализ работы блока фазоимпульсного управления для управляемого выпрямителя и симисторного регулятора	6	-
5	4.	Анализ гармонического состава входных токов, искажена кривой напряжения	4	-
6	5.	Анализ работы задающего генератора автономного инвертора	6	-
ИТОГО			36	-

4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№, наименование разделов дисциплины	Компетенции	Кол-во часов	Компетенция	Σ комп.	$t_{ср}$ час	Вид учебных занятий	Оценка результатов
			ПК- 5				
1	2	3	5	6	7	8	
1. Силовые полупроводниковые вентили		24	+	1	24	Лк, ПЗ, СР	экзамен
2. Неуправляемые выпрямители		30	+	1	30	Лк, ПЗ, ЛР, СР	экзамен
3. Управляемые сетевые преобразователи		33	+	1	33	Лк, ПЗ, ЛР, СР	экзамен
4. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть		24	+	1	24	Лк, ПЗ, СР	экзамен
5. Автономные вентильные преобразователи		33	+	1	33	Лк, ПЗ, ЛР, СР	экзамен
всего часов		144	144	1	144		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Белоус А.И. Полупроводниковая силовая электроника./ Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. - Москва: Техносфера, 2013. - 216 с.+12 с цв. вкл
2. Саламатов Г.П. Вентильные преобразователи. Основы силовой полупроводниковой техники : учеб. пособие / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2007. - 83 с.

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./чел.)
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Белоус А.И. Полупроводниковая силовая электроника./ Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. - Москва: Техносфера, 2013. - 216 с.+12 с цв. вкл http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=273783&sr=1	Лк, ЛР, ПЗ, СР	ЭР	1
Дополнительная литература				
2.	Анякин В.А. Современная электроника: учебное пособие / В. А. Анякин, А. В. Ралдугин, Р. Ю. Шаварин. - Братск: БрГУ, 2012. - 451 с	Лк, ЛР, СР	105	1

3.	Саламатов Г.П. Вентильные преобразователи. Основы силовой полупроводниковой техники : учеб. пособие / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2007. - 83 с. http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Энергетика%20-%20Автоматика/Саламатов%20Г.П.%20Вентильные%20преобразователи.Основы%20%20силовой%20полупроводниковой%20%20техники.Учебное%20пособие.2007.pdf	Лк, ЛР, ПЗ, СР	113+ЭР	1
4.	Саламатов Г.П. Вентильные преобразователи: методические указания к лабораторному практикуму / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2008. - 48 с. http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Энергетика%20-%20Автоматика/Саламатов%20Г.П.%20Вентильные%20преобразователи.2008.pdf	ЛР	102+ЭР	1
5.	Астапенко Н.А. Предварительный расчет к проектированию управляемого выпрямителя: методические указания к выполнению самостоятельной работы / Н.А.Астапенко.- Братск: БрГУ, 2013 – 12 с.	ПЗ, СР	93	1

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ

http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.

2. Электронная библиотека БрГУ

<http://ecat.brstu.ru/catalog>.

3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» <http://biblioclub.ru>.

4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»

<http://e.lanbook.com>.

5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"

<http://window.edu.ru>.

6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru>.

7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/>.

8. Национальная электронная библиотека НЭБ

<http://xn--90ax2c.xn--plai/how-to-search/>.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ

Лабораторная работа № 1 Трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель

Цель работы: изучение схемы и работы выпрямителя; измерение его выходных параметров

Порядок выполнения:

1. Скоммутировать схему выпрямителя в соответствии с рис. 1, предъявить для проверки.

2. Включить резистивную нагрузку, подать напряжение питания и снять осциллограммы $u_{вых}$, u_{ϕ} , i_2 , i_{ϕ} , i_{ϕ} . Определить пульсность выпрямителя.

3. Измерить U_2 , U_d , U_{ϕ} , I_d , I_{ϕ} . Результаты измерений оформить согласно таблице 1.

4. Включить последовательно с R_n дроссель L_n . Снять осциллограммы i_{ϕ} , и i_2 Измерить коэффициент пульсаций и определить коэффициент сглаживания.

5. Сформулировать выводы по работе, где отметить преимущества исследованного выпрямителя и привести объяснения наблюдавшимся расхождениям между теоретическими и опытными значениями выходных параметров.

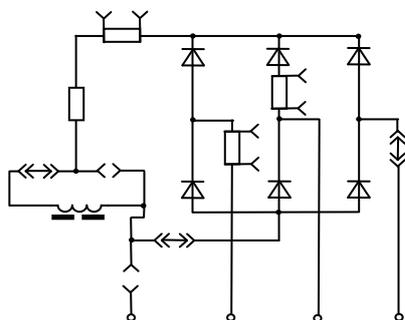


Рис. 1 - Схема лабораторной установки

Таблица 1

Результаты измерений и параметры мостового выпрямителя

U_2	U_{\sim}	U_d	I_d	$I_{в.ср}$	$U_{обр.мах}$	U_d / U_2		$I_{в.ср} / I_d$		$U_{обр.мах} / U_d$		q	
В	В	В	В	В	В	Т	Э	Т	Э	Т	Э	Т	Э

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткая характеристика выпрямителя.
3. Схема выпрямителя и результаты его испытания: осциллограммы, таблицы результатов, определение коэффициента сглаживания.
4. Выводы.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 2.1 раздела 2.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4].

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. В каких случаях нет необходимости в силовом трансформаторе и сглаживающем дросселе?
2. Какие параметры вентилях ограничивают мощность выпрямителя? Определите максимальную выходную мощность мостового выпрямителя, в котором использованы диоды Д25-4.
3. От чего зависит степень сглаживания выходного тока?
4. Выведите приближенное соотношение между действующим значением входного тока и выпрямленным током.

