

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 201\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ЭЛЕКТРОНИКА**

Б1.В.13

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Электроснабжение**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

**СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

Стр.

<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ</b>	<b>4</b>
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....	5
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>5</b>
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....	7
4.3 Лабораторные работы.....	44
4.4 Семинары / практические занятия.....	44
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	44
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>45</b>
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>	<b>45</b>
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>45</b>
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>46</b>
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>46</b>
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ семинаров / практических работ .....	46
9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата .....	48
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>49</b>
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>49</b>
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>	<b>50</b>
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>	<b>58</b>
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>	<b>59</b>
<b>Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....</b>	<b>60</b>

# 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 знаний элементной базы электроники, применяемой в преобразовательных устройствах для питания электроприводов, электротехнологических установок и для возбуждения синхронных машин. Изучение принципов действия, характеристик, параметров и особенностей устройства важнейших полупроводниковых и оптоэлектронных приборов.

## Задачи дисциплины

Ознакомление обучающихся с современным уровнем развития физических основ полупроводниковой электроники с учетом использования перспективных полупроводниковых материалов; изучение физических процессов образования свободных носителей заряда в полупроводниках; изучение физических процессов, происходящих на границе двух полупроводников, на границе металл-полупроводник, на границе диэлектрик - полупроводник; изучение электрических параметров и характеристик электронных устройств.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-2	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	<p><b>знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физические процессы, лежащие в основе принципов действия полупроводниковых и оптоэлектронных приборов;</li> </ul> <p><b>уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– определять дифференциальные параметры электронных приборов по их статическим характеристикам;</li> </ul> <p><b>владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных приборов и их компьютерного исследования по электрическим моделям.</li> </ul>
ПК-2	Способность обрабатывать результаты экспериментов	<p><b>знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– виды и средства измерений для определения статических и динамических параметров электронных приборов;</li> </ul> <p><b>уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применять средства измерений для определения параметров электронных приборов;</li> <li>– анализировать и применять полученную информацию</li> </ul> <p><b>владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– методиками выполнения измерений для определения статических и динамических</li> </ul>

		параметров электронных приборов; – методами математического анализа для статистической обработки результатов измерений
--	--	---

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.06 Электроника относится к вариативной части.

Дисциплина Электроника базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: Физика, Химия, Теоретические основы электротехники.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Электроника представляет основу для изучения таких дисциплин, как: Электрические и электронные аппараты, Полупроводниковая техника в электроэнергетике, Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения, Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, Электрические машины.

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	Семинары Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Заочная	1	-	108	10	4	6	-	94	кр	зачет

### 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
			1
1	2	3	4
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	10	4	10
Лекции (Лк)	4	4	4
Лабораторные работы (ЛР)	6	-	6
Контрольная работа	+	-	+

Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	94	-	94
Подготовка к лабораторным работам	30	-	30
Подготовка к зачету	34	-	34
Выполнение контрольной работы	30	-	30
<b>III. Промежуточная аттестация зачет</b>	4	-	4
Общая трудоемкость дисциплины, час.	108	-	108
зач. ед.	3	-	3

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий для заочной 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	
1	2	3	4	5	6
<b>1.</b>	<b>Введение</b>	<b>2,1</b>	<b>0,1</b>	-	<b>2</b>
1.1.	Роль электроники в современном мире. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электронно-дырочный переход и его свойства.	2,1	0,1	-	2
<b>2.</b>	<b>Полупроводниковые приборы</b>	<b>25,1</b>	<b>1,1</b>	<b>2</b>	<b>22</b>
2.1.	Полупроводниковые резисторы	2,1	0,1	-	2
2.2.	Выпрямительные диоды	2,6	0,1	0,5	2
2.3.	Импульсные диоды	2,1	0,1	-	2
2.4.	Туннельные диоды	2,1	0,1	-	2
2.5.	Обращенные диоды	2,1	0,1	-	2
2.6.	Диоды Шоттки	2,6	0,1	0,5	2
2.7.	Стабилитроны	2,6	0,1	0,5	2
2.8.	Варикапы	2,1	0,1	-	2
2.9.	Светодиоды	2,6	0,1	0,5	2
2.10.	Фотодиоды	2,1	0,1	-	2
2.11.	Тиристоры	2,1	0,1	-	2
<b>3.</b>	<b>Биполярные транзисторы</b>	<b>11,3</b>	<b>0,3</b>	<b>2</b>	<b>9</b>
3.1.	Структура и типы биполярных транзисторов	3,1	0,1	-	3
3.2.	Режимы работы биполярных транзисторов	5,1	0,1	2	3
3.3.	Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	3,1	0,1	-	3
<b>4</b>	<b>Полевые транзисторы</b>	<b>9,3</b>	<b>0,3</b>	-	<b>9</b>

4.1.	Структура и типы полевых транзисторов	3,1	0,1	-	3
4.2.	Рабочий процесс полевых транзисторов	3,1	0,1	-	3
4.3.	МДП-транзисторы	3,1	0,1	-	3
<b>5.</b>	<b>Преобразование электрической энергии</b>	<b>56,2</b>	<b>4,2</b>	<b>-</b>	<b>52</b>
5.1.	Виды преобразования. Статическое преобразование	2,1	0,1	-	2
5.2.	Неуправляемые выпрямители	2,1	0,1	-	2
5.3.	Трехфазный нулевой выпрямитель	2,2	0,2	-	2
5.4.	Трехфазный мостовой выпрямитель	2,2	0,2	-	2
5.5.	12-ти пульсные выпрямители	2,2	0,2	-	2
5.6.	Сравнительная характеристика схем выпрямителей	2,2	0,2	-	2
5.7.	Коммутация вентиля и внешняя характеристика выпрямителей	2,2	0,2	-	2
5.8.	Управляемые выпрямители	2,2	0,2	-	2
5.9.	Инверторный режим однофазного управляемого выпрямителя	2,2	0,2	-	2
5.10.	Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель	2,2	0,2	-	2
5.11.	Реверсивные преобразователи	2,2	0,2	-	2
5.12.	Непосредственные преобразователи частоты	2,2	0,2	-	2
5.13.	Вентильные регуляторы мощности	2,2	0,2	-	2
5.14.	Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть	2,2	0,2	-	2
5.15.	Автономные вентильные преобразователи	3,2	0,2	-	3
5.16.	Способы искусственной коммутации однооперационных тиристоров	3,2	0,2	-	3
5.17.	Принципы схемной реализации автономных инверторов	3,2	0,2	-	3
5.18.	Транзисторные инверторы	3,2	0,2	-	3
5.19.	Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах	3,2	0,2	-	3
5.20.	Резонансные инверторы	3,2	0,2	-	3
5.21.	Улучшение формы выходного напряжения автономных преобразователей	3,2	0,2	-	3
5.22.	Импульсные регуляторы постоянного тока	3,2	0,2	-	3
	<b>ИТОГО</b>	<b>104</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>94</b>

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### Раздел 1. Введение

Тема 1.1. Роль электроники в современном мире. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электронно-дырочный переход и его свойства.

Роль электроники в современном мире

Сложно спорить с тем, что от тех вещей, которые нас окружают, зависит наше настроение. Это касается и электроники. Даже обычный монитор компьютера может стать поводом для огорчения или радости. Сегодня с компьютером знакомы все, даже малыши. Одни его используют как один из инструментов для зарабатывания денег, вторые — для игр, третьи держат «руку на пульсе» и тщательно следят за обстановкой в мире. Когда ломается любая его деталь наступает паника: кажется, что упускаешь что-то важное. Есть люди, которые самым настоящим образом впадают в депрессию или апатию. Что может поспособствовать тому, чтобы техника не ломалась? Ее качественное исполнение. Именно поэтому многие люди боятся покупать вещи неизвестных компаний, отдавая предпочтение тем, которые существуют уже несколько десятилетий.

Например, если в магазине вы увидите монитор Samsung или другой, менее известной марки, вы наверняка отдадите предпочтение первому варианту. Эта компания все время на слуху, постоянно пополняет ассортимент выпущенной продукции. Мониторы этой марки отличаются своей эргономичностью, легко меняют наклон, высоту экрана. Вся док-станция у них находится в самой подставке, что обеспечивает возможность использовать расширенные технические возможности устройства.

Еще одно современное устройство, которое есть практически в любой квартире — музыкальный центр Samsung. Как приятно утром просыпаться не под «пение» будильника, а под звуки классической музыки. Многие люди, привыкшие к нему, не понимают, как можно сидеть в тишине. Современные устройства позволяют не просто читать разные форматы аудиодисков, но и видео, прослушивать радио. Аппаратуру можно даже подключить к компьютеру или телевизору. Наличие дополнительных возможностей (караоке, USB-портов) позволяют максимально эффективно ее использовать.

Для работающих людей важно, чтобы вся оргтехника работала исправно. Сегодня, когда особенно популярными стали МФУ Samsung, без них уже сложно представить рабочий день любого офисного работника. С помощью многофункциональных устройств можно решать сразу несколько задач.

Современная электроника и техника была изобретена для того, чтобы облегчить жизнь обычному человеку. Но мы настолько к ней привыкли, что любая даже небольшая поломка приводит к появлению стресса. Компания Samsung функционирует с 1936 года и зарекомендовала себя как надежный производитель разного товара.

### **Собственная и примесная проводимости полупроводников**

Полупроводники — это вещества, удельное сопротивление которых убывает с повышением температуры, наличием примесей, изменением освещенности. По этим свойствам они разительно отличаются от металлов. Обычно к полупроводникам относятся кристаллы, в которых для освобождения электрона требуется энергия не более 1,5—2 эВ. Типичными полупроводниками являются кристаллы германия и кремния, в которых атомы объединены ковалентной связью. Природа этой связи позволяет объяснить указанные выше характерные свойства. При нагревании полупроводников их атомы ионизируются. Освободившиеся электроны не могут быть захвачены соседними атомами, так как все их валентные связи насыщены. Свободные электроны под действием внешнего электрического поля могут перемещаться в кристалле, создавая электронный ток проводимости. Удаление электрона с внешней оболочки одного из атомов в кристаллической решетке приводит к образованию положительного иона. Этот ион может нейтрализоваться, захватив электрон. Далее, в результате переходов электронов от атомов к положительным ионам происходит процесс хаотического перемещения в кристалле места с недостающим электроном — «дырки». Внешне этот процесс хаотического перемещения воспринимается как перемещение положительного заряда. При помещении кристалла в электрическое поле возникает упорядоченное движение «дырок» — дырочный ток проводимости.

В идеальном кристалле ток создается равным количеством электронов и «дырок». Такой тип проводимости называют собственной проводимостью полупроводников. При повышении температуры (или освещенности) собственная проводимость проводников увеличивается.

На проводимость полупроводников большое влияние оказывают примеси. Примеси бывают донорные и акцепторные. Допорная примесь — это примесь с большей валентностью. При добавлении донорной примеси в полупроводнике образуются лишние электроны. Проводимость станет электронной, а полупроводник называют полупроводником n-типа. Например, для кремния с валентностью  $n = 4$  донорной примесью является мышьяк с валентностью  $n = 5$ . Каждый атом примеси мышьяка приведет к образованию одного электрона проводимости.

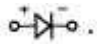
Акцепторная примесь — это примесь с меньшей валентностью. При добавлении такой примеси в полупроводнике образуется лишнее количество «дырок». Проводимость будет «дырочной», а полупроводник называют полупроводником p-типа. Например, для кремния акцепторной примесью является индий с валентностью  $n = 3$ . Каждый атом индия приведет к образованию лишней «дырки».

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на свойствах p—n-перехода. При приведении в контакт двух полупроводниковых приборов p-типа и n-типа в месте контакта начинается диффузия электронов из n-области в p-область, а «дырок» — наоборот, из p- в n-область. Этот процесс будет

не бесконечным во времени, так как образуется запирающий слой, который будет препятствовать дальнейшей диффузии электронов и «дырок».

p—n-Контакт полупроводников, подобно вакуумному диоду, обладает односторонней проводимостью: если к p-области подключить «+» источника тока, а к n-области «-» источника тока, то запирающий слой разрушится и p—n-контакт будет проводить ток, электроны из p-области пойдут в n-область, а «дырки» из n-области

В первом случае ток не равен нулю, во втором — ток равен нулю. Это означает, что если к p-области подключить «-» источника, а к n-области — «+» источника тока, то запирающий слой расширится и тока не

будет. Полупроводниковый диод состоит из контакта двух полупроводников p- и n-типа . Полупроводниковые диоды имеют: небольшие размеры и массу, длительный срок службы, высокую механическую прочность, высокий коэффициент полезного действия, их недостатком является зависимость сопротивления от температуры.

В радиоэлектронике применяется также еще один полупроводниковый прибор: транзистор, который был изобретен в 1948 г. В основе триода лежит не один, а два p—n-перехода. Основное применение транзистора — это использование его в качестве усилителя слабых сигналов по току и напряжению, а полупроводниковый диод применяется в качестве выпрямителя тока. После открытия транзистора наступил качественно новый этап развития электроники — микроэлектроники, поднявший на качественно иную ступень развитие электронной техники, систем связи, автоматики. Микроэлектроника занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения. Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных компонентов — транзисторов, диодов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе. В результате этого процесса на одном кристалле одновременно создается несколько тысяч транзисторов, конденсаторов, резисторов и диодов, до 3500 элементов. Размеры отдельных элементов микросхемы могут быть 2—5 мкм, погрешность при их нанесении не должна превышать 0,2 мкм. Микропроцессор современной ЭВМ, размещенный на кристалле кремния размером 6х6 мм, содержит несколько десятков или даже сотен тысяч транзисторов. Однако в технике применяются также полупроводниковые приборы без p—n-перехода. Например, терморезисторы (для измерения температуры), фоторезисторы (в фотореле, аварийных выключателях, в дистанционных управлениях телевизорами и видеомагнитофонами).

### Электронно-дырочный переход и его свойства

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта твердых тел. При этом преимущественно используются контакты: полупроводник-полупроводник, металл-полупроводник, металл-диэлектрик-полупроводник. Если переход создается между полупроводниками n-типа и p-типа, то его называют электронно-дырочным или p-n-переходом. Такой переход создается в одном кристалле полупроводника с использованием сложных технологических операций. Возможны различные исполнения p-n-перехода, отличающиеся: резкостью и уровнем изменения концентраций доноров и акцепторов на границе перехода, размером и формой самого перехода, а также наличием каких-либо неоднородностей в переходе. Все эти факторы оказывают существенное влияние на свойства p-n-перехода и используются для придания реальным полупроводниковым приборам тех или иных характеристик.

В общем случае поведение реального p-n-перехода в состоянии покоя и при подключении внешнего напряжения различного уровня и полярности определяется множеством физических процессов, протекающих в полупроводнике. К ним относятся: термогенерация носителей, поверхностные утечки тока, падение напряжения на сопротивлении нейтральных областей полупроводника, возможности теплового и электрического пробоев и т.д. Однако определяющими являются описанные выше процессы генерации, рекомбинации, диффузии и дрейфа носителей зарядов в полупроводнике.