Лабораторная работа № 2 Управляемый выпрямитель и ведомый инвертор

Цель работы: изучение схемы и снятие характеристик однофазного вентильного преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования

Порядок выполнения:

1. *Управляемый выпрямитель с активной нагрузкой*

1. Подключить к выходу преобразователя нагрузку R_n .
2. Включить преобразователь, подать напряжение питания на блок ФИУ. Изменяя угол управления, проверить работоспособность преобразователя, ориентируясь на показания ваттметра.

3. Снять осциллограммы выходного напряжения, токов нагрузки, тока вентиля и первичного тока при углах управления $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$.
4. Снять регулировочную характеристику (таб. 1).

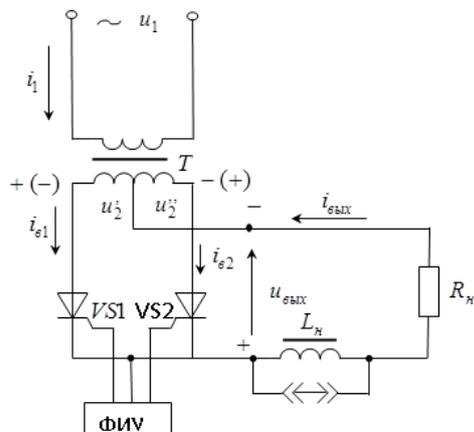


Рис. 2.1. – Однофазный нулевой управляемый выпрямитель

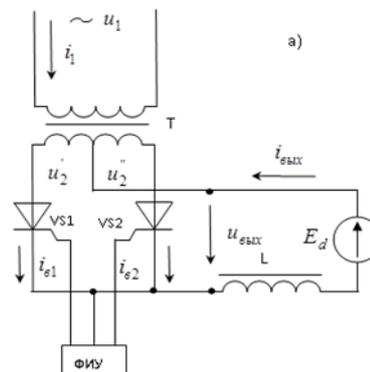


Рис. 2.2. Схема инвертора

Таблица 1

Регулировочные характеристики выпрямителя при активной нагрузке

α , град.	U_2 , В	U_d , В	
		теоретич.	эксперимент.
0			
30			
60			
90			
120			
150			
180			

2. Управляемый выпрямитель с индуктивной нагрузкой

Включить последовательно с R_n дроссель L_n .

Снять осциллограммы $U_{\text{вых}}$, $i_{\text{вых}}$, i_b , i_1 , при углах управления $30^\circ, 60^\circ$ и 90° . Определить угол управления, при котором выпрямитель переходит в режим прерывистого тока.

Снять регулировочную характеристику (таб. 2).

Таблица 2

Регулировочные характеристики выпрямителя при индуктивной нагрузке

α , град.	U_2 , В	U_d , В	
		теоретич. ($\tau \rightarrow \infty$)	эксперимент.
0			
30			
60			
90			
120			
150			

3. Ведомый инвертор

1. Соединить преобразователь с трехфазным выпрямителем по схеме на рис. 2.2. подать на тот и другой питающее напряжение.

2. Установить угол управления $\alpha = 150^\circ$ ($\beta = 30^\circ$).

Включить блок ФИУ. По ваттметру убедиться, что преобразователь работает в режиме инвертирования.

3. Определить угол опережения $\beta_{опм}$, при котором инвертируемая мощность максимальна.

4. Увеличивая угол α , определить его значение, при котором происходит опрокидывание инвертора. Во избежание перегрева вентиля не допускать работу в этом режиме более 1 с.

5. Выключить инвертор в следующем порядке: выпрямитель – блок ФИУ – силовой трансформатор преобразователя.

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткая характеристика выпрямителя.
3. Схема выпрямителя и результаты его испытания: осциллограммы, таблицы результатов, определение коэффициента сглаживания.
4. Выводы.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 3.1 раздела 3.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4,5].

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Приведите примеры использования в электроэнергетике управляемых выпрямителей и инверторов.
2. Каковы отрицательные последствия использования мощных вентильных преобразователей?
3. Каким должен быть порядок поступления управляющих импульсов на тиристоры? Допустима ли их одновременная подача на оба тиристора?
4. Каковы преимущества многофазных преобразователей?
5. Когда возможен срыв инвертирования (опрокидывание) ведомого инвертора? В чем опасность опрокидывания?

Лабораторная работа № 3 Симисторный регулятор мощности

Цель работы: изучение схемы и снятие характеристик однофазного регулятора при фазовом управлении

Порядок выполнения:

1. Изучить схему и особенности функционирования регулятора.

2. Подключить к регулятору нагрузку, а к выходному напряжению – вольтметр и осциллограф.

Получив разрешение преподавателя, убедиться в функционировании регулятора.

3. Снять осциллограммы выходного напряжения при 2-3 значениях угла α .

Изменяя угол α от 0 до 180° получить данные для построения регулировочной характеристики (таблица 1).

Зависимость напряжения нагрузки от угла управления

α°	$U, В$	$U_n, В$	
		эсп.	теор.
0			
...			
180			

Величину входного напряжения измерять в режиме холостого хода.

Теоретические значения U_n рассчитать по формуле: $U_n = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$

Построить в удобном масштабе теоретическую и экспериментальную регулировочные характеристики.

Оценить КПД регулятора для однофазного режима:

$$\eta \approx \frac{U_n}{U}$$

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование и цель работы
2. Схема регулятора, ее краткое описание и режимы работы.
3. Испытание регулятора (осциллограммы напряжения при различных углах управления).
4. Регулировочные характеристики (таблица, графики).
5. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 3.1 раздела 3.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4].