## Раздел 2. Полупроводниковые приборы

### Тема 2.1. Полупроводниковые резисторы

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час)

#### Полупроводниковые резисторы

ПП резистором является ПП прибор с двумя выводами, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводника от приложенного напряжения ( $R = f(U)$ ).

В ПП резисторах применяют ПП (чаще кремний  $Si$ ), равномерно легированный примесями (легировать — соединять). В зависимости от типа примеси удается получить различные зависимости  $R$  от  $U$ .

### Тема 2.2. Выпрямительные диоды



### 1. Общие сведения

Диод – это полупроводниковый прибор, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный. Однако, это далеко не полная область применения диодов: они широко используются в цепях управления и коммутации, в схемах умножения напряжения, во всех силовых цепях, где не предъявляются жестких требований к временным и частотным параметрам электрического сигнала.

Конструкция диодов представляет собой одну пластину кристалла полупроводника, в объеме которой созданы две области разной проводимости, поэтому такие диоды называют плоскостными.

Технология изготовления таких диодов заключается в следующем: на поверхность кристалла полупроводника с электропроводностью n-типа расплавляют алюминий, индий или бор, а на поверхность кристалла с электропроводностью p-типа расплавляют фосфор. Под действием высокой температуры эти вещества крепко сплавляются с кристаллом полупроводника. При этом атомы этих веществ проникают (диффундируют) в толщу кристалла, образуя в нем область с преобладанием электронной или дырочной электропроводностью. Таким образом получается полупроводниковый прибор с двумя областями различного типа электропроводности — а между ними p-n переход. Большинство распространенных плоскостных кремниевых и германиевых диодов изготавливают именно таким способом.

Для защиты от внешних воздействий и обеспечения надежного теплоотвода кристалл с p-n переходом монтируют в корпусе.

Диоды малой мощности изготавливают в пластмассовом корпусе с гибкими внешними выводами, диоды средней мощности – в металлокерамическом корпусе с жесткими внешними выводами, а диоды большой мощности – в металлокерамическом или металлокерамическом корпусе, т.е. со стеклянным или керамическим изолятором.

Условно-графические обозначения выпрямительных диодов



У диода есть два вывода (электрода) анод и катод. Анод присоединён к p слою, катод к n слою. Когда на анод подаётся плюс, а на катод минус (прямое включение диода) диод пропускает ток. Если на анод подать минус, а на катод плюс (обратное включение диода) тока через диод не будет.

### 2. Классификация диодов.

В зависимости от значения максимально допустимого прямого тока выпрямительные диоды разделяются на диоды малой, средней и большой мощности:

малой мощности рассчитаны для выпрямления прямого тока до 300mA;  
средней мощности – от 300mA до 10A;  
большой мощности — более 10A.

### 3. Параметры диодов

Основные параметры диодов - это прямой ток диода ( $I_{пр}$ ) и максимальное обратное напряжение диода ( $U_{обр}$ ). Именно их надо знать, если стоит задача разработать новый выпрямитель для источника питания.

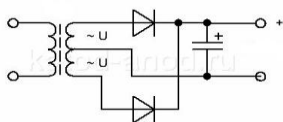
Прямой ток диода можно легко вычислить, если известен общий ток, который будет потреблять нагрузка нового блока питания. Затем, для обеспечения надёжности, необходимо несколько увеличить это значение и получится ток, на который надо подобрать диод для выпрямителя. К примеру, блок питания должен выдерживать ток в 800 мА. Поэтому мы выбираем диод, у которого прямой ток диода равен 1А.

Максимальное обратное напряжение диода - это параметр, который зависит не только от значения переменного напряжения на входе, но и от типа выпрямителя. Для объяснения этого утверждения, рассмотрим следующие рисунки. На них показаны все основные схемы выпрямителей.



Рис. 1

Напряжение на выходе выпрямителя (на конденсаторе) равно действующему напряжению вторичной обмотки трансформатора, умноженному на  $\sqrt{2}$ . В однополупериодном выпрямителе (рис. 1), когда напряжение на аноде диода имеет положительный потенциал относительно земли, конденсатор фильтра заряжается до напряжения, превышающего действующее напряжение на входе выпрямителя в 1.4 раза. Во время следующего полупериода напряжение на аноде диода отрицательно относительно земли и достигает амплитудного значения, а на катоде - положительно относительно земли и имеет такое же значение. В этот полупериод к диоду приложено обратное напряжение, которое получается благодаря последовательному соединению обмотки трансформатора и заряженного конденсатора фильтра. Т.е. обратное напряжение диода должно быть не меньше двойного амплитудного напряжения вторички трансформатора или в 2.8 раза выше его действующего значения. При расчёте таких выпрямителей надо выбирать диоды с максимальным обратным напряжением в 3 раза превышающим действующее значение переменного напряжения.



#### 4. Кремниевые и германиевые диоды

По типу применяемого материала они делятся на германиевые и кремниевые, но, на сегодняшний день наибольшее применение получили кремниевые выпрямительные диоды ввиду своих физических свойств.

Кремниевые диоды, по сравнению с германиевыми, имеют во много раз меньшие обратные токи при одинаковом напряжении, что позволяет получать диоды с очень высокой величиной допустимого обратного напряжения, которое может достигать 1000 – 1500В, тогда как у германиевых диодов оно находится в пределах 100 – 400В.

Работоспособность кремниевых диодов сохраняется при температурах от  $-60$  до  $+(125 - 150)^{\circ}\text{C}$ , а германиевых – лишь от  $-60$  до  $+(70 - 85)^{\circ}\text{C}$ . Это связано с тем, что при температурах выше  $85^{\circ}\text{C}$  образование электронно-дырочных пар становится столь значительным, что происходит резкое увеличение обратного тока и эффективность работы выпрямителя падает.

### Тема 2.3. Импульсные диоды

Импульсный диод — диод, предназначенный для работы в высокочастотных импульсных схемах.

Обычно представляет собой полупроводниковый диод с р-п-переходом, оптимизированный по собственной ёмкости, времени восстановления обратного сопротивления (рассасывания неосновных носителей).

Для уменьшения собственной ёмкости вынужденно уменьшают площадь р-п-перехода и для снижения времени жизни неосновных носителей применяют сильно легированные полупроводниковые материалы (кремний часто легируют золотом для снижения времени обратного восстановления), поэтому импульсные диоды имеют невысокие предельные импульсные токи (до сотен мА) и небольшие предельные обратные напряжения (до десятков вольт). Также выпускаются импульсные диоды с барьером Шоттки.

Типичная барьерная ёмкость импульсного диода обычно менее 1 пФ и время восстановления обратного сопротивления (время жизни неосновных носителей) обычно не более 4 нс).

Принцип действия импульсного диода не отличается от обычного выпрямительного полупроводникового диода с р-п-переходом, при приложении прямого напряжения диод хорошо проводит электрический ток. При смене полярности диод запирается. Запирание происходит не сразу, сначала происходит резкое увеличение обратного тока, затем, после рассасывания неосновных носителей, восстанавливается высокое сопротивление р-п-перехода и диод запирается.

Применение

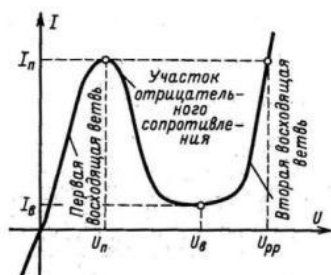
Импульсные диоды применяют в сверхбыстродействующих импульсных ключевых схемах, например, в логических схемах.

Также их применяют в формирователях субнаносекундных импульсов, например, при формировании строб-импульсов в стробоскопических осциллографах, так называемые диоды с быстрым обратным восстановлением (импульсные диоды с накоплением заряда). Принцип формирования субнаносекундных импульсов основан на том, что восстановление обратного сопротивления после рассасывания неосновных носителей происходит за очень короткое время, существенно короче, чем длительность фронта смены полярности, таким образом, затянутый фронт укорачивается<sup>[1]</sup>

### Тема 2.4. Туннельные диоды

Туннельный диод - имеющий на вольт-амперной характеристике с отрицательным дифференциальным сопротивлением. При низких напряжениях (доли вольт) за счет туннельного эффекта ток через диод сначала растет, затем падает и при дальнейшем повышении напряжения (единицы вольт) ток снова растет, как и у обычного диода.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода



Параметры туннельного диода:

$I_p$  - ток пика,

$U_p$  - напряжение пика,

$I_{вп.}$  - ток впадины,

$U_{вп.}$  - напряжение впадины,

$U_{пр}$  - напряжение раствора - прямое напряжение, большее  $U_p$ , при котором ток равен  $I_p$ ,

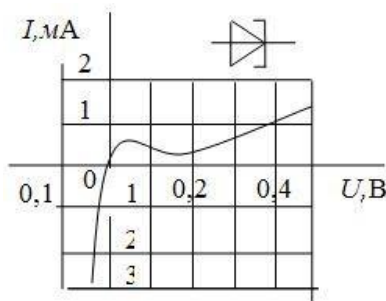
$C_d$  - емкость диода (обычно при напряжении  $U_{вп.}$ ) - характеризует частотные свойства диода

Туннельные диоды используют в СВЧ усилителях, генераторах и переключающих устройствах на частотах до неск. гигагерц.

## Тема 2.5. Обращенные диоды

Обращенный диод при малых напряжениях (десятки мВ) имеет проводимость в обратном направлении больше, чем в прямом. При напряжениях в несколько вольт прямая характеристика обращенного диода не отличается от характеристики обычного. Обращенные диоды используются для выпрямления малых переменных напряжений и детектирования сигналов с частотами до сотен МГц. Включаются в цепь диоды в обратном направлении.

*Вольт-амперная характеристика обращенного диода*



Параметры обращенного диода:

$U_{пр}$  - прямое напряжение при заданном токе

$U_{обр}$  - обратное напряжение при заданном токе

$I_{пр. макс}$  и  $I_{обр. макс}$  - максимальный прямой и обратный ток

$C_d$  - емкость диода - характеризует частотные свойства диода.

## Тема 2.6. Диоды Шоттки

Диод Шоттки — полупроводниковый диод с малым падением напряжения при прямом включении. Назван в честь немецкого физика Вальтера Шоттки. В специальной литературе часто используется более полное название — Диод с барьером Шоттки (ДШБ)

В диодах Шоттки в качестве барьера Шоттки используется переход металл-полупроводник, в отличие от обычных диодов, где используется p-n переход. Переход металл-полупроводник обладает рядом особенных свойств (отличных от свойств полупроводникового p-n перехода). К ним относятся: пониженное падение напряжения при прямом включении, высокий ток утечки, очень маленький заряд обратного восстановления. Последнее объясняется тем, что по сравнению с обычным p-n переходом у таких диодов отсутствует диффузия, связанная с инжекцией неосновных носителей, т.е. они работают только на основных носителях, а их быстродействие определяется только барьерной емкостью.

Диоды Шоттки изготавливаются обычно на основе кремния (Si) или арсенида галлия (GaAs), реже — на основе германия (Ge). Выбор металла для контакта с полупроводником определяет многие параметры диода Шоттки. В первую очередь — это величина контактной разности потенциалов, образующейся на границе металл-полупроводник. При использовании диода Шоттки в качестве детектора она определяет его чувствительность, а при использовании в смесителях — необходимую мощность гетеродина. Поэтому чаще всего используются металлы Ag, Au, Pt, Pd, W, которые наносятся на полупроводник и дают величину потенциального барьера 0,2...0,9 эВ.

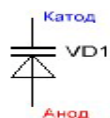
Допустимое обратное напряжение выпускаемых диодов Шоттки ограничено 1200 вольт (CSD05120 и аналоги), на практике большинство диодов Шоттки применяется в низковольтных цепях при обратном напряжении порядка единиц и нескольких десятков вольт.

Свойства диодов Шоттки

Достоинства



Цифровая техника избавила нас от этого, а взамен дала возможность управлять и настраивать устройства посредством кнопок и экранного меню. Всё это было бы невозможно без электронных компонентов, управляемых напряжением. К одному из таких электронных компонентов можно отнести варикап. Варикап - это полупроводниковый диод, который изменяет свою ёмкость пропорционально величине приложенного обратного напряжения от единиц до сотен пикофард. Так изображается варикап на принципиальной схеме.



Как видим, его изображение очень напоминает условное изображение полупроводникового диода. И это не случайно. Дело в том, что р-п переход любого диода обладает так называемой барьерной ёмкостью. Сама по себе барьерная ёмкость перехода для диода нежелательна. Но и этот недостаток смогли использовать. В результате был разработан варикап - некий гибрид диода и переменного конденсатора, ёмкость которого можно менять с помощью напряжения.

Как известно, при подаче обратного напряжения на диод, он закрыт и не пропускает электрический ток. В таком случае р-п переход выполняет роль своеобразного изолятора, толщина которого зависит от величины обратного напряжения ( $U_{обр}$ ). Меняя величину обратного напряжения ( $U_{обр}$ ), мы меняем толщину перехода – этого самого изолятора. А поскольку электрическая ёмкость  $C$  зависит от площади обкладок, в данном случае площади р-п перехода, и расстояния между обкладками – толщины перехода, то появляется возможность менять ёмкость р-п перехода с помощью напряжения. Это ещё называют электронной настройкой.

На варикап прикладывают обратное напряжение, что изменяет величину ёмкости барьера р-п перехода.

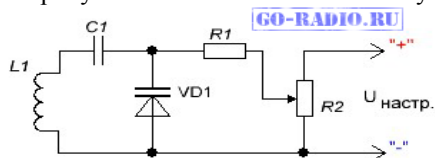
Отметим, что барьерная ёмкость есть у всех полупроводниковых диодов, и она уменьшается по мере увеличения обратного напряжения на диоде. Но вот у варикапов эта ёмкость может меняться в достаточно широких пределах, в 3 – 5 раз и более.

#### Положительные качества варикапа.

У варикапов очень маленькие потери электрической энергии и малый ТКЕ (температурный коэффициент ёмкости) поэтому их с успехом применяют даже на очень высоких частотах, где ёмкость конденсатора измеряется долями пикофард. Это очень важно, так как если бы ёмкость варикапа была нестабильна из-за утечек (потери электрической энергии) и температуры (ТКЕ), то частота колебательного контура «уходила» и «гуляла», т.е. менялась. А это недопустимо! Познакомьтесь с колебательным контуром, и вы сразу поймёте насколько это важно.

Как работает варикап?

На рисунке показана типовая схема управления варикапом.



R2 - переменный резистор. С помощью винта по рабочей поверхности этого резистора перемещается ползунок, который плавно изменяет сопротивление, а, соответственно, и величину обратного напряжения ( $U_{обр}$ ), подаваемого на варикап. Конденсатор C1 препятствует попаданию на индуктивность L1 постоянного напряжения. Постоянный резистор R1 уменьшает шунтирующее действие резистора R2 на контур, что позволяет сохранить резонансные свойства контура. Как видим, ёмкость варикапа входит в состав колебательного контура. Меняя ёмкость варикапа, мы изменяем параметры колебательного контура и, следовательно, частоту его настройки. Так реализуется электронная настройка.