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Чем обусловлен высокий КПД регулятора?
2. В чем преимущество использования симистора вместо 2-х тиристоров?
3. Возможно ли использование регуляторов, работающих по широтному принципу для регулирования освещенности?
4. Чем вызвано требование, чтобы при широтном управлении продолжительность импульса обязательно содержала целое число периодов переменного напряжения?

Лабораторная работа № 4 Импульсный регулятор постоянного тока

Цель работы: изучение схемы нереверсивного регулятора, исследование режимов его работы.

Порядок выполнения:

1. Изучить схему и особенности функционирования регулятора.
2. Подключить нагрузку, вольтметр и осциллограф.
3. Получив разрешение, включить стенд, блок ШИУ и убедиться в функционировании регулятора с активной и активно-индуктивной нагрузкой.
4. Снять осциллограммы напряжения и тока при активной и активно-индуктивной нагрузках для 2-3 значений коэффициента заполнения.
5. Снять зависимость среднего значения напряжения нагрузки от коэффициента заполнения. 6. Построить регулировочную характеристику. Подключить к регулятору двигатель постоянного тока, оценить диапазон регулирования скорости вращения.

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование и цель работы

2. Назначение регулятора, схема и ее краткое описание.
3. Испытание регулятора (осциллограммы напряжения и тока).
4. Регулировочная характеристика (таблица результатов, график).
5. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.1 раздела 5.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4] .

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Чем обусловлен высокий КПД регулятора?
2. В каком режиме работает транзистор? Что необходимо для обеспечения такого режима?
3. В чем опасность отсутствия обратного диода при активно-индуктивной нагрузке?

Лабораторная работа № 5 Высокочастотный автономный инвертор

Цель работы: изучение принципа и режимов работы однофазного транзисторного инвертора.

Порядок выполнения:

1. Произвести коммутацию цепей питания и нагрузки инвертора в соответствии с рис. 5.
2. Подключить к выходу инвертора осциллограф.
3. После проверки соединений преподавателем включить источник питания. Отрегулировав развертку осциллографа, убедиться в наличии выходного напряжения прямоугольной формы с амплитудой порядка 30 вольт.
4. Определить диапазон регулирования частоты инвертирования.
5. Включить нагрузку. Снять осциллограммы выходного напряжения, токов нагрузки и источника при активной и активно-индуктивной нагрузках.
6. Оценить КПД инвертора. Для этого в режиме активной нагрузки измерить и зафиксировать величины напряжения и тока нагрузки, а также выходных напряжения и тока. КПД инвертора будет приблизительно равен:

$$\eta = \frac{U_n I_n}{U_H I_H}$$

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование и цель работы
2. Краткие сведения об автономных инверторах.
3. Однофазный нулевой инвертор (схема, описание работы, режимы).
4. Исследование режимов инвертора (осциллограммы напряжений и токов, комментарий к ним).
5. Оценка КПД инвертора.
6. Выводы.

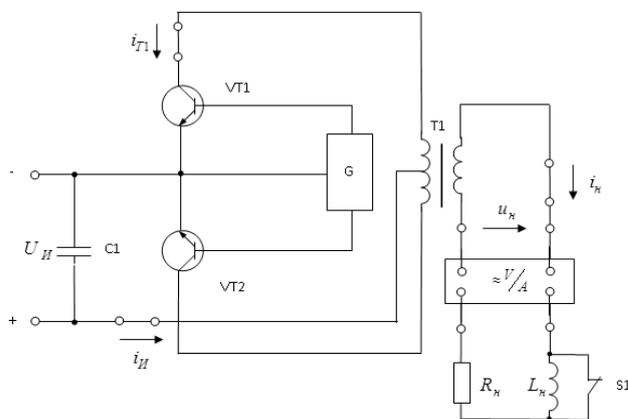


Рис. 5. – Схема инвертора с нагрузкой и

измерителем

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.2 раздела 5.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4].

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Для чего необходима пауза в управляющем напряжении? Какой должна быть ее продолжительность?
2. Какова роль обратных диодов? Когда они безусловно необходимы?
3. В каком случае необходим конденсатор, шунтирующий источник?
4. В каких элементах инвертора возникают потери мощности, снижающие его КПД?
5. Покажите форму тока источника при отсутствии потерь и идеальной индуктивной нагрузке.

Практические занятия №№ 1, 2 Выбор вентиляей по заданным выходным параметрам. Структура, использование, выходные параметры выпрямителей. Сравнительная характеристика выпрямителей

Цель работы: изучить схемы управляемых выпрямителей, произвести предварительный выбор тиристоров при проектировании управляемого выпрямителя.

Задание:

По известным величинам, согласно варианта (см. таблицу 1), максимального выпрямленного напряжения (U_{d0}), выпрямленного тока (I_{d0}) и коэффициента пульсаций (q_0):

1. Обосновать схему вентиляейного блока.
2. Вычертить схему выпрямителя с силовым трансформатором и блоком ФИУ.
3. Выбрать тиристоры по допустимому прямому току и повторяющемуся напряжению для наиболее напряженного (полнофазного) режима.
4. Определить габаритную мощность силового трансформатора.
5. Рассчитать напряжение обмоток трансформатора, полагая, что первичные обмотки включены в трехфазную сеть с напряжением 380/220 В

Таблица 1

Варианты заданий

№ варианта	U_{d0} , В	I_{d0} , А	q_0
1	48	500	0.057
2	800	240	0,014
3	200	150	0,057
4	65	630	0,057
5	100	200	0,014
6	1000	250	0,014
7	1000	320	0,057
8	240	160	0,25
9	80	1400	0,014
10	120	820	0,057
11	2000	560	0.014
12	320	180	0.057
13	660	240	0.25
14	98	300	0.25
15	1600	400	0.014

Выходные параметры выпрямителей

Схема выпрямителя	Кол-во вентиляей	m	q	$\frac{U_d}{U_2}$	$\frac{I_{в.ср}}{I_d}$	$\frac{U_{обр.м}}{U_d}$	$\frac{S_T}{P_d}$
Однофазная нулевая	2	2	0,67	0,9	1/2	3,14	1,34
Однофазная мостовая	4	2	0,67	0,9	1/2	1,57	1,11
Трехфазная нулевая	3	3	0,25	1,17	1/3	2,09	1,34
Трехфазная мостовая	6	6	0,057	1,35	1/3	1,05	1,05
12-пульсная последовательная	12	12	0,014	2,7	1/3	0,525	1,05
12-пульсная параллельная	12	12	0,014	1,35	1/6	1,05	1,05

Рекомендации по выбору тиристоров.

Отечественные электрические вентили имеют систему обозначений, позволяющую производить их ориентировочный выбор, не имея полных паспортных данных.

Первый элемент обозначения – буквенное обозначение типа (В – диод, Т- тиристор).

Второй элемент – трехзначное число (порядковый номер конструкции, конструктивный признак, исполнение).

Третий элемент – допустимое среднее значение тока, А.

Четвертый элемент – класс вентиля по допустимому обратному напряжению, В.

Примеры обозначений:

1) В 171-200-10 - выпрямительный диод с допустимым прямым током 200 А и допустимым обратным напряжением 1000 В.

2) Т 133- 500-8 - тиристор с допустимым прямым током 500 А и допустимым повторяющимся прямым и обратным напряжением 800 В.

При выполнении данной работы второй элемент обозначения можно опускать. Например: «Выбираю тиристоры Т – 500-8».

Шкала номинальных токов вентиляей: 10, 20, 40, 50, 100, 250, 400, 500, 800, 1000 А.

Классы вентиляей по допустимому напряжению: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15.

Порядок выполнения:

Задано:

- максимальное выпрямленное напряжение $=300$ В;

- максимальный выпрямленный ток $= 2000$ А;

- коэффициент пульсаций $=0,014$.

Обоснование выбора схемы вентиляльного блока.

Заданный коэффициент пульсаций $q_0=0,014$ обеспечивается 12-пульсной схемой выпрямления.

Так как при сравнительно низком напряжении довольно велик выпрямленный ток (2000 А), ток $I_{d0} = 2000$ А, то целесообразно использовать схему с параллельным соединением вентиляльных блоков. Силовой трансформатор должен иметь два комплекта вторичных обмоток: abc - соединенных звездой, и def – соединенных треугольником. Схема соединения первичных обмоток трансформатора – произвольная. Полагаем, что они соединены звездой.

Вентиляльные блоки VS1...VS6 и VS7...VS12 соединяются параллельно через дроссель L_y , который необходим для ограничения уравнительного тока с частотой 12f (600Гц).

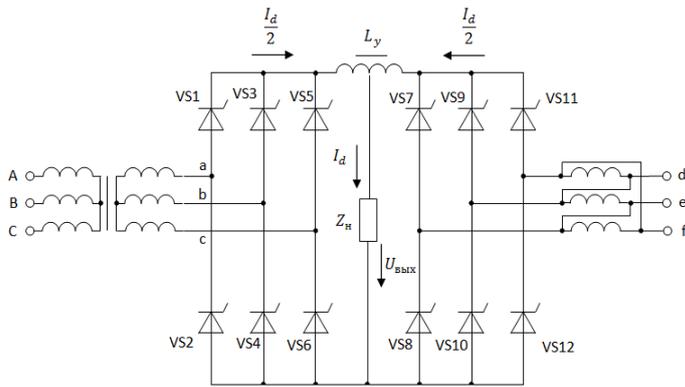


Рис. 1. Схема вентильного блока с силовым трансформатором

Значения выходных параметров такого выпрямителя известны:

$$\frac{U_d}{U_2} = 1,35; \quad \frac{I_{в.ср}}{I_d} = \frac{1}{6}; \quad \frac{U_{обр.м}}{U_d} = 1,05; \quad \frac{S_T}{P_d} = 1,05 \cdot$$

Выбор тиристоров производим по среднему значению прямого тока и амплитуде повторяющегося прямого и обратного напряжения:

$$U_{обр.м} = 1,05 \cdot U_{d0} = 1,05 \cdot 300 = 315B$$

Этим значениям тока и напряжения удовлетворяют тиристоры Т 400 – 4 с максимальным прямым током 400 А и допустимым повторяющимся напряжением 400 В.

Вычислим требуемую габаритную мощность трансформатора:

$$S_T = 1,05 \cdot P_d = 1,05 \cdot U_d \cdot I_d = 1,05 \cdot 300 \cdot 2000 = 630000 B \cdot A = 630 кВА.$$

Поскольку первичные обмотки соединены звездой, каждая из них должна быть рассчитана на фазное напряжение:

$$U_\phi = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220B$$

Входные напряжения вентильных блоков должны быть равными:

$$U_2 = \frac{U_{d0}}{1,35} = \frac{300}{1,35} = 222,2B$$

С учетом возможного снижения напряжения сети на 10 % примем:

$$U_2 = 1,1 \cdot 222,2 = 244B$$

Тогда фазные напряжения вторичных обмоток соединенных звездой (abc) должны быть равны:

$$U_{\phi abc} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{244}{\sqrt{3}} = 141B$$

а обмоток, соединенных треугольником (def)

$$U_{\phi def} = 244B$$

Рассчитанных данных достаточно для проектирования силового трансформатора.

Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по темам 1.1, 2.1 разделов 1,2.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4,5].

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Приведите примеры использования выпрямителей.
2. Каковы отрицательные последствия использования вентильных преобразователей.
3. Каким должен быть порядок поступления управляющих импульсов на тиристоры? Допустима ли их одновременная подача на оба тиристора?

Практическое занятие № 3 Анализ работы блока фазоимпульсного управления для управляемого выпрямителя и симисторного регулятора

Цель работы: ознакомиться с принципами схемной реализации и используемой элементной базой блока фазоимпульсного управления

Тиристоры управляемых выпрямителей открываются при подаче на их управляющие электроды в строго определенные моменты импульсов достаточной амплитуды и продолжительности. Соответственно на блоки фазоимпульсного управления (ФИУ) возлагается выполнение двух основных задач:

- определение моментов времени (фазы), в которые должны быть открыты те или иные тиристоры;
- формирование импульсов с требуемыми параметрами.

Желательная форма управляющих импульсов – прямоугольная, их амплитуда для большинства тиристоров должна быть не менее 5 вольт, а продолжительность 30 ... 50 микросекунд.

Обычно на системы ФИУ возлагаются также функции пуска, отключения и защиты от аварийных режимов, и они являются составной частью систем автоматического управления технологическими процессами.

Это достаточно сложные электронные устройства, отличающиеся между собой принципами схемной реализации и используемой элементной базой.

Для однофазных преобразователей, исследуемых в лабораторных работах № 2 и № 3, используются сравнительно простые блоки ФИУ. Схема такого блока представлена на рис. П 1.1., а диаграммы, поясняющие его работу – на рис. П 1.2.

В схеме блока можно выделить 3 функциональных узла: датчик «нулевых» импульсов, ждущий мультивибратор и формирователь управляющих импульсов.

Момент возникновения управляющего импульса в однофазных преобразователях должен быть привязан к началу полупериода переменного входного напряжения, т.е. к моменту изменения его полезности.

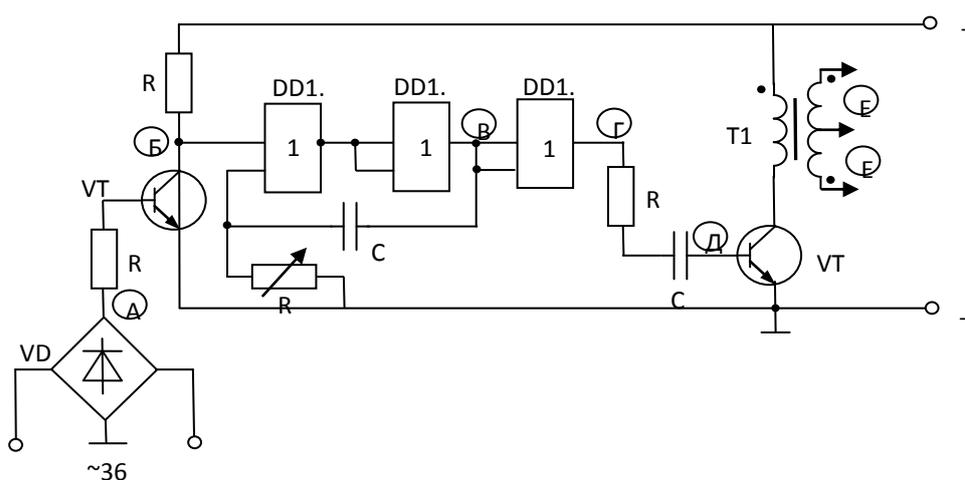


Рис. - Схема блока ФИУ

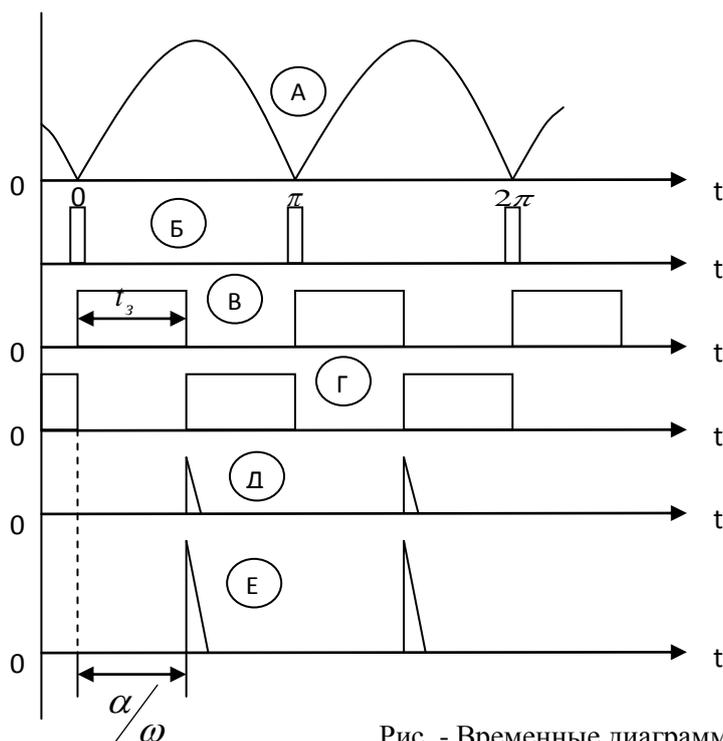


Рис. - Временные диаграммы

Эту функцию выполняет датчик «нулевых» импульсов, который содержит диодную сборку VD1, транзистор VT1 и резисторы R1, R2. Напряжение с выхода VD1 через резистор R1 подается на базу VT1 (диаграмма А на рис. П 1.2.). В результате большую часть полупериода транзистор открыт, и напряжение на его коллекторе близко к нулю. В моменты, близкие к нулевому значению входного напряжения, транзистор оказывается закрытым. Таким образом, напряжение в точке Б имеет форму коротких импульсов, совпадающих с моментами перехода переменного напряжения через нулевые значения.