В современных цветных телевизорах есть такая функция – автонастройка (автопоиск) телеканалов. Нажимаем на кнопку, и весь диапазон сканируется на предмет наличия вещательных программ - телеканалов. Так вот этой функции просто бы не существовало, если бы не было варикапа. В телевизоре управляющей схемой формируется плавно меняющееся напряжение настройки, которое и подаётся на варикап. За счёт этого меняются параметры колебательного контура приёмника (тюнера) и он настраивается на тот или иной телеканал. Затем происходит запоминание напряжения настройки на каждый из найденных телеканалов, и мы можем переключаться на любой из них, когда захотим.

Кроме обычных варикапов очень часто используют сдвоенные и строенные варикапы с общим катодом. Вот такой вид они имеют на принципиальных схемах.



Они используются, как правило, в радиоприёмных устройствах, где необходимо одновременно перестраивать входной контур и гетеродин с помощью одного потенциометра. Имеются так же обычные сборки, когда в одном корпусе размещается несколько варикапов электрически не связанные между собой.

*Параметры варикапов.*

Несмотря на то, что варикап разработан на базе диода, это всё-таки конденсатор и именно параметры, связанные с ёмкостью и являются основными. Вот лишь некоторые из них:

*Максимальное обратное постоянное напряжение* ( $U_{обр. max}$ ). Измеряется в вольтах (В). Это максимальное напряжение, которое можно подавать на варикап. Напомним, что ёмкость варикапа уменьшается при увеличении обратного напряжения на нём.

*Номинальная ёмкость варикапа* ( $C_B$ ). Это ёмкость варикапа при фиксированном обратном напряжении. Поскольку варикапы выпускаются на различные значения ёмкости, начиная от долей пикофарады и до сотен пикофарад, то их ёмкость измеряют, подавая определённую величину обратного напряжения на варикап. Оно может быть равным 4 и более вольтам, и, как правило, указывается в справочных данных.

Также может указываться минимальная и максимальная ёмкость варикапа ( $C_{min}$  и  $C_{max}$ ). Это связано с тем, что параметры выпускаемых варикапов могут несколько отличаться. Поэтому в справочных данных указывают минимально- и максимально- возможную ёмкость варикапа при фиксированном обратном напряжении ( $U_{обр}$ ). Это и есть  $C_{max}$  и  $C_{min}$ .

У импортных варикапов обычно указывается только одна величина  $C_d$  (или  $C_d$ ) – ёмкость варикапа при обратном напряжении, близком к максимальному. Например, для импортного варикапа ВВ133 ёмкость  $C_d = 2,6$  pF (пФ) при обратном напряжении  $V_R = 28$  V.

*Коэффициент перекрытия по ёмкости* ( $K_c$ ). Этот параметр показывает отношение максимальной ёмкости варикапа к минимальной. Считается так:

$$K_c = \frac{C_{max}}{C_{min}}$$

Например, для отечественного варикапа КВ109А коэффициент перекрытия  $K_c$  равен 5,5. Ёмкость при  $U_{обр} = 25$  В составляет 2,8 пФ (Это -  $C_{min}$ ). Так как диапазон обратного напряжения для варикапа КВ109А составляет 3 – 25 вольт, то используя формулу, можно узнать ёмкость этого варикапа при обратном напряжении в 3 вольта. Оно составит 15,4 пФ.(Это -  $C_{max}$ ).

В документации на импортные варикапы так же указывается коэффициент перекрытия. Он называется capacitance ratio. Формула, по которой считается этот параметр, выглядит так (для варикапа ВВ133).

$$\frac{C_{d(0,5V)}}{C_{d(28V)}}$$

Как видим, берётся ёмкость варикапа при обратном напряжении в 0,5 V и в 28 V. Так как ёмкость варикапа уменьшается при увеличении обратного напряжения на нём, то становится ясно, что эта формула расчёта аналогична той, что применяется для расчёта  $K_c$ .

Все остальные параметры можно считать несущественными. В некоторых случаях необходимо обратить внимание на граничную частоту, но это не столь важно, поскольку варикапы уверенно работают во всём радио и телевизионном диапазоне.

## Тема 2.9. Светодиоды

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

— полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом или контактом металл-полупроводник, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока.

При пропускании электрического тока через p-n переход в прямом направлении, носители заряда — электроны и дырки и — рекомбинируют с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой).

Не всякие полупроводниковые материалы эффективно испускают свет при рекомбинации. Во-первых, ширина запрещенной зоны в активной области светодиода должна быть близка к энергии квантов света видимого диапазона. Во-вторых, вероятность излучения при рекомбинации электронно-дырочных пар должна быть высокой, для чего полупроводниковый кристалл должен содержать мало дефектов, из-за которых рекомбинация происходит без излучения.

Лучшие излучатели относятся к прямозонным полупроводникам (то есть таким, в которых разрешены прямые оптические переходы зона-зона), например, GaAs или InP) и A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup> (например, ZnSe или CdTe). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета (GaN) до среднего инфракрасного диапазона (PbS).

Для получения p-n перехода приконтактные слои полупроводникового кристалла легируют разными примесями: по одну сторону акцепторными, по другую — донорными.



Условно-графическое обозначение светодиода на электрических схемах

#### Характеристики

Вольт-амперная характеристика светодиодов в прямом направлении нелинейна. Диод начинает проводить ток начиная с некоторого порогового напряжения. Это напряжение позволяет достаточно точно определить материал полупроводника. КПД светодиодов в основном колеблется 30 до 50 %. Потребление энергии в 8 раз меньше, чем у ламп накаливания. Срок службы — в 80 раз дольше (почти 50 тысяч часов).

Чем больший ток проходит через светодиод, тем больше электронов и дырок поступают в зону рекомбинации в единицу времени, и диод светит ярче. Но ток нельзя увеличивать до бесконечности, Из-за внутреннего сопротивления полупроводника и р-п-перехода диод перегревается и выходит из строя.

Недостатком светодиодов является его высокая цена. Пока что цена одного люмена, излученного светодиодом, в 100 раз выше, чем галогенной лампой. Но специалисты утверждают, что в ближайшие 2 — 3 года этот показатель будет снижен в 10 раз.

Квантовый выход — это число излученных квантов света на одну рекомбинировавшую электронно-дырочную пару. Различают внутренний и внешний квантовый выход. Внутренний — в самом р-п-переходе, внешний — для прибора в целом. Внутренний квантовый выход для хороших кристаллов с хорошим теплоотводом достигает почти 100%, рекорд внешнего квантового выхода для красных светодиодов составляет 55%, а для синих — 35%.

Внешний квантовый выход — одна из основных характеристик эффективности светодиода.

Светодиод — низковольтный прибор. Обычный светодиод, применяемый для индикации, потребляет от 2 до 4В постоянного напряжения при токе до 50 мА.

Рекомбинация электронов и дырок (положительно заряженных ионов кристаллической решетки полупроводника) может быть излучательной, при этом в момент встречи электрона и дырки выделяется энергия в виде излучения кванта света — фотона. В случае безизлучательной рекомбинации энергия расходуется на нагрев вещества. В природе существует как минимум 5 видов излучательной рекомбинации носителей зарядов, в том числе так называемая прямозонная рекомбинация.

Ток через светодиод нужно стабилизировать.

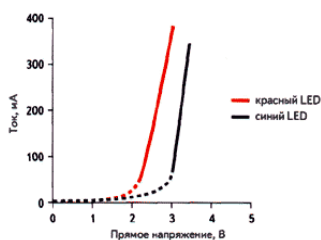


Рис.1. Вольтамперные характеристики светодиодов

Как видно из рисунка, в рабочих режимах ток экспоненциально зависит от напряжения и незначительные изменения напряжения приводят к большим изменениям тока. Поскольку световой выход прямо пропорционален току, то и яркость светодиода оказывается нестабильной. Поэтому ток необходимо стабилизировать. Кроме того, если ток превысит допустимый предел, то перегрев светодиода может привести к его ускоренному старению.

Светодиоды допускается запитывать в импульсном режиме, при этом импульсный ток, протекающий через прибор, может быть выше, чем значения постоянного тока (до 150 мА при длительности импульсов 100 мкс и частоте импульсов 1 кГц). Для управления яркостью светодиодов (и цветом, в случае смешения цветов) используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) — метод, очень распространённый в современной электронике. Это позволяет создавать контроллеры с возможностью плавного изменения яркости (диммеры) и цвета (колор-чейнджеры).

Конвертор для светодиода — то же, что балласт для лампы. Он стабилизирует ток, протекающий через светодиод.

Считается, что светодиоды исключительно долговечны. Но это не совсем так. Чем больший ток пропускается через светодиод в процессе его службы, тем выше его температура и тем быстрее наступает старение. Поэтому срок службы у мощных светодиодов короче, чем у маломощных сигнальных, и составляет в настоящее время 20 - 50 тысяч часов. Старение выражается в первую очередь в уменьшении яркости.

Старение светодиода связано не только со снижением его яркости, но и с изменением цвета.

Спектр излучения светодиода близок к монохроматическому, в чем его кардинальное отличие от спектра солнца или лампы накаливания.

#### Конструкция и изготовление

Светодиод состоит из полупроводникового кристалла на подложке, корпуса с контактными выводами и оптической системы.

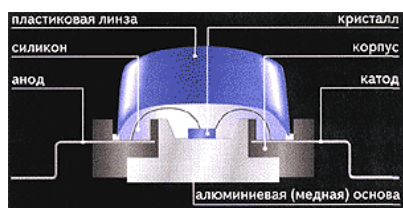


Рис.2. Конструкция мощного светодиода

Технологии изготовления светодиодов и светодиодных модулей существующих на сегодняшний день: что касается выращивания кристаллов, то основная технология — металлоорганическая эпитаксия. Для этого процесса необходимы особо чистые газы. В современных установках предусмотрены автоматизация и контроль состава газов, их отдельные потоки, точная регулировка температуры газов и подложек. Толщины выращиваемых слоев измеряются и контролируются в пределах от десятков ангстрем до нескольких микрон. Разные слои необходимо легировать примесями, донорами или акцепторами, чтобы создать p-n переход с большой концентрацией электронов в n-области и дырок — в p области.

За один процесс, который длится несколько часов, можно вырастить структуры на 6 — 12 подложках диаметром 50 — 75 мм. Очень важно обеспечить и проконтролировать однородность структур на поверхности подложек.

Важным этапом технологии является планарная обработка пленок: их травление, создание контактов к p- и r-слоям, покрытие металлическими пленками для контактных выводов. Пленку, выращенную на одной подложке, можно разрезать на несколько тысяч чипов размерами от 0,24x0,24 до 1x1 мм<sup>2</sup>.

Следующим шагом является создание светодиодов из этих чипов. Необходимо смонтировать кристалл в корпусе, сделать контактные выводы, изготовить оптические покрытия, просветляющие поверхность для вывода излучения или отражающие его. Если это белый светодиод, то нужно равномерно нанести люминофор. Надо обеспечить теплоотвод от кристалла и корпуса, сделать пластиковый купол, фокусирующий излучение в нужный телесный угол. Около половины стоимости светодиода определяется этими этапами высокой технологии.

Необходимость повышения мощности для увеличения светового потока привела к тому, что традиционная форма корпусного светодиода перестала удовлетворять производителей из-за недостаточного теплоотвода. Надо было максимально приблизить чип к теплопроводящей поверхности. В связи с этим на смену традиционной технологии и несколько более совершенной SMD-технологии (surface mount details — поверхностный монтаж деталей) приходит наиболее передовая технология COB (chip on board).

Светодиоды, выполненные по SMD- и COB-технологии, монтируются (приклеиваются) непосредственно на общую подложку, которая может исполнять роль радиатора — в этом случае она делается из металла.

Раньше в светодиодных сборках было очень много светодиодов. Сейчас, по мере увеличения мощности, светодиодов становится меньше, зато оптическая система, направляющая световой поток в нужный телесный угол, играет все большую роль.

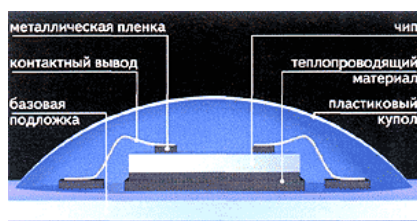


Рис.3. Светодиод, изготовленный по технологии COB

## Тема 2.10. Фотодиоды

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Фотодиод — приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в p-n-переходе.

Полупроводниковый фотодиод — это полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещённости.

Обычно в качестве фотодиода используют полупроводниковые диоды с p-n переходом, который смещен в обратном направлении внешним источником питания.

При поглощении квантов света в p-n переходе или в прилегающих к нему областях образуются новые носители заряда. Неосновные носители заряда, возникшие в областях, прилегающих к p-n переходу на расстоянии, не превышающей диффузионной длины, диффундируют в p-n переход и проходят через него



под действием электрического поля. То есть обратный ток при освещении возрастает. Поглощение квантов непосредственно в p-n переходе приводит к аналогичным результатам. Величина, на которую возрастает обратный ток, называется фототоком.

#### Характеристики

Свойства фотодиода можно охарактеризовать следующими характеристиками.

1) вольтамперная характеристика фотодиода представляет собой зависимость светового тока при неизменном световом потоке и темнового тока  $I_{\text{темн}}$  от напряжения.

2) световая характеристика фотодиода, то есть зависимость фототока от освещенности, соответствует прямой пропорциональности фототока от освещенности. Это обусловлено тем, что толщина базы фотодиода значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. То есть практически все неосновные носители заряда, возникшие в базе, принимают участие в образовании фототока.

3) спектральная характеристика фотодиода – это зависимость фототока от длины волны падающего света на фотодиод. Она определяется со стороны больших длин волн шириной запрещенной зоны, при малых длинах волн большим показателем поглощения и увеличению влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда с уменьшением длины волны квантов света. То есть коротковолновая граница чувствительности зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения.

4) постоянная времени – это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в  $e$  раз (63%) по отношению к установившемуся значению.

5) темновое сопротивление – сопротивление фотодиода в отсутствие освещения.

6) интегральная чувствительность

$$K = I_{\phi} / \Phi,$$

где  $I_{\phi}$  – фототок,  $\Phi$  – освещенность.

7) инерционность.

Существует 3 физических фактора, влияющих на инерционность: 1) время диффузии или дрейфа неравновесных носителей через базу  $\tau$ ; 2) время пролета через p-n переход  $\tau_i$ ; 3) время перезарядки барьерной емкости p-n перехода, характеризующееся постоянной времени  $RC_{\text{бар}}$ .

Классификация

#### **1. p-i-n фотодиод**

В p-i-n структуре средняя i-область заключена между двумя областями противоположной проводимости. При достаточно большом напряжении оно пронизывает i-область, и свободные носители, появившиеся за счет фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем p-n переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности. Повышение быстродействия в p-i-n фотодиоде обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется дрейфом электрических зарядов в сильном электрическом поле. Уже при  $U_{\text{обр}} \approx 0.1 \text{ В}$  p-i-n фотодиод имеет преимущество в быстродействии.