Эти импульсы производят запуск ждущего мультивибратора, выполненного на элементах DD1.1, DD1.2 логической микросхемы 2 ИЛИ-НЕ. На выходе мультивибратора (точка В) появляется импульс, продолжительность которого равна времени задержки $t_3 = \frac{\sqrt{2}}{2} R_3 C_1$.

В результате инвертирования элементом DD1.3 в точке Г появляется импульс, передний фронт которого отстоит от начала полупериода на время, равное времени задержки t_3 . Через дифференцирующую цепь $R_4 C_2$ импульс подается на базу транзистора VT2 (Д), в результате чего на вторичных обмотках импульсного трансформатора Г формируются требуемые для тиристорных управляющие импульсы (Е).

Угол управления α связан с временем задержки мультивибратора: $\alpha = \omega t_3$,

поэтому его регулирование осуществляется изменением сопротивления резистора R3. Последний выполнен в виде магазина резисторов, смонтированных на галетном переключателе, имеющем 7 положений. Резисторы рассчитаны таким образом, чтобы значения угла α получились равными 0; 30°; 60°; 90°; 120°; 150° и 180°.

Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 3.1 раздела 3.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4].

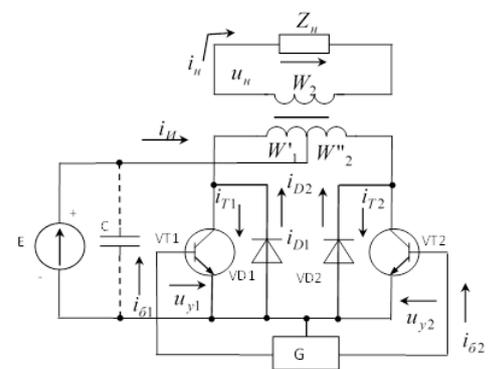
Практическое занятие № 4 Анализ гармонического состава входных токов, искажения кривой напряжения

Цель работы: изучение принципа и режимов работы однофазного транзисторного инвертора для анализа гармонического состава входных токов и искажения кривой напряжения

Порядок выполнения:

1. Произвести коммутацию цепей питания и нагрузки инвертора в соответствии с рис.
2. Подключить к выходу инвертора осциллограф.
3. После проверки соединений преподавателем включить источник питания. Отрегулировав развертку осциллографа, убедиться в наличии выходного напряжения прямоугольной формы с амплитудой порядка 30 вольт.
4. Определить диапазон регулирования частоты инвертирования.
5. Включить нагрузку. Снять осциллограммы выходного напряжения, токов нагрузки и источника при активной и активно-индуктивной нагрузках.
6. Оценить КПД инвертора. Для этого в режиме активной нагрузки измерить и зафиксировать величины напряжения и тока нагрузки (U_n, I_n), а также выходных напряжения и тока (U_{II}, I_{II}).
КПД инвертора будет приблизительно равен

$$\eta = \frac{U_n I_n}{U_{II} I_{II}}$$



Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по темам 4.1 раздела 4.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4].

Практическое занятие № 5 Анализ работы задающего генератора автономного инвертора

Цель работы: изучить типовую схему включения контроллера KP1211EY1 в задающем генераторе автономного инвертора; проанализировать работу задающего генератора; снять временные характеристики задающего генератора

Задающий генератор выполнен на специализированной микросхеме (контроллере) KP1211EY1, предназначенный для управления транзисторными ключами в импульсных источниках питания.

В генераторе использована типовая схема включения контроллера (рис. 1) Выводы FC и FN, предназначенные для различных защит, не используются.

При подаче напряжения питания на выводах Q1 и Q2 возникают прямоугольные противофазные импульсы с обязательной паузой между ними (рис. П 2.1. б).

Частота импульсов определяется постоянной времени заряда конденсатора C1 и при заземленном выводе IN равна

$$f = \frac{\sqrt{2}}{14(R_1 + R_2)C_1} \approx \frac{0,1}{(R_1 + R_2)C_1}$$

Продолжительность паузы равна $\frac{1}{14}$ периода выходной частоты. Напряжения U_{y1} и U_{y2} через резисторы R_3 R_4 подаются на базы (затворы) силовых транзисторов. Частоту инвертора изменяют регулировочным резистором R_1 . Номиналы элементов C_1 , R_1 , R_2 рассчитаны так, что диапазон ее регулирования равен 10 ... 20 кГц.

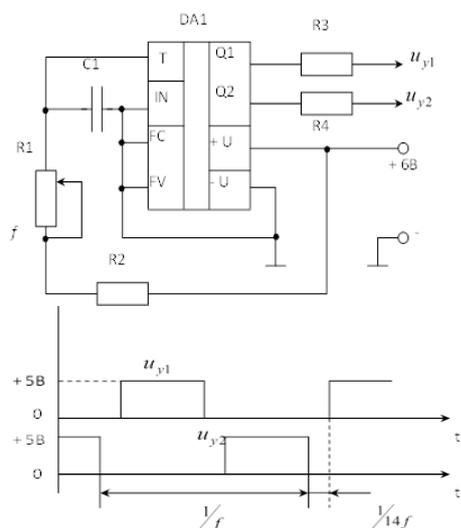


Рис.1. Схема (а) и временные диаграммы (б) задающего генератора Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по темам 5.1 раздела 5.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3,4].

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

- ОС Windows 7 Professional;
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
- Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security;
- OpenOffice;
- LibreOffice;
- Adobe Reader;
- doPDF;
- 7-Zip.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия (Лк, ЛР, ПЗ, КП, КР, кр, СР...)</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР или ПЗ</i>
1	2	3	4
Лк	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Плакаты. Демонстрационные образцы: полупроводниковые диоды, транзисторы, резисторы, тиристоры, конденсаторы, интегральные микросхемы	—
ЛР	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Учебно-лабораторный стенд ЭИСЭС-1-Н-Р Осциллограф С1-77	№№ 1-5
ПЗ	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Плакаты. Демонстрационные образцы: полупроводниковые диоды, транзисторы, резисторы, тиристоры, конденсаторы, интегральные микросхемы	№№ 1-6
СР	ЧЗ 3	Оборудование 15 ПК- CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК -5	Готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности	1. Силовые полупроводниковые вентили	1.1. Виды и методы преобразования электрической энергии. Структура, характеристики и параметры электрических вентилей: выпрямительные диоды, тиристоры, биполярные и полевые силовые транзисторы.	Экзаменационные вопросы №№ 1,2
			1.2. Режимы работы вентилей. Методы охлаждения вентилей и конструкции теплостокков: воздушное, водяное и испарительное охлаждение	Экзаменационные вопросы №№ 3,4
		2. Неуправляемые выпрямители	2.1. Однофазные выпрямители. Трехфазные выпрямители.	Экзаменационные вопросы №№5,6
			3. Управляемые сетевые преобразователи	3.1. Однофазный управляемый выпрямитель: фазоимпульсный способ управления, анализ работы однофазного управляемого выпрямителя при активной и активно-индуктивной нагрузках ,инверторный режим
		3.2. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель: анализ работы при активной и активно-индуктивной нагрузках		Экзаменационные вопросы №№ 10,11,12
			4. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть	4.1. Влияние мощных выпрямителей на питающую сеть: гармонический состав входных токов
		4.2. Искажения кривой напряжения, коэффициент мощности. Основные направления борьбы с отрицательным влиянием преобразователей на		Экзаменационные вопросы №№15,16

			питающую сеть	
		5. Автономные вентильные преобразователи	5.1. Виды автономных преобразователей и их использование. Схемная реализация автономных инверторов. Инверторы на силовых транзисторах и режимы их работы.	Экзаменационные вопросы №№17,18,
			5.2. Импульсные регуляторы мощности. Реверсивные регуляторы и их использование.	Экзаменационные вопросы №№ 19,20

2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ПК-5	Готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности	1. Виды и методы преобразования электрической энергии.	1. Силовые полупроводниковые вентили
			2. Структура, характеристики и параметры электрических вентилях: выпрямительные диоды, тиристоры, биполярные и полевые силовые транзисторы.	
			3. Режимы работы вентилях.	
			4. Методы охлаждения вентилях и конструкции теплоотводов: воздушное, водяное и испарительное охлаждение	
			5. Однофазные выпрямители	2. Неуправляемые выпрямители
			6. Трехфазные выпрямители.	
			7. Однофазный управляемый выпрямитель.	3. Управляемые сетевые преобразователи
			8. Однофазный управляемый выпрямитель: фазоимпульсный способ управления.	
			9. Анализ работы однофазного управляемого выпрямителя при активной нагрузке.	
			10. Анализ работы однофазного управляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке	
			11. Инверторный режим работы управляемого выпрямителя.	
			12. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель	
			13. Влияние мощных выпрямителей на питающую сеть	
			14. Гармонический состав входных токов, искажение кривой напряжения	
			15. Коэффициент мощности	
16. Основные направления борьбы с отрицательным влиянием преобразователей на питающую сеть	5. Автономные вентильные преобразователи			
17. Виды автономных преобразователей и их использование. Схемная реализация автономных инверторов.				
18. Инверторы на силовых транзисторах и режимы их работы.				
19. Импульсные регуляторы мощности.				

			20. Реверсивные регуляторы и их использование.	
--	--	--	---	--

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
Знать <i>ПК-5:</i> <ul style="list-style-type: none"> - классификацию, назначение, основные схемотехнические решения, принцип действия устройств силовых полупроводниковых приборов; - основные уравнения процессов, схемы замещения и характеристики электронных преобразователей электрической энергии; - алгоритмы управления электронными преобразователями электрической энергии; Уметь <i>ПК-5:</i> <ul style="list-style-type: none"> - использовать полученные знания при решении практических задач по проектированию, испытаниям и эксплуатации устройств силовой электроники; - ставить и решать задачи моделирования силовых электронных устройств; Владеть <i>ПК-5:</i> <ul style="list-style-type: none"> - навыками элементарных расчетов и испытаний силовых электронных преобразователей 	отлично	Оценка «отлично» выставляется в случае, если обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал и демонстрирует: <ul style="list-style-type: none"> - всестороннее знание программного материала; - умение правильного применения основных положений программного материала; - владеет всеми навыками, полученными в ходе изучения программного материала.
	хорошо	Оценка «хорошо» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует: <ul style="list-style-type: none"> -недостаточно полное знание программного материала; - применение с несущественными ошибками основных положений программного материала
	удовлетворительно	Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует частичное знание программного материала; неоднократно допускал ошибки в ответе
	неудовлетворительно	Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, если уровень владения программным материалом не отвечает требованиям; все вышеуказанные разделы не усвоены.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Полупроводниковая техника в электроэнергетике направлена на ознакомление с силовой полупроводниковой техникой; на получение теоретических знаний и практических навыков по определению параметров силового электронного оборудования для их дальнейшего использования в практической деятельности.