Достоинства:

1) есть возможность обеспечения чувствительности в длинноволновой части спектра за счет изменения ширины i-области.

2) высокая чувствительность и быстродействие.

3) малое рабочее напряжение  $U_{\text{раб}}$ .

Недостатком является сложность получения высокой чистоты i-области.

#### **2. Фотодиод Шоттки (фотодиод с барьером Шоттки)**

Структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов перейдет из металла в полупроводник p-типа.

#### **3. Лавинный фотодиод**

В структуре используется лавинный пробой. Он возникает тогда, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Очень чувствительны. Для оценки существует коэффициент лавинного умножения:

$$\frac{M}{M_0} = \frac{1}{1 - \alpha W}$$

Для реализации лавинного умножения необходимо выполнить два условия:

1) Электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно большим, чтобы на длине свободного пробега электрон набрал энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны:

$$eE > \hbar \nu$$

2) Ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега:

$$W \gg \lambda$$

Значение коэффициентов внутреннего усиления составляет  $M=10-100$  в зависимости от типа фотодиодов.

Чувствительность лавинных фотодиодов может быть на несколько порядков больше, чем у обычных фотодиодов (у германиевых – в 200 – 300 раз, у кремниевых – в 104 – 106 раз).

Лавинные фотодиоды являются быстродействующими фотоэлектрическими приборами, их частотный диапазон может достигать 10 ГГц. Недостатком лавинных фотодиодов является более высокий уровень шумов по сравнению с обычными фотодиодами.

#### 4. Фотодиод с гетероструктурой

Гетеропереходом называют слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны. Один слой p+ играет роль «приёмного окна». Заряды генерируются в центральной области. За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещенной зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн. Недостаток — сложность изготовления.

Применение фотодиодов

Особенности фотодиодов, такие, как:

- простота технологии изготовления и структур
- сочетание высокой фоточувствительности и быстродействия
- малое сопротивление базы
- малая инерционность

Определяют области их применения.

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов – без внешнего источника электрической энергии (режим фотогенератора) либо с внешним источником электрической энергии (режим фотопреобразователя).

Фотодиоды, работающие в режиме фотогенератора, часто применяют в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую. Они называются солнечными элементами и входят в состав солнечных батарей.

КПД кремниевых солнечных элементов составляет около 20 %, а у пленочных солнечных элементов он может иметь значительно большее значение. Важными техническими параметрами солнечных батарей являются отношения их выходной мощности к массе и площади, занимаемой солнечной батареей. Эти параметры достигают значений 200 Вт/кг и 1 кВт/м<sup>2</sup>, соответственно.

Наиболее характерные области применения фотодиодов: считывание информации, воспроизведение звука с лент. В фотосчитывателях фотодиоды, источники излучения собраны в блоки и образуют оптические каналы, через которые перемещается носитель информации. Максимальная частота устройства при использовании светодиода в качестве источника излучения составляет единицы МГц для фотогальванического режима и десятка МГц для фотодиодного.

Фотодиоды используются в преобразователях линейных и угловых перемещений. На контролирующую поверхность прозрачного диска или ленты наносят в соответствии с требуемым угловым или линейным разрешением рисунок. Скорость вращения (перемещения) можно определить подсчетом числа световых импульсов, которые падают на фотоприемник, проходя через контролируемую поверхность и узкую диафрагму (щель) от светодиода. Информацию о направлении получают при помощи муаровых картин. В этом случае устанавливаются 2—4 фотодиода, каждый из которых принимает световые импульсы, сдвинутые на 90 град, по пространственной фазе относительно соседнего фотоприемника. Амплитуда импульсов обратно пропорциональна плотности муаровой картины.

Кремниевый фотодиод — наиболее подходящий фотоприемник в приборах и информационно-измерительных системах контроля параметров излучателей и индикаторов визуального отображения информации. Так как устройства производят измерение фотометрических параметров, то фотоэлектрический преобразователь должен обладать спектральной характеристикой, приближающейся к чувствительности среднего человеческого глаза. Для корректирования спектральной чувствительности фотодиодов в состав преобразователя включают светофильтры.

Фотодиоды применяются в различных системах контроля и управления технологическими процессами. Например, для контроля параметров процесса осаждения и травления пленок в технологии производства интегральных схем.

Кремниевые фотодиоды с p-n и p-i-n структурами являются основными фотоприемниками оптронов.

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода. Полупроводниковые приборы, использующие пары «светодиод – фотодиод», называются оптронами.

Входные и выходные цепи в таких приборах оказываются электрически никак не связанными, поскольку передача сигнала осуществляется через оптическое излучение.

Фотодиод является составным элементом во многих широких оптоэлектронных устройствах. И поэтому он находит широкое применение.

- а) оптоэлектронные интегральные микросхемы.
- б) многоэлементные фотоприемники.
- в) оптроны.

## Тема 2.11. Тиристоры.

Тиристор имеет 4-слойную полупроводниковую структуру, состоящую из чередующихся областей с проводимостями **p** и **n** типа. На границах раздела областей образуются 3 **p-n** перехода (рис.2.3). Вывод от крайней **p**-области является анодом, от крайней **n**-области — катодом. Помимо них у тиристора имеется вывод от средней **p**-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<sub>2</sub>n<sub>2</sub>** 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.

### Раздел 3. Биполярные транзисторы

#### Тема 3.1. Структура и типы биполярных транзисторов

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (0,3час)

*Биполярный транзистор* — трёхэлектродный полупроводниковый прибор, один из типов транзистора. Электроды подключены к трём последовательно расположенным слоям полупроводника с чередующимся типом примесной проводимости. По этому способу чередования различают n-p-n и p-n-p транзисторы (n (negative) — электронный тип примесной проводимости, p (positive) — дырочный).

Работа биполярного транзистора основана на переносе зарядов одновременно двух типов, носителями которых являются электроны и дырки (от слова «би» — «два»). Схематическое устройство транзистора показано на втором рисунке.

Электрод, подключённый к среднему слою называют базой, электроды, подключённые ко внешним слоям, называют коллектором и эмиттером. С точки зрения типов проводимостей эмиттерный и коллекторный слои не различимы. Но практически, при изготовлении транзисторов, для улучшения электрических параметров прибора они существенно различаются степенью легирования примесями. Эмиттерный слой сильно легированный, коллекторный легируется слабо, что обеспечивает повышение допустимого коллекторного напряжения. Величина пробойного обратного напряжения эмиттерного перехода не критична, так как обычно в электронных схемах транзисторы работают с прямосмещённым эмиттерным P-n-переходом, кроме того, сильное легирование эмиттерного слоя обеспечивает лучшую инжекцию неосновных носителей в базовый слой, что увеличивает коэффициент передачи по току в схемах с общей базой. Кроме того, площадь коллекторного P-n-перехода при изготовлении делается существенно больше площади эмиттерного перехода, что обеспечивает лучший сбор неосновных носителей из базового слоя и улучшает коэффициент передачи.

Для повышения быстродействия (частотных параметров) биполярного транзистора толщину базового слоя нужно делать тоньше, так как толщиной базового слоя, в том числе, определяется время "пролета" (диффузии в бездрейфовых приборах) неосновных носителей, но, при снижении толщины базы, снижается предельное коллекторное напряжение, поэтому толщину базового слоя выбирают исходя из разумного компромисса.

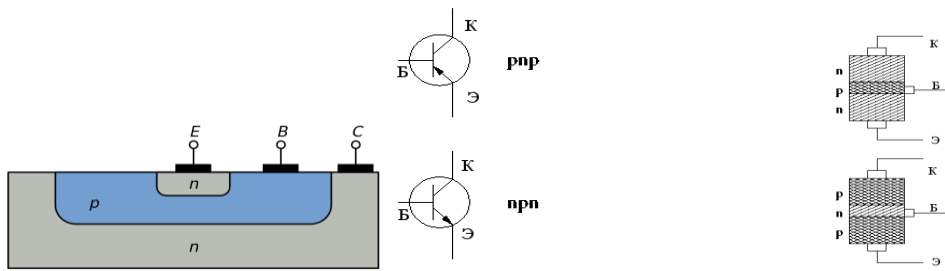
В первых транзисторах в качестве полупроводникового материала использовался металлический германий. В настоящее время их изготавливают в основном из монокристаллического кремния и монокристаллического арсенида галлия.

#### *Типы биполярных транзисторов (БТ).*

Биполярный транзистор состоит из трёх различным образом легированных полупроводниковых слоёв: эмиттера Е (Э), базы В (Б) и коллектора С (К). В зависимости от чередования типа проводимости этих слоёв различают n-p-n (эмиттер – n-полупроводник, база – p-полупроводник, коллектор – n-полупроводник) и p-n-p транзисторы. К каждому из слоёв подключены проводящие невыпрямляющие контакты.

Слой базы расположен между эмиттерным и коллекторным слоями и слабо легирован, поэтому имеет большое омическое сопротивление. Общая площадь контакта база-эмиттер выполняется значительно меньше площади контакта коллектор-база (это делается по двум причинам — большая площадь перехода коллектор-база увеличивает вероятность захвата неосновных носителей заряда из базы в коллектор и, так как в рабочем режиме переход коллектор-база обычно включен с обратным смещением, при работе в коллекторном переходе выделяется основная доля тепла, рассеиваемого прибором, повышение площади способствует лучшему отводу тепла от коллекторного перехода), поэтому реальный биполярный транзистор общего применения является несимметричным устройством (технически нецелесообразно менять местами эмиттер и коллектор и получить в результате аналогичный исходному биполярный транзистор — инверсное включение).

В активном усилительном режиме работы транзистор включён так, что его эмиттерный переход смещён в прямом направлении (открыт), а коллекторный переход смещён в обратном направлении (закрит).



Обозначение биполярных транзисторов на схемах

Простейшая наглядная схема устройства транзистора

### Тема 3.2. Режимы работы биполярного транзистора

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

#### Нормальный активный режим

Переход эмиттер-база включен в прямом направлении (открыт), а переход коллектор-база — в обратном (закрыт)

$U_{ЭБ} > 0$ ;  $U_{КБ} < 0$  (для транзистора p-n-p типа), для транзистора n-p-n типа условие будет иметь вид  $U_{ЭБ} < 0$ ;  $U_{КБ} > 0$ .

#### Инверсный активный режим

Эмиттерный переход имеет обратное включение, а коллекторный переход — прямое.

#### Режим насыщения

Оба p-n перехода смещены в прямом направлении (оба открыты). Если эмиттерный и коллекторный p-n-переходы подключить к внешним источникам в прямом направлении, транзистор будет находиться в режиме насыщения. Диффузионное электрическое поле эмиттерного и коллекторного переходов будет частично ослабляться электрическим полем, создаваемым внешними источниками  $U_{ЭБ}$  и  $U_{КБ}$ . В результате уменьшится потенциальный барьер, ограничивавший диффузию основных носителей заряда, и начнется проникновение (инжекция) дырок из эмиттера и коллектора в базу, то есть через эмиттер и коллектор транзистора потекут токи, называемые токами насыщения эмиттера ( $I_{Э,нас}$ ) и коллектора ( $I_{К,нас}$ ). Напряжение насыщения коллектор-эмиттер ( $U_{КЭ,нас}$ ) - это падение напряжения на открытом транзисторе (смысловый аналог  $R_{СИ,отк}$  у полевых транзисторов). Аналогично напряжение насыщения база-эмиттер ( $U_{БЭ,нас}$ ) - это падение напряжение между базой и эмиттером на открытом транзисторе.

#### Режим отсечки

В данном режиме коллекторный p-n переход смещён в обратном направлении, а на эмиттерный переход может быть подано как обратное, так и прямое смещение, не превышающее порогового значения, при котором начинается эмиссия неосновных носителей заряда в область базы из эмиттера (для кремниевых транзисторов приблизительно 0,6—0,7 В). Режим отсечки соответствует условию  $U_{ЭБ} < 0,7$  В, или  $I_{Б} = 0$ .

#### Барьерный режим

В данном режиме база транзистора по постоянному току соединена накоротко или через небольшой резистор с его коллектором, а в коллекторную или в эмиттерную цепь транзистора включается резистор, задающий ток через транзистор. В таком включении транзистор представляет из себя своеобразный диод, включенный последовательно с токозадающим резистором. Подобные схемы каскадов отличаются малым количеством комплектующих, хорошей развязкой по высокой частоте, большим рабочим диапазоном температур, нечувствительностью к параметрам транзисторов.

### Тема 3.3. Схемы включения биполярных транзисторов

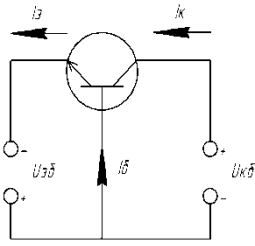
Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями:

Коэффициент усиления по току  $I_{ВЫХ}/I_{ВХ}$ .

Входное сопротивление  $R_{ВХ} = U_{ВХ}/I_{ВХ}$ .

Схема включения с общей базой



Среди всех трех конфигураций обладает наименьшим входным и наибольшим выходным сопротивлением. Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице, и большой коэффициент усиления по напряжению. Фаза сигнала не инвертируется.

Коэффициент усиления по току:  $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = \alpha [\alpha < 1]$ .

Входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = U_{\text{бэ}}/I_{\text{Б}}$ .

Входное сопротивление для схемы с общей базой мало и не превышает 100 Ом для маломощных транзисторов, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

**Достоинства:**

Хорошие температурные и частотные свойства.

Высокое допустимое напряжение

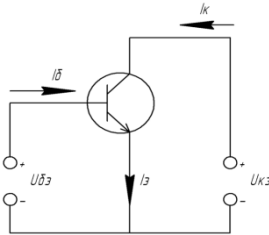
**Недостатки схемы с общей базой:**

Малое усиление по току, так как  $\alpha < 1$

Малое входное сопротивление

Два разных источника напряжения для питания.

**Схема включения с общим эмиттером**



$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}}$$

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Б}}$$

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{бэ}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{кэ}}$$

Коэффициент усиления по току:  $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = I_{\text{К}}/(I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}) = \alpha/(1 - \alpha) = \beta [\beta \gg 1]$ .

Входное сопротивление:  $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = U_{\text{бэ}}/I_{\text{Б}}$ .

**Достоинства**

Большой коэффициент усиления по току.

Большой коэффициент усиления по напряжению.

Наибольшее усиление мощности.

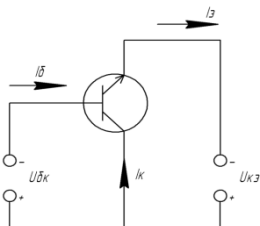
Можно обойтись одним источником питания.

Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

**Недостатки**

Худшие температурные и частотные свойства по сравнению со схемой с общей базой.

**Схема включения с общим коллектором**



$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{Э}}$$

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Б}}$$

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{бк}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{кэ}}$$

Коэффициент усиления по току:  $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Э}}/I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}}/(I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}) = 1/(1 - \alpha) = \beta [\beta \gg 1]$ .

Входное сопротивление:  $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх} = (U_{бэ} + U_{кэ})/I_{б}$ .

#### Достоинства

Большое входное сопротивление.

Малое выходное сопротивление.

#### Недостатки

Коэффициент усиления по напряжению меньше 1.

Схему с таким включением называют «*эмиттерным повторителем*».

## Раздел 4. Полевые транзисторы

### Тема 4.1. Структура и типы полевых транзисторов

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (0,3 час)

**Полевой транзистор** — полупроводниковый прибор, через который протекает поток основных носителей зарядов, регулируемый поперечным электрическим полем, которое создаётся *напряжением*, приложенным между затвором и стоком или между затвором и истоком.



#### Структура ПТ

Полупроводниковые материалы, преимущественно применяемые в транзисторах это: **кремний, арсенид галлия и германий**. Также существуют транзисторы на **углеродных нанотрубках, прозрачные** для дисплеев **LCD** и **полимерные** (наиболее перспективные). Три контакта полевых транзисторов называются **исток** (источник носителей тока), **затвор** (управляющий электрод) и **сток** (электрод, куда стекают носители).

## 2. Типы полевых транзисторов

#### МДП-структуры специального назначения

В структурах типа металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) диэлектрик под затвором выполняется двухслойным: слой оксида  $\text{SiO}_2$  и толстый слой нитрида  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Между слоями образуются ловушки электронов, которые при подаче на затвор МНОП-структуры положительного напряжения (28..30 В) захватывают туннелирующие через тонкий слой  $\text{SiO}_2$  электроны. Образующиеся отрицательно заряженные ионы повышают пороговое напряжение, причём их заряд может храниться до нескольких лет при отсутствии питания, так как слой  $\text{SiO}_2$  предотвращает утечку заряда. При подаче на затвор большого отрицательного напряжения (28...30 В), накопленный заряд рассасывается, что существенно уменьшает пороговое напряжение.

#### МОП-структуры

Структуры типа металл-оксид-полупроводник (МОП) с плавающим затвором и лавинной инжекцией (**ЛИЗМОП**) имеют затвор, выполненный из поликристаллического кремния, изолированный от других частей структуры. Лавинный пробой р-n-перехода подложки и стока или истока, на которые подаётся высокое напряжение, позволяет электронам проникнуть через слой оксида на затвор, вследствие чего на нём появляется отрицательный заряд. Изолирующие свойства диэлектрика позволяют сохранять этот заряд десятки лет. Удаление электрического заряда с затвора осуществляется с помощью ионизирующего ультрафиолетового облучения кварцевыми лампами, при этом фототок позволяет электронам рекомбинировать с дырками.

Структуры запоминающих полевых транзисторов с двойным затвором

В дальнейшем были разработаны структуры запоминающих полевых транзисторов с двойным затвором. Встроенный в диэлектрик затвор используется для хранения заряда, определяющего состояние прибора, а внешний (обычный) затвор, управляемый разнополярными импульсами для ввода или удаления заряда на встроенном (внутреннем) затворе. Так появились ячейки, а затем и микросхемы флэш-памяти, получившие в наши дни большую популярность и составившие заметную конкуренцию жестким дискам в компьютерах.

*Условно-графическое обозначение ПТ*

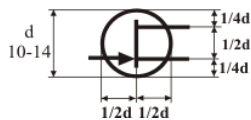


Рис. 1 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с p-n-переходом и каналом n-типа



Рис. 2 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с p-n-переходом и каналом p-типа



Рис. 3 - Условное графическое обозначение полевого транзистора со встроенным p-каналом обедненного типа



Рис. 4 - Условное графическое обозначение полевого транзистора со встроенным n-каналом обогащенного типа



Рис. 5 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с индуцированным p-каналом обогащенного типа



Рис. 6 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с индуцированным n-каналом обогащенного типа

#### Тема 4.2. Рабочий процесс ПТ

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

Рабочий процесс ПТ

##### Процесс включения

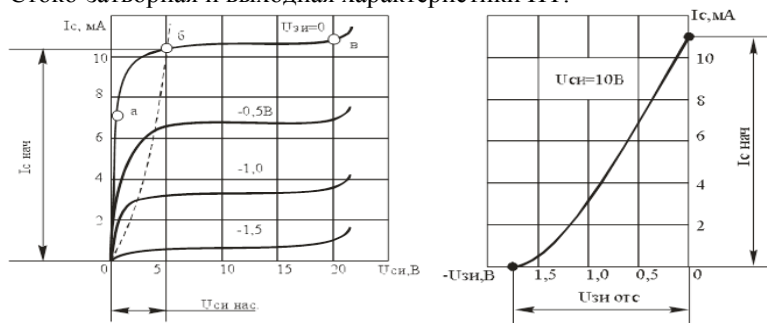
Процесс включения полевого транзистора может быть разбит на четыре временных интервала. На первом интервале заряжается входная емкость транзистора от 0В до  $V_{TH}$ . В течении этого периода большинство затворного тока идет на заряд конденсатора CGS, и небольшой ток течет через конденсатор CGD (напряжение на затворе увеличивается и напряжение на CGD слегка уменьшается). Этот интервал известен как задержка включения, поскольку не изменяется ни ток через транзистор, ни напряжение на нем. Как только напряжение на затворе достигает порогового уровня, транзистор начинает проводить ток. На втором интервале входное напряжение возрастает от  $V_{TH}$  до уровня плато Миллера,  $V_{GS,Miller}$ . Это чисто линейный режим работы транзистора - выходной ток прямо пропорционален входному напряжению. На стороне затвора, как и в первом интервале, ток течет через CGS и CGD, на выходе через транзистор начинает протекать ток, а напряжение на стоке остается неизменным на уровне  $V_{DS,off}$ . Этот эффект становится понятен, если взглянуть на схему на рис. 3. Транзистор еще не способен пропустить ток, достаточный для снижения напряжения на его стоке до уровня запирающего диода, и через его открытый переход напряжение на стоке зафиксировано на уровне входного напряжения. Третий период начинается, когда напряжение на затворе достигает величины  $V_{GS,Miller}$ , достаточной для начала прохождения тока через транзистор, и выходной диод закрывается. Соответственно, напряжение на стоке начинает падать, но напряжение на затворе остается постоянным. Этот процесс и образует плато Миллера на диаграмме включения полевого транзистора. Весь ток, на который способен драйвер, идет на перезаряд емкости CGD для обеспечения максимально быстрого изменения напряжения сток-исток. Ток через транзистор теперь остается постоянным и ограничен внешними элементами схемы, в нашем случае величиной IDC. Последний интервал процесса включения полевого транзистора характеризуется максимальным уменьшением сопротивления канала из-за дальнейшего увеличения управляющего напряжения. Напряжение на затворе увеличивается от  $V_{GS,Miller}$  до своего максимального значения  $V_{RDV}$ , и весь входной ток идет на дальнейший заряд CGS и перезаряд CGD. Выходной ток при этом остается неизменным, а напряжение сток-исток немного уменьшается, поскольку уменьшается сопротивление канала.

##### Процесс выключения



Процесс выключения полевого транзистора можно разбить на те же самые четыре шага, что и процесс включения, но только в обратном порядке. Перед началом процесса транзистор пропускает через себя весь ток нагрузки, в нашем примере  $I_{DC}$ , и напряжение на нем определяется падением от тока нагрузки на сопротивлении открытого канала  $R_{DS(on)}$ . Первый интервал, известный как задержка выключения, характеризуется разрядом входной емкости транзистора  $C_{ISS}$  с начального уровня до уровня плато Миллера. Ток драйвера протекает через паразитные конденсаторы  $C_{GS}$  и  $C_{GD}$ . Ток через транзистор остается неизменным, а напряжение сток-исток слегка увеличивается (из-за увеличения сопротивления открытого канала). Во время второго интервала, относящемуся к плато Миллера на диаграмме, напряжение сток-исток транзистора увеличивается со значения  $I_D \cdot R_{DS(on)}$  до максимального значения, в нашем случае до уровня выходного напряжения, после чего открывается демпфирующий диод. Весь ток драйвера идет на перезаряд конденсатора  $C_{GD}$ , поскольку напряжение на затворе остается постоянным, а напряжение на стоке возрастает. Также, этот ток протекает через конденсатор фильтра на  $V_{DRV}$ , и вычитается из тока стока. Общий ток стока равен току нагрузки, в нашем примере  $I_{DC}$  на рис. 3. Третий интервал начинается с момента открывания диода и образования альтернативного пути для тока нагрузки. Напряжение на затворе падает от  $V_{GS, Miller}$  до  $V_{TH}$ , и основной ток драйвера идет на разряд емкости  $C_{GS}$ , поскольку  $C_{GD}$  оказался практически полностью перезаряженным в течении предыдущего периода. Транзистор находится в линейном режиме, и уменьшение напряжения исток-затвор приводит к уменьшению тока стока, который падает практически до нуля в конце интервала. Напряжение на стоке транзистора остается постоянным, "привязанным" через открытый диод к выходному напряжению. Последний, четвертый, период характеризуется неизменными напряжением и током через транзистор. Входная емкость его (как и в предыдущем периоде в основном образованная конденсатором  $C_{GS}$ ) продолжает разряжаться до нуля.

Сток-затворная и выходная характеристики ПТ.



**Выходной (стоковой)** называется зависимость тока стока от напряжения исток-сток при константном напряжении затвор-исток. На рисунке — график слева. На графике можно четко выделить три зоны. Первая из них — зона резкого возрастания тока стока. Это так называемая «омическая» область. Канал «исток-сток» ведет себя как резистор, чье сопротивление управляется напряжением на затворе транзистора. Вторая зона — **область насыщения**. Она имеет почти линейный вид. Здесь происходит перекрытие канала в области стока, которое увеличивается при дальнейшем росте напряжения исток-сток. Соответственно, растет и сопротивление канала, а стоковый ток меняется очень слабо (закон Ома, однако). Именно этот участок характеристики используют в усилительной технике, поскольку здесь наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления. К таким параметрам относятся крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления. Значения всех этих непонятных словосочетаний будут раскрыты ниже. Третья зона графика — **область пробоя**, чье название говорит само за себя.

С правой стороны рисунка показан график еще одной важной зависимости — **сток-затворной характеристики**. Она показывает то, как зависит ток стока от напряжения затвор-исток при постоянном напряжении между истоком и стоком. И именно ее крутизна является одним из основных параметров полевого транзистора.

## Тема 4.2. МДП-транзисторы

### МДП-структуры

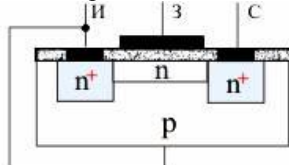
В структурах типа металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) диэлектрик под затвором выполняется двухслойным: слой оксида  $SiO_2$  и толстый слой нитрида  $Si_3N_4$ . Между слоями образуются ловушки электронов, которые при подаче на затвор МНОП-структуры положительного напряжения (28...30 В) захватывают туннелирующие через тонкий слой  $SiO_2$  электроны. Образующиеся отрицательно заряженные ионы повышают пороговое напряжение, причём их заряд может храниться до нескольких лет при отсутствии питания, так как слой  $SiO_2$  предотвращает утечку заряда. При подаче на затвор большого отрицательного напряжения (28...30 В), накопленный заряд рассасывается, что существенно уменьшает пороговое напряжение.

Структуры типа металл-оксид-полупроводник (МОП) с плавающим затвором и лавинной инжекцией (ЛИЗМОП) имеют затвор, выполненный из поликристаллического кремния, изолированный от других частей структуры. Лавинный пробой р-n-перехода подложки и стока или истока, на которые подаётся высокое напряжение, позволяет электронам проникнуть через слой окисла на затвор, вследствие чего на нём появляется отрицательный заряд. Изолирующие свойства диэлектрика позволяют сохранять этот заряд десятки лет. Удаление электрического заряда с затвора осуществляется с помощью ионизирующего ультрафиолетового облучения кварцевыми лампами, при этом фототок позволяет электронам рекомбинировать с дырками.

В дальнейшем были разработаны структуры запоминающих полевых транзисторов с двойным затвором. Встроенный в диэлектрик затвор используется для хранения заряда, определяющего состояние прибора, а внешний (обычный) затвор, управляемый разнополярными импульсами для ввода или удаления заряда на встроенном (внутреннем) затворе. Так появились ячейки, а затем и микросхемы флэш-памяти, получившие в наши дни большую популярность и составившие заметную конкуренцию жестким дискам в компьютерах.

#### *Особенности полевых транзисторов с изолированным затвором*

Такие транзисторы также часто называют МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)- или МОП (металл-оксид-полупроводник)-транзисторами (англ. metall-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET). У таких устройств затвор отделен от канала тонким слоем диэлектрика. Физической основой их работы является эффект изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля.



Устройство транзисторов такого вида следующее. Есть подложка из полупроводника с p-проводимостью, в которой сделаны две сильно легированные области с n-проводимостью (исток и сток). Между ними пролегает узкая приповерхностная перемычка, проводимость которой также n-типа. Над ней на поверхности пластины имеется тонкий слой диэлектрика (чаще всего из диоксида кремния — отсюда, кстати, аббревиатура МОП). А уже на этом слое и расположен затвор — тонкая металлическая пленка. Сам кристалл обычно соединен с истоком, хотя бывает, что его подключают и отдельно. Если при нулевом напряжении на затворе подать напряжение исток-сток, то по каналу между ними потечет ток. Почему не через кристалл? Потому что один из р-n переходов будет закрыт. А теперь подадим на затвор отрицательное относительно истока напряжение. Возникшее поперечное электрическое поле «вытолкнет» электроны из канала в подложку. Соответственно, возрастет сопротивление канала и уменьшится текущий через него ток. Такой режим, при котором с возрастанием напряжения на затворе выходной ток падает, называют **режимом обеднения**. Если же мы подадим на затвор напряжение, которое будет способствовать возникновению «помогающего» электронам поля «приходить» в канал из подложки, то транзистор будет работать в **режиме обогащения**. При этом сопротивление канала будет падать, а ток через него расти. Рассмотренная выше конструкция транзистора с изолированным затвором похожа на конструкцию с управляющим р-n переходом тем, что даже при нулевом токе на затворе при ненулевом напряжении исток-сток между ними существует так называемый **начальный ток стока**. В обоих случаях это происходит из-за того, что канал для этого тока встроен в конструкцию транзистора. Т.е., строго говоря, только что мы рассматривали такой подтип МДП-транзисторов, как **транзисторы с встроенным каналом**.

## **Раздел 5. Преобразование электрической энергии**

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2,4 час)

### **Тема 5.1. Виды преобразования. Статическое преобразование.**

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.

*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)<sup>1</sup>.
- 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.

## **Тема 5.2. Неуправляемые 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. 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

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

4). Выпрямленный ток  $I_d$  — постоянная составляющая выходного тока

$$I_d = \frac{U_d}{R_{\text{н}}},$$

где  $R_{\text{н}}$  — сопротивление нагрузки.

5). Пульсность  $m$  — кратность частоты основной гармоники выходного напряжения по отношению к частоте входного напряжения (сети)  $f$

$$m = \frac{f_{\text{осн}}}{f}$$

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

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

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

$$q = \frac{U_{\text{осн.мах}}}{U_d}$$

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

$$q = \frac{2}{m^2 - 1}. \quad (3.1)$$

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  $\frac{I_{\text{в.ср}}}{I_d}$  характеризует использование вентилях по току.

4). Отношение максимального обратного напряжения к выпрямленному напряжению  $\frac{U_{o\text{бр.мах}}}{U_d}$

характеризует использование вентиляей 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 вентиляей 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 вентиляей обычно идеализируют, полагая, что падение напряжения на открытом вентиеле 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.

### Тема 5.3. 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 вентиляей (+) и нейтралью  $n$  (-). Возможно и иное соединение вентиляей, когда общая точка образована их анодами. В этом случае изменяется полярность выходного напряжения.

Из 3-х диодов, образующих вентиляый 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 (3.1) 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

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 = 1,17U_2 \quad (3.2)$$

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

$$U_{o\text{бр.мах}} = \sqrt{3}U_2 \cdot \sqrt{2} = \sqrt{6}U_2.$$

С учетом (3.2.)

$$U_{o\text{бр.мах}} = \frac{2\pi}{3} U_d = 2,09U_d$$

или

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

Нетрудно видеть, что входные токи — это те же токи вентиляей:  $i_a=i_{a1}$ ;  $i_b=i_{a2}$ ;  $i_c=i_{a3}$ , 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  $\frac{2\pi}{3}$  (рис.3.4).

#### Тема 5.4. Трехфазный мостовой выпрямитель.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Вентильный блок выпрямителя (рис.3.5) 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

$$U_{обр,max} = \sqrt{2}U_2$$

или, учитывая, что  $U_2 = U_d \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{2}}$ ,

$$U_{обр,max} = \frac{\pi}{3} U_d \approx 1,05 U_d, \quad \frac{U_{обр,max}}{U_d} = 1,05$$

Входные токи (рис.3.6) 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.

#### Тема 5.5. 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  $30^\circ$ . 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  $30^\circ$ , 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

$$\frac{U_{обр.max}}{U_d} = 0,525$$

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

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

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  $L_y$ .

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

### Тема 5.6. Сравнительная характеристика схем выпрямителей.

Результаты анализа работы выпрямителей, показали что их параметры определяются схемой соединения вентиля и числом фаз входного напряжения. Для обоснованного выбора схемы в таблице 3.1. представлены численные значения параметров наиболее распространенных выпрямителей. Приведены также параметры однофазных выпрямителей, хотя они и крайне редко используются в мощных преобразовательных устройствах.

Таблица 3.1.

Выходные параметры выпрямителей.

Схема выпрямителя	Количест. вентиля	m	q	$\frac{U_d}{U_2}$	$\frac{I_{в.ср}}{I_d}$	$\frac{U_{обр.max}}{U_d}$	$\frac{S_T}{P_d}$
1. Однофазная нулевая	2	2	0,67	0,9	1/2	3,14	1,34
2. Однофазная мостовая	2	3	0,67	0,9	1/2	1,57	1,11
3. Трехфазная	3	3	0,25	1,17	1/3	2,09	1,34

нулевая							
4. Трехфазная мостовая	6	6	0,057	1,35	1/3	1,05	1,05
5. 12-пульсная последовательная	12	12	0,014	2,7	1/3	0,525	1,05
6. 12-пульсная параллельная	12	12	0,014	1,35	1/6	1,05	1,05

### Тема 5.7. Коммутация вентиля и внешние характеристики выпрямителей.

При анализе схем выпрямления и выводе расчетных соотношений помимо идеализации вентиля предполагалось, что их коммутация, т.е. прекращение тока через один вентиль и включение другого, происходит мгновенно. Это верно лишь в том случае, когда в анодных цепях вентиля отсутствует индуктивность. На практике в большинстве случаев вентиляльный блок бывает включен на вторичной стороне силового трансформатора, обмотки которого обладают заметной индуктивностью рассеяния, вследствие чего процесс коммутации оказывается растянутым во времени.

Рассмотрим процесс коммутации в однофазном мостовом выпрямителе, работающем на индуктивную нагрузку (рис.3.10), где  $X_S$  — приведенное ко вторичной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора.

Если бы индуктивность рассеяния равнялась нулю в момент времени, соответствующий  $\omega t = \varphi$ , произошло бы мгновенное выключение диодов VD3, VD4 и включение VD1, VD2. Но при ее наличии ток через VD3, VD4 не может прекратиться мгновенно, как не может мгновенно вырасти до величины  $I_d$  через VD1, VD2. В результате в течении времени, соответствующего фазовому углу  $\gamma$ , оказываются открытыми все 4 диода. Этот интервал принято называть интервалом коммутации. Очевидно, что в течении интервала коммутации входные зажимы (a, b) вентиляльного блока оказываются замкнутыми практически накоротко, что, естественно, приводит к снижению выпрямленного напряжения. Снижение будет тем заметнее, чем продолжительнее интервал коммутации. Последней возрастает с увеличением индуктивности и тока нагрузки. Детальный анализ процесса дает следующее выражение для выпрямленного напряжения с учетом немгновенной коммутации и падения напряжения на открытых вентилях

$$U_d = U_{do} - \frac{2}{\pi} I_d X_S - 2U_{np} \quad (3.3)$$

где  $U_{do} = 0,9U_2$ ;

$U_{np}$  — прямое падение напряжения на открытом вентиле.

Для других выпрямителей выражения для  $U_d$  имеют такой же вид. В частности, для трехфазного мостового выпрямителя

$$U_d = U_{do} - \frac{3}{2\pi} I_d X_S - 2U_{np} \quad (3.4)$$

Выражения (3.3) и (3.4) являются уравнениями внешних характеристик выпрямителей. В зависимости от величины  $X_S$  выпрямители могут иметь полого- или крутопадающие внешние характеристики (рис.3.11).

### Тема 5.8. Управляемые выпрямители

*Общие сведения.*

Вентильные блоки управляемых выпрямителей собираются по тем же схемам, что и неуправляемых, но в отличие от последних в качестве вентиля 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  $\alpha$ , 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 полувольт 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 двухполупериодные 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

$$U_{d\alpha} = U_{do} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (4.1)$$

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  $\alpha$  составляет 0..180°.

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  $\pi \dots \pi + \alpha$  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

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cos \alpha \quad (4.2)$$

Регулировочная характеристика (кривая 2 на рис.4.3) свидетельствует, что при идеальной индуктивной нагрузке диапазон регулирования  $\alpha$  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.

### Тема 5.9. 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  $i_{e1}$  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  $i_{e1}$  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  $\alpha$ , 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  $\beta/\omega$ . 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  $\alpha$  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 5.10. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель

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  $\alpha$  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  $\alpha$  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

$$U_d = U_{do} \left[ + \cos(60^\circ + \alpha) \right] \quad (4.3)$$

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.

### Тема 5.11. Реверсивные преобразователи.

Реверсивными называют вентильные преобразователи, позволяющие изменять полярность напряжения на нагрузке. Они находят применение в электроприводе с двигателями постоянного тока, а также в некоторых электротехнологических установках.

На рис. 4.11 представлена схема реверсивного преобразователя, нагрузкой которого является обмотка якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В состав преобразователя входят 2 управляемых выпрямителя УВ-1, УВ-2 с блоками фазоимпульсного управления ФИУ1, ФИУ2, которые связаны с системой автоматического управления электроприводом. При питании якоря двигателя от УВ-1 имеет место правое, а от УВ-2 — левое вращение двигателя. В зависимости от требуемого быстродействия управление выпрямителями может быть раздельным или согласованным. Принцип раздельного управления показан на диаграмме (рис.4.12). До момента  $t_1$  управляющие импульсы от ФИУ-1 подавались на тиристоры УВ-1. Угол управления  $\alpha_1 < \pi/2$ , УВ1 работал в режиме выпрямления, полярность напряжения на якоре двигателя обеспечивала правое вращение со скоростью  $n^+$ . В момент времени  $t=t_1$  от управляющего устройства поступает команда на осуществление реверса. При этом прекращается подача управляющих импульсов на УВ-1 и происходит снижение тока якоря  $I^+$  до нулевого значения (момент времени  $t_2$ ). После паузы, необходимой для восстановления запирающих свойств тиристоров УВ-1, в момент времени  $t_3$  включается блок ФИУ-2, причем угол  $\alpha_2$  в начале устанавливается близким к  $180^\circ$ . Поскольку якорь продолжает вращаться, по отношению к УВ-2 двигатель становится генератором. Кинетическая

энергия движущихся частей механизма преобразуется в электрическую и в результате инвертирования возвращается в сеть. Происходит торможение. Чтобы ток якоря оставался неизменным, по мере снижения скорости система управления уменьшает угол  $\alpha_2$ . В момент остановки ( $t_4$ )  $\alpha_2 \approx 90^\circ$ . При дальнейшем снижении  $\alpha_2$  УВ-2 переходит в режим выпрямления, полярность напряжения на якоре изменяется, начинается разгон двигателя до скорости  $n$ .

При согласованном управлении управляющие импульсы подаются одновременно на оба выпрямителя, причем всегда выполняется условие  $\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$ . Тогда один из выпрямителей работает в режиме выпрямления, другой же — в режиме инвертирования. Принцип согласованного управления используют в высокоточных электроприводах с повышенным требованием к быстрдействию.

### Тема 5.12. Непосредственные преобразователи частоты.

Непосредственные преобразователи частоты осуществляют одноступенчатое, без звена постоянного тока, преобразование переменного тока промышленной частоты в переменный ток другой, более низкой частоты. Такое преобразование становится возможным, если для рассмотренного выше реверсивного преобразователя осуществить управление по циклическому закону. Если в интервале  $\frac{1}{2f_2} > t > 0$ , где  $f_2$  — частота преобразованного напряжения, управляющие импульсы поступают на УВ-1, а в интервале  $\frac{1}{f_2} > t > \frac{1}{2f_2}$  — на УВ-2, напряжение на нагрузке будет иметь частоту  $f_2$  и форму, близкую к прямоугольной (рис.4.13). Регулирование частоты осуществляется изменением продолжительности работы управляемых выпрямителей, а величины напряжения — регулированием углов  $\alpha_1, \alpha_2$ .

Чтобы выходное напряжение было близким к синусоидальному, углы управления  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  необходимо изменять по закону

$$\alpha_1 = \arccos v \sin 2\pi f_2 t$$

$$\alpha_2 = \arccos(-v \sin 2\pi f_2 t)$$

где  $v = \frac{U_{\text{вых.о}}}{U_{\text{вых.а}}}$  — коэффициент определяющий глубину регулирования выходного напряжения.

При активно-индуктивной нагрузке в течение части соответствующего полупериода каждый из управляемых выпрямителей работает в режиме инвертора, благодаря чему обеспечивается обмен реактивной энергией между нагрузкой и сетью.

С целью упрощения системы управления в ряде случаев изменение углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  осуществляется по трапецеидальному закону.

Теоретически высший предел регулирования частоты равен  $f_1 = f_2 = 50$  Гц. Однако на практике он обычно ограничивается величиной 20...25 Гц, поскольку при дальнейшем повышении частоты качество выходного напряжения заметно ухудшается.

Трехфазные преобразователи создаются на основе трех однофазных; взаимный сдвиг выходных напряжений на  $120^\circ$  обеспечивается системой управления.

Непосредственные преобразователи частоты используются в электроприводе с асинхронными и синхронными двигателями, обеспечивая их частотное регулирование, а также в некоторых электротехнологических установках.

### Тема 5.13. Вентильные регуляторы мощности.

Этот вид преобразователей используют для изменения мощности электроприемников, питающихся от сети переменного тока промышленной частоты.

На рис.4.14 показаны схемы однофазных регуляторов на двух встречно-параллельно включенных тиристорах и симисторе. Свойства обоих вариантов совершенно идентичны, однако симисторный вариант предпочтительней т.к. в нем использован всего один вентиль.

В зависимости от вида нагрузки возможны два способа регулирования: широтно-импульсный и фазовый. При первом способе управляющие импульсы подаются в моменты перехода тока через нулевые значения и в течение времени  $t_u$ , большим, чем период частоты сети (рис.4.15). В этом интервале на нагрузке выделяется максимальная мощность. Затем следует пауза  $t_n$ , в течении которой симистор закрыт, и мощность равна нулю. За счет изменения продолжительностей импульса и паузы можно регулировать среднее значение мощности в широких пределах

$$P = \gamma P_{\text{max}}, \text{ где } \gamma = \frac{t_u}{t_u + t_n} \text{ — коэффициент заполнения.}$$

Широтно-импульсный способ можно использовать для регулирования мощности электроприемников, обладающих большой инерцией, например, электропечей сопротивления.

При фазовом регулировании изменяют фазу управляющих импульсов. Если нагрузка активная, напряжение и ток нагрузки имеют форму усеченных полуволн синусоиды (рис.4.16а). Диапазон регулирования угла  $\alpha$  составляет  $0...180^\circ$ , мощность нагрузки изменяется при этом от максимальной до нуля. Действующее значение напряжения нагрузки

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}},$$

а мощность выделяемая в нагрузке

$$P_H = \frac{U_H^2}{R_H} = \frac{U^2}{R_H} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) \quad (4.4)$$

Для активно-индуктивной нагрузки диапазон регулирования составляет  $\varphi...180^\circ$ . При  $\alpha=\varphi$  напряжение на нагрузке равно напряжению сети (падением напряжения на вентиле можно пренебречь), ток нагрузки имеет неискаженную синусоидальную форму, а мощность максимальна (рис.4.16б). Увеличение угла  $\alpha$  приводит к тому, что напряжение становится кусочно-синусоидальным, а ток — прерывистым. Интервал проводимости в течение полупериода равен  $\pi-\alpha+\delta$ , где  $\delta$  — интервал, в течении которого вентиль проводит после изменения полярности напряжения. Действующее значение напряжения на нагрузке определяется интегрированием за интервал проводимости

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\delta} (\sqrt{2}U \sin \omega t)^2 d(\omega t)}, \quad (4.5)$$

Угол  $\delta$  зависит от соотношения между индуктивным и активным сопротивлениями нагрузки и может быть определен путем решения переходного процесса при включении RL цепи на синусоидальное напряжение.

Общий вид регулировочных характеристик, построенных в соответствии с (4.4) и (4.5) показан на рис.4.17.

Трехфазные регуляторы выполняются по схемам, варианты которых показаны на рис.4.18. От регуляторов мощности принципиально не отличаются вентильные коммутирующие аппараты (контакты и пускатели) выполняющие лишь функции включения и выключения нагрузки.

#### Тема 5.14. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть.

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  $i_{I(1)}$  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

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

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 $\kappa_n$
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

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

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

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

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

При фазовом регулировании выпрямленного напряжения кривая тока отстает от напряжения на угол  $\alpha$ , 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  $U_{d\alpha} = U_{do} \cos \alpha$ , то  $\cos \alpha = U_{d\alpha} / U_{do}$ . Поэтому глубокое регулирование выпрямленного напряжения нежелательно.

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

### Тема 5.15. Автономные вентильные преобразователи

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.

#### Тема 5.16. Способы искусственной коммутации однооперационных тиристорov.

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 тиристорv. 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 тиристорv. 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.

#### Тема 5.17. Принципы схемной реализации автономных инверторов.

В зависимости от количества и схемы соединения вентиляей 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  $120^\circ$ .

### Тема 5.18. 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 быстродействие, 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 запираению, 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  $i_n$ , представляет сумму коллекторных токов транзисторов  $i_{T1-2}$  и  $i_{T3-4}$ . 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  $\psi$  (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, см<sup>2</sup>;

$w_1$  — число витков первичной обмотки трансформатора.

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

### Тема 5.19. Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах.

На рис.5.8 представлен инвертор напряжения, выполненный по полумостовой схеме. Элементами принудительной коммутации однооперационных тиристорных 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 тиристорам 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.

### Тема 5.20. 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 тиристоров VS1, VS2 должна быть меньше резонансной частоты цепи нагрузки. Форма напряжения на цепи нагрузки  $u_{ao}$  и тока показана на рис.5.9б. Запирание тиристоров происходит за счет естественного спада тока до нулевого значения. Форма полуволн тока практически синусоидальна, между полуволнами имеются бестоковые паузы, необходимые для восстановления тиристоров. 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 тиристоров, 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 тиристоров.

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  $f > f_0/2$  (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  $f=f_0$ . Однако при этом время, отводимое для восстановления тиристор, становится равным нулю, что привело бы к опрокидыванию инвертора. Чтобы этого не произошло, продолжительность интервала, в течение которого к тиристоры приложено обратное напряжение, равное прямому падению напряжения на диоде, должно быть не меньше времени восстановления тиристора

$$t_3 - t_2 = \frac{1}{2f} - \frac{1}{2f_0} \geq t_6.$$

Из этого условия получено выражение для максимальной частоты инвертирования

$$f_{max} = \frac{f_0}{1 + 2t_6 f_0}.$$

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).

### Тема 5.21. 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 5.22. 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

$$U_{н\ \phi} = \frac{1}{T} \int_0^T E dt = E \frac{t_n}{T} = \gamma E \quad (5.1)$$

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

Действующее значение напряжения

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt} = \sqrt{\gamma} E, \quad (5.2)$$

и мощность нагрузки

$$P_n = \gamma \frac{E^2}{R_n}, \quad (5.3)$$

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  $0...t_n$  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  $\tau = \frac{L_n}{R_n}$  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  $\gamma=0...1$ , 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  $180^\circ$ , 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

### 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.	Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов	2	-
2	3.	Исследование характеристик биполярного транзистора	2	-
<b>ИТОГО</b>			<b>4</b>	-

### 4.4. Семинары/ практические занятия

Учебным планом не предусмотрено

### 4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа

Контрольная работа. Предварительный расчет и выбор тиристоров для управляемого выпрямителя

Цель: закрепление обучающимися основных разделов курса, а также проверка степени усвоения теоретического материала дисциплины

Структура: Контрольная работа должна быть выполнена в виде расчетно-пояснительной записки и чертежей электрических схем согласно заданию.

Основная тематика:

Полупроводниковые (вентильные) преобразователи электрической энергии являются одним из основных нагрузочных элементов электрических сетей, и их работа во многом определяет режимы работы сетей. Вентильные преобразователи используют для питания электроприводов, электротехнологических установок, для возбуждения синхронных машин. На основе вентильных преобразователей создаются линии электропередач постоянного тока большой мощности и вставки постоянного тока

Предполагается, что задача, выполненная на эту тему поможет сформировать у обучающихся прочную теоретическую и практическую базы в области устройства, функционирования и применения силовой полупроводниковой техники.

Выдача задания, прием контрольной работы проводится в соответствии с календарным учебным графиком

Оценка	Критерии оценки контрольной работы
отлично	Контрольная работа сдана в первые две недели защит. В контрольной работе все задания выполнены правильно и в полном объеме. Решения задач содержат пояснения к расчетам. Вычисления приведены в развернутом виде, аргументированы, содержат графики. Электрические схемы выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД. Дан полный ответ на контрольный вопрос.
хорошо	Контрольная работа сдана с третью по четвертую недели защит или контрольная работа содержит небольшие неточности в оформлении и расчетах или нет полного ответа на контрольный вопрос.
удовлетворительно	Контрольная работа сдана вне срока приема контрольных работ, но во время экзаменационной сессии или содержит значительное количество ошибок, или 30 % заданий не выполнено
неудовлетворительно	Контрольная работа не сдана в установленный срок или 50 % заданий не выполнено

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

№, наименование разделов дисциплины	Компетенции Кол-во часов	Компетенция		$\Sigma$ комп.	$t_{ср}$ , час	Вид учебных занятий	Оценка результатов
		ОПК-2	ПК-2				
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Введение	2,1	+	+	2	1,05	Лк	зачет
2. Полупроводниковые приборы	25,1	+	+	2	12,55	Лк, ЛР	зачет
3. Биполярные транзисторы	11,3	+	+	2	5,65	Лк, ЛР	зачет
4. Полевые транзисторы	9,3	+	+	2	4,65	Лк	зачет
5. Преобразование электрической энергии	56,2	+	+	2	28,1	Лк, ЛР	зачет
<b>всего часов</b>	<b>104</b>	<b>52</b>	<b>52</b>	<b>2</b>	<b>52</b>		

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

1. Электроника и микропроцессорная техника. Дипломное проектирование систем автоматизации и управления : учебник для вузов / Под ред. В. И. Лачина. - Ростов-на-

Дону : Феникс, 2007. - 576 с.

2. Современная электроника: учебное пособие / В. А. Анякин, А. В. Ралдугин, Р. Ю. Шаварин. - Братск : БрГУ, 2012. - 451 с. - Б. ц.

3. 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 (Лк, ЛР)	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
<b>Основная литература</b>				
1.	Электроника и микропроцессорная техника. Дипломное проектирование систем автоматизации и управления : учебник для вузов / Под ред. В. И. Лачина. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. - 576 с.	Лк, ЛР	25	1
<b>Дополнительная литература</b>				
2.	Анякин В.А. Современная электроника: учебное пособие / В. А. Анякин, А. В. Ралдугин, Р. Ю. Шаварин. - Братск: БрГУ, 2012. - 451 с	Лк, ЛР	105	1
3.	Вентильные преобразователи. Основы силовой полупроводниковой техники : учеб. пособие / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2007. - 83 с. <a href="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">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</a>	Лк, ЛР	113+ЭР	1
4.	Вентильные преобразователи: методические указания к лабораторному практикуму / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2008. - 48 с. <a href="http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Энергетика%20-%20Автоматика/Саламатов%20Г.П.%20Вентильные%20преобразователи.2008.pdf">http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Энергетика%20-%20Автоматика/Саламатов%20Г.П.%20Вентильные%20преобразователи.2008.pdf</a>	ЛР	102+ЭР	1
5.	Астапенко Н.А. Предварительный расчет и выбор тиристорov для управляемого выпрямителя: методические указания к выполнению самостоятельной работы. - Братск: Изд-во БрГУ, 2013. - 13 с.	кр	100	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=](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--p1ai/how-to-search/> .

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

### 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ

#### Лабораторная работа № 1 Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов

Цель работы: ознакомиться с принципом работы, основными характеристиками и применением полупроводниковых диодов: выпрямительного диода, стабилитрона, диода Шоттки и светоизлучающего диода.

Порядок выполнения:

1. Экспериментальное исследование выпрямительного диода

1.1. Собрать схему для исследования выпрямительного диода VD1 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X2 и X6. Для измерения выходного тока между гнездами X1 и X10 включить миллиамперметр на пределе измерения 100 мА

( $\times 100$ ), для измерения анодного напряжения между гнездами X3 и X15 включить мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения (рис.\*). Включить питание стенда и установить переключатель SA1 в позицию «+».

1.2. Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключатель SA1 сначала в позицию «+», а затем в позицию «-». Увеличивая входное напряжение с помощью потенциометра RP1 от 0, измерять ток и напряжение на диоде. Результаты измерений занести в табл. 2 и 3. Выключить электропитание. Установить потенциометр RP1 в нулевое положение.

1.3. По полученным значениям построить вольтамперную характеристику выпрямительного диода.

2. Экспериментальное исследование диода Шоттки

2.1. Собрать схему для исследования диода Шоттки VD2 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X3 и X7. Выполнить п.п. 3.1.1., 3.1.2. и 3.1.3. для диода Шоттки. Сравнить вольтамперные характеристики выпрямительного диода и диода Шоттки.

3. Исследование влияния величины напряжения на светоизлучающем диоде на световую эмиссию

3.1. Собрать схему для исследования светодиода VD3 на постоянном токе. Подключить питание модуля диодов переключателем SA1 в позицию «+» и увеличивая положительное входное напряжение от 0 с помощью потенциометра RP1, измерять напряжение на светодиоде и ток светодиода. Установить при этом степень светоизлучения (отсутствует, слабое, среднее, сильное). Результаты занести в табл.6.

4. Экспериментальное исследование стабилитрона

4.1. Собрать схему для исследования стабилитрона VD4 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X5 и X9. Выполнить пункты 3.1.2. для стабилитрона.

Результаты измерений занести в табл. 7.

Выключить электропитание. Установить потенциометр RP1 в нулевое положение

4.2. По полученным значениям построить вольтамперную характеристику стабилитрона, определить напряжение стабилизации и величину дифференциального сопротивления  $r_{\text{диф}}$ .

4.3. Собрать схему параметрического стабилизатора напряжения. Включить питание стенда и установить переключатель SA1 в позицию «-».

4.4. Изменяя величину входного напряжения от 0 с помощью потенциометра RP1 снять зависимость величины выходного напряжения от величины входного напряжения  $U_{\text{ст}}=f(U_{\text{вх}})$ . Результаты занести в табл.6.

4.5. Определить коэффициент стабилизации  $K_{\text{ст}}$  ст стабилизатора на участке стабилизации:  
 $K_{\text{ст}}=(\Delta U_{\text{вх}})/(\Delta U_{\text{ст}})$ .

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе

должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения об исследуемых полупроводниковых приборах.
4. Электрические схемы проведения экспериментов.
5. Таблицы результатов экспериментов.
6. Вольтамперные характеристики исследованных полупроводниковых приборов.
7. Выводы о свойствах исследованных полупроводниковых приборов.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 2.2, 2.6, 2.7, 2.9 раздела 2.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Чем отличаются полупроводники типа p и n?
2. Какими свойствами обладает p-n переход?
3. Объясните вид ВАХ p-n перехода.
4. Поясните вид ВАХ стабилитрона. Какова полярность напряжения в нормальном режиме работы стабилитрона?
5. В чем отличие выпрямительного диода и диода Шоттки?
6. Какими параметрами характеризуется стабилитрон?
7. Как работает параметрический стабилизатор напряжения? Для чего нужен балластный резистор?
8. Как изменится напряжение стабилизатора напряжения при повышении температуры?
9. Что такое коэффициент стабилизации? Какой его физический смысл?
10. От чего зависит яркость свечения светодиода?

## Лабораторная работа № 2 Исследование характеристик биполярного транзистора

Цель работы: ознакомиться с работой, основными характеристиками и применением биполярного транзистора.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с лабораторным модулем для исследования транзисторов. Собрать схему для снятия характеристик биполярного транзистора (рисунок). Между гнездами X2 и X6 включить миллиамперметр на пределе измерения 100 мкА и соединить перемычкой гнезда X9 - X11. Между гнездами X1 - X4 включить второй миллиамперметр на пределе измерения 10 мА. Соединить перемычкой гнезда X3 - X7. Между гнездами X2 - X5 и X4 - X16 включить мультиметры в режиме измерения постоянного напряжения. Тумблер SA2 установить в нижнее положение.

2. Экспериментальное исследование характеристик биполярного транзистора.

2.1. Снять статическую характеристику прямой передачи по току  $I_{к}=f(I_{б})$  при  $U_{(вх)}$  равным заданному значению  $E_{(к)}$  и  $R_{(к)}=0$ . Для этого дополнительно поставить перемычку между гнездами X1-X3. Включить «Модуль питания», включить тумблер «Питание» на модуле «Транзисторы». Экспериментальные результаты записать в табл.3. При снятии характеристики следить за постоянством напряжения  $U_{(кэ)}$ .  $U_{(к)}=U_{(п)}=11$  В

2.2. Снять характеристику прямой передачи по току при наличии нагрузки. Убрать перемычку между гнездами X1-X3. С помощью переключателя SA1 установить заданное значение резистора R2. С помощью потенциометра RP1 установить ток базы, равный нулю, а с помощью потенциометра RP2 установить заданное значение  $E_{(к)}$ . В дальнейшем ручку регулятора RP2 не трогать. В области вблизи насыщения точки снимать чаще. Экспериментальные результаты записать в табл.4. Выключить тумблер «Питание». Построить экспериментальные характеристики.

2.3. По построенной в п. 2.2 характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальный ток  $I_{(б max)}$  при котором еще обеспечивается линейное усиление.

2.4. Снять выходные статические характеристики транзистора  $I_{к}=f(U_{кэ})$  при  $I_{б}=const$ . Для этого дополнительно установите перемычку X1-X3. Включить питание модуля. Установить потенциометром RP1  $I_{б}=0$ . Изменяя напряжение  $U_{кэ}$  с помощью потенциометра RP2 снять выходные характеристики. Экспериментальные данные занести в табл.5. Повторить измерения еще для двух значений тока базы.

Форма отчетности:

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

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения о биполярных транзисторах.
4. Электрические схемы проведения экспериментов.

5. Таблицы результатов экспериментов.
6. Экспериментальные характеристики исследованного биполярного транзистора.
7. Выводы о свойствах исследованного биполярного транзистора.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 3,2 раздела 3.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Как работает биполярный транзистор?
2. Какие существуют схемы включения биполярного транзистора?
3. Каковы требования к входному и выходному сопротивлениям усилителей в схемах включения с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК)?
4. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору n-p-n типа при различных схемах включения?
5. Как выглядят входные и выходные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
6. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она изменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим эмиттером и постройте его временные диаграммы.
9. Что такое рабочая точка покоя и как ее выбрать? Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
10. Что такое ключевой режим работы транзистора, каковы его особенности?

## **9.2. Методические указания по выполнению контрольной работы**

### **Контрольная работа      Предварительный расчет и выбор тиристорov для управляемого выпрямителя**

Цель работы: закрепление студентами основных разделов курса, а также проверка степени усвоения теоретического материала дисциплины.

Задание:

Задание содержит теоретический вопрос и практическую задачу. Выбор варианта производится по указанию преподавателя.

Форма отчетности:

1. Студенты заочной формы обучения текстовую часть контрольной работы могут выполнять либо в виде рукописного текста на белых листах формата А4, либо выполнить на компьютере в формате ODF (ГОСТ Р ИСО/ МЭК 2630 – 2010), либо в формате MSOffice. (Допускается выполнение контрольных работ в обыкновенной ученической тетради).

К представленному на проверку заданию предъявляются следующие требования:

1. Текст задания должен быть переписан полностью.
2. Теоретический вопрос должен быть рассмотрен подробно, приведены необходимые схемы, математические выражения, выводы.
3. Решение задачи должно сопровождаться пояснениями производимых действий и полученных результатов.
4. Рисунки, схемы, диаграммы должны быть выполнены с использованием чертежных инструментов.
5. Буквенно-цифровые обозначения элементов схем, физические величины и единицы их измерения должны соответствовать требованиям ЕСКД.
6. Расчеты необходимо выполнять в соответствии с правилами приближенных вычислений.
7. Конечные результаты задач должны быть выделены из общего текста.
8. Относительная погрешность вычислений не должна превышать 5%.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по разделам 2,5

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2,3]

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



1. Microsoft Imagine Premium (ОС Windows 7 Professional);
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level
3. Kaspersky Endpoint Security для бизнеса - Расширенный Russian Edition. 1000-1499 Node 1 year Educational Renewal License;
4. OpenOffice
5. LibreOffice
6. Adobe Reader

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

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР</i>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Лк	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Плакаты. Демонстрационные образцы: полупроводниковые диоды, транзисторы, резисторы, тиристоры, конденсаторы, интегральные микросхемы	№№ 1 - 17
ЛР	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Учебно-лабораторный стенд ЭИСЭС-1-Н-Р Осциллограф С1-60	№№ 1,2
СР	Читальный зал №3	Оборудование 15- CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-

### **Приложение 1**

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

#### **1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

<b>№ компетенции</b>	<b>Элемент компетенции</b>	<b>Раздел</b>	<b>Тема</b>	<b>ФОС</b>
ОПК - 2	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	<b>1. Введение</b>	1.1. Роль электроники в современном мире. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электронно-дырочный переход и его свойства.	Вопрос к зачету №1
		<b>2. Полупроводниковые приборы</b>	2.1. Полупроводниковые резисторы	Вопрос к зачету №№ 2-12
			2.2. Выпрямительные диоды	
			2.3. Импульсные диоды	
			2.4. Туннельные диоды	
			2.5. Обращенные диоды	
			2.6. Диоды Шоттки	
			2.7. Стабилитроны	
			2.8. Варикапы	
			2.9. Светодиоды	
			2.10. Фотодиоды	
2.11. Тиристоры				
<b>3. Биполярные транзисторы</b>	3.1. Структура и типы биполярных транзисторов	Вопрос к зачету №№ 13-15		
	3.2. Режимы работы биполярных транзисторов			

			3.3. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	
		<b>4. Полевые транзисторы</b>	4.1. Структура и типы полевых транзисторов 4.2. Рабочий процесс полевых транзисторов 4.3. МДП-транзисторы	Вопрос к зачету №№ 16-18
		<b>5. Преобразование электрической энергии</b>	5.1. Виды преобразования. Статическое преобразование 5.2. Неуправляемые выпрямители 5.3. Трехфазный нулевой выпрямитель 5.4. Трехфазный мостовой выпрямитель 5.5. 12-ти импульсные выпрямители 5.6. Сравнительная характеристика схем выпрямителей 5.7. Коммутация вентиля и внешняя характеристика выпрямителей 5.8. Управляемые выпрямители 5.9. Инверторный режим однофазного управляемого выпрямителя 5.10. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель 5.11. Реверсивные преобразователи 5.12. Непосредственные преобразователи частоты 5.13. Вентильные регуляторы мощности 5.14. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть 5.15. Автономные вентильные преобразователи 5.16. Способы искусственной коммутации однооперационных тиристоров 5.17. Принципы схемной реализации автономных инверторов 5.18. Транзисторные инверторы 5.19. Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах 5.20. Резонансные инверторы 5.21. Улучшение формы выходного напряжения автономных преобразователей 5.22. Импульсные регуляторы постоянного тока	
<i>ПК-2</i>	Способность обрабатывать результаты экспериментов	<b>1. Введение</b>	1.1. Роль электроники в современном мире. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электронно-дырочный переход и его свойства.	Вопрос к зачету №1
		<b>2. Полупроводниковые приборы</b>	2.1. Полупроводниковые резисторы 2.2. Выпрямительные диоды	Вопрос к зачету №№ 2-12

		2.3. Импульсные диоды	
		2.4. Туннельные диоды	
		2.5. Обращенные диоды	
		2.6. Диоды Шоттки	
		2.7. Стабилитроны	
		2.8. Варикапы	
		2.9. Светодиоды	
		2.10. Фотодиоды	
		2.11. Тиристоры	
	<b>3. Биполярные транзисторы</b>	3.1. Структура и типы биполярных транзисторов	Вопрос к зачету №№ 13-15
		3.2. Режимы работы биполярных транзисторов	
		3.3. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	
	<b>4. Полевые транзисторы</b>	4.1. Структура и типы полевых транзисторов	Вопрос к зачету №№ 16-18
		4.2. Рабочий процесс полевых транзисторов	
		4.3. МДП-транзисторы	
	<b>5. Преобразование электрической энергии</b>	5.1. Виды преобразования. Статическое преобразование	Вопрос к зачету №№ 19-41
		5.2. Неуправляемые выпрямители	
		5.3. Трехфазный нулевой выпрямитель	
		5.4. Трехфазный мостовой выпрямитель	
		5.5. 12-ти пульсные выпрямители	
		5.6. Сравнительная характеристика схем выпрямителей	
		5.7. Коммутация вентиля и внешняя характеристика выпрямителей	
		5.8. Управляемые выпрямители	
		5.9. Инверторный режим однофазного управляемого выпрямителя	
		5.10. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель	
		5.11. Реверсивные преобразователи	
		5.12. Непосредственные преобразователи частоты	
		5.13. Вентильные регуляторы мощности	
		5.14. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть	
		5.15. Автономные вентильные преобразователи	
		5.16. Способы искусственной коммутации однооперационных тиристоров	
		5.17. Принципы схемной реализации автономных инверторов	
		5.18. Транзисторные инверторы	
		5.19. Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах	
		5.20. Резонансные инверторы	

			5.21. Улучшение формы выходного напряжения автономных преобразователей	
			5.22. Импульсные регуляторы постоянного тока	

## 2. Вопросы к зачету

№ п/п	Компетенции		ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1	ОПК-2	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Собственная и примесная проводимости полупроводников.	1. Введение
			2. Электронно-дырочный переход и его свойства	
			3. Полупроводниковые резисторы	2. Полупроводниковые приборы
			4. Выпрямительные диоды	
			5. Импульсные диоды	
			6. Туннельные диоды	
			7. Диоды Шоттки	
			8. Стабилитроны	
			9. Варикапы	
			10. Обращенные диоды	
			11. Светодиоды	
			12. Фотодиоды	
			13. Тиристоры	
			14. Структура и типы биполярных транзисторов	3. Биполярные транзисторы
			15. Режимы работы биполярных транзисторов	
			16. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	4. Полевые транзисторы
			17. Структура и типы полевых транзисторов	
			18. Рабочий процесс полевых транзисторов	
			19. МДП-транзисторы	
			20. Виды преобразования. Статическое преобразование	5. Преобразование электрической энергии
			21. Неуправляемые выпрямители	
			22. Трехфазный нулевой выпрямитель	
			23. Трехфазный мостовой выпрямитель	
			24. 12-ти пульсные выпрямители	
			25. Сравнительная характеристика схем выпрямителей	
			26. Коммутация вентиля и внешняя характеристика выпрямителей	
			27. Управляемые выпрямители	
			28. Инверторный режим однофазного управляемого выпрямителя	
			29. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель	
			30. Реверсивные преобразователи	
			31. Непосредственные преобразователи частоты	
			32. Вентильные регуляторы мощности	
			33. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть	
			34. Автономные вентильные преобразователи	

			<p>35. Способы искусственной коммутации однооперационных тиристоров</p> <p>36. Принципы схемной реализации автономных инверторов</p> <p>37. Транзисторные инверторы</p> <p>38. Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах</p> <p>39. Резонансные инверторы</p> <p>40. Улучшение формы выходного напряжения автономных преобразователей</p> <p>41. Импульсные регуляторы постоянного тока</p>		
2	ПК-2	Способность обрабатывать результаты экспериментов	1. Собственная и примесная проводимости полупроводников.	1. Введение	
			2. Электронно-дырочный переход и его свойства		
			3. Полупроводниковые резисторы	2. Полупроводниковые приборы	
			4. Выпрямительные диоды		
			5. Импульсные диоды		
			6. Туннельные диоды		
			7. Диоды Шоттки		
			8. Стабилитроны		
			9. Варикапы		
			10. Обращенные диоды		
			11. Светодиоды		
			12. Фотодиоды		
			13. Тиристоры		
			14. Структура и типы биполярных транзисторов	3. Биполярные транзисторы	
			15. Режимы работы биполярных транзисторов		
			16. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	4. Полевые транзисторы	
			17. Структура и типы полевых транзисторов		
			18. Рабочий процесс полевых транзисторов		
			19. МДП-транзисторы		
			20. Виды преобразования. Статическое преобразование		5. Преобразование электрической энергии
			21. Неуправляемые выпрямители		
			22. Трехфазный нулевой выпрямитель		
			23. Трехфазный мостовой выпрямитель		
			24. 12-ти пульсные выпрямители		
			25. Сравнительная характеристика схем выпрямителей		
			26. Коммутация вентиля и внешняя характеристика выпрямителей		
			27. Управляемые выпрямители		
			28. Инверторный режим однофазного управляемого выпрямителя		
			29. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель		
			30. Реверсивные преобразователи		
			31. Непосредственные преобразователи частоты		
			32. Вентильные регуляторы мощности		
			33. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть		
			34. Автономные вентильные преобразователи		
			35. Способы искусственной коммутации		

		однооперационных тиристоров	
		36. Принципы схемной реализации автономных инверторов	
		37. Транзисторные инверторы	
		38. Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах	
		39. Резонансные инверторы	
		40. Улучшение формы выходного напряжения автономных преобразователей	
		41. Импульсные регуляторы постоянного тока	

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>Знать</b> (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физические процессы, лежащие в основе принципов действия полупроводниковых и оптоэлектронных приборов</li> </ul> <p>(ПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– виды и средства измерений для определения статических и динамических параметров электронных приборов</li> </ul> <p><b>Уметь</b> (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– определять дифференциальные параметры электронных приборов по их статическим характеристикам</li> </ul> <p>(ПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применять средства измерений для определения параметров электронных приборов;</li> <li>– анализировать и применять полученную информацию</li> </ul> <p><b>Владеть</b> (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных</li> </ul>	<p><b>зачтено</b></p>	<p>Обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал, дал правильные ответы на дополнительные вопросы</p>
	<p><b>не зачтено</b></p>	<p>Обучающийся допустил существенные ошибки при ответе на вопросы, на дополнительные вопросы давал неправильные ответы; все вышеуказанные разделы не усвоены.</p>

<p>приборов и их компьютерного исследования по электрическим моделям;</p> <p>(ПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– методиками выполнения измерений для определения статических и динамических параметров электронных приборов;</li> <li>– методами математического анализа для статистической обработки результатов измерений</li> </ul>		
---	--	--

#### **4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности**

Дисциплина Электроника направлена на формирование знаний элементной базы электроники, изучение принципов действия, характеристик, параметров и особенностей устройства важнейших полупроводниковых и оптоэлектронных приборов применяемых в преобразовательных устройствах для питания электроприводов, электротехнологических установок и возбуждения синхронных машин при производстве электроэнергии.

Изучение дисциплины Электроника предусматривает:

- лекции,
- лабораторные работы,
- контрольную работу,
- самостоятельную работу,
- зачет.

В ходе освоения раздела 1 «Введение» студенты должны уяснить:

- собственную и примесную проводимости полупроводников,
- физические основы электронно-дырочного перехода и его свойства.

В ходе освоения раздела 2 «Полупроводниковые приборы» студенты должны уяснить:

- конструкцию, рабочий процесс, параметры, систему обозначения основных полупроводниковых приборов.

В ходе освоения раздела 3 «Биполярные транзисторы» студенты должны уяснить:

- конструкцию, рабочий процесс, параметры, схемы включения биполярных транзисторов.

В ходе освоения раздела 4 «Полевые транзисторы» студенты должны уяснить:

- конструкцию, рабочий процесс, параметры, схемы включения полевых транзисторов.

В ходе освоения раздела 5 «Преобразование электрической энергии» студенты должны уяснить:

- виды преобразования электрической энергии, схемную реализацию различных преобразователей, знать сравнительные характеристики для обеспечения правильной работы электротехнологических установок.

Необходимо овладеть навыками и умениями применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при реализации экспериментальных и практических задач.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется на первом этапе обратить внимание на основные физические и химические процессы полупроводников

Овладение ключевыми понятиями является основой для успешного усвоения работы всех функциональных устройств созданных на базе полупроводников.

При подготовке к зачету рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Собственная и примесная проводимости полупроводников.
2. Электронно-дырочный переход и его свойства
3. Полупроводниковые резисторы
4. Выпрямительные диоды
5. Импульсные диоды
6. Туннельные диоды
7. Диоды Шоттки
8. Стабилитроны
9. Варикапы
10. Обращенные диоды
11. Светодиоды
12. Фотодиоды
13. Тиристоры
14. Структура и типы биполярных транзисторов
15. Режимы работы биполярных транзисторов
16. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.
17. Структура и типы полевых транзисторов
18. Рабочий процесс полевых транзисторов
19. МДП-транзисторы
20. Виды преобразования. Статическое преобразование
21. Неуправляемые выпрямители
22. Трехфазный нулевой выпрямитель
23. Трехфазный мостовой выпрямитель
24. 12-ти пульсные выпрямители
25. Сравнительная характеристика схем выпрямителей
26. Коммутация вентиля и внешняя характеристика выпрямителей
27. Управляемые выпрямители
28. Инверторный режим однофазного управляемого выпрямителя
29. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель
30. Реверсивные преобразователи
31. Непосредственные преобразователи частоты
32. Вентильные регуляторы мощности
33. Влияние вентильных преобразователей на питающую сеть
34. Автономные вентильные преобразователи
35. Способы искусственной коммутации однооперационных тиристоров
36. Принципы схемной реализации автономных инверторов
37. Транзисторные инверторы
38. Инверторы напряжения на однооперационных тиристорах



39. Резонансные инверторы

40. Улучшение формы выходного напряжения автономных преобразователей

41. Импульсные регуляторы постоянного тока

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления о полупроводниковых диодах, светодиодах, стабилитронах, диодах Шоттки, об усилителях на основе биполярных транзисторов.

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, лекции с разбором конкретных ситуаций, просмотр и обсуждение видеоматериалов) в сочетании с внеаудиторной работой.

## **АННОТАЦИЯ рабочей программы дисциплины**

### **Электроника