Изучение дисциплины Электротехника и электроника предусматривает:

- лекции;
- лабораторные работы;
- практические занятия;
- самостоятельную работу;
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 Силовые полупроводниковые вентили студенты должны уяснить виды и методы преобразования электрической энергии, знать характеристики и параметры электрических вентилях, способы охлаждения вентилях.

В ходе освоения раздела 2 Неуправляемые выпрямители студенты должны знать все существующие схемы однофазных и трехфазных выпрямителей, знать выходные характеристики этих схем и уметь выбирать их для практического применения.

В ходе освоения раздела 3 Управляемые сетевые преобразователи студенты должны четко уяснить фазоимпульсный способ управления и уметь анализировать режимы работы при активной и активно-индуктивных режимах работы управляемых выпрямителей.

В ходе освоения раздела 4 Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть студенты должны знать гармонический состав входных токов, а также знать основные направления борьбы с отрицательным влиянием преобразователей на питающую сеть.

В ходе освоения раздела 5 Автономные вентильные преобразователи студенты должны знать схемную реализацию автономных инверторов, инверторов на силовых транзисторах и режимы их работы, а также понимать принцип работы импульсных и реверсивных регуляторов мощности.

Необходимо овладеть навыками и умениями применения изученных методов для применения в производственной и научной сферах деятельности, применения и реализации тех или иных проектов в конкретных ситуациях.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется на первом этапе обратить внимание на основные законы физики, математический понятийный аппарат.

Овладение ключевыми понятиями является основой для успешного усвоения работы всех функциональных устройств полупроводниковой техники.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Виды и методы преобразования электрической энергии.
2. Структура, характеристики и параметры электрических вентилей: выпрямительные диоды, тиристоры, биполярные и полевые силовые транзисторы.
3. Режимы работы вентилей.
4. Методы охлаждения вентилей и конструкции теплостоков: воздушное, водяное и испарительное охлаждение
5. Однофазные выпрямители
6. Трехфазные выпрямители.
7. Однофазный управляемый выпрямитель.
8. Однофазный управляемый выпрямитель: фазоимпульсный способ управления.
9. Анализ работы однофазного управляемого выпрямителя при активной нагрузке.
10. Анализ работы однофазного управляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке
11. Инверторный режим работы управляемого выпрямителя.
12. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель
13. Влияние мощных выпрямителей на питающую сеть
14. Гармонический состав входных токов, искажение кривой напряжения
15. Коэффициент мощности
16. Основные направления борьбы с отрицательным влиянием преобразователей на питающую сеть
17. Виды автономных преобразователей и их использование. Схемная реализация автономных инверторов.
18. Инверторы на силовых транзисторах и режимы их работы.
19. Импульсные регуляторы мощности.
20. Реверсивные регуляторы и их использование.

В процессе проведения практических занятий, лабораторных работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления о полупроводниковой технике.

Самостоятельную работу необходимо начинать с изучения теоретического материала.

В процессе консультации с преподавателем необходимо выяснить все непонятные, вызывающие сомнения вопросы.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (в виде лекции-дискуссии, лекции-беседы, лабораторных и практических занятий с разбором конкретных ситуаций, просмотр и обсуждение видеоматериалов) в сочетании с внеаудиторной работой.

АННОТАЦИЯ
рабочей программы дисциплины
Полупроводниковая техника в электроэнергетике

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является: формирование у обучающихся теоретической и практической базы по изучению характеристик и принципа действия силовых электронных приборов, классификации, принципам действия и основным областями применения устройств силовой электроники, что позволит им успешно решать теоретические и практические задачи в их профессиональной деятельности, связанной с проектированием, испытаниями и эксплуатацией устройств силовой электроники.

Задачей изучения дисциплины является: приобретение необходимых знаний и умений для определения параметров оборудования, используемого в электроэнергетике.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк 18 ч; ЛР 18 ч; ПЗ 36 ч; СР 72 ч.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 180 часов, 5 зачетных единиц

2.2 Основные разделы дисциплины:

- 1 - Силовые полупроводниковые вентили
- 2 - Неуправляемые выпрямители
- 3 - Управляемые сетевые преобразователи
- 4 - Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть
- 5 - Автономные вентильные преобразователи

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ПК -5 Готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности

4. Вид промежуточной аттестации: экзамен

**Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год**

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры № _____ от «__» _____ 20__ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

(Ф.И.О.)

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата) от «3» сентября 2015 г. №955

для набора 2015 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» ноября 2015г. №701, заочной формы обучения от «12» ноября 2015г. №701

для набора 2016 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «6» июня 2016г. №429, заочной формы обучения от «6» июня 2016г. №429 для заочной (ускоренной) формы обучения от «6» июня 2016г. №429

Программу составил:

Астапенко Н.А., ст. преподаватель _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «__» __декабря__ 2018 г., протокол №_____

Заведующий кафедрой ЭиЭ _____ Ю.Н. Булатов

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой _____ Ю.Н. Булатов

Директор библиотеки _____ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией ФЭиА

от «__» __декабря__ 2018 г., протокол №_____

Председатель методической комиссии ФЭиА _____ А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
учебно-методического управления _____ Г.П. Нежевец

Регистрационный №_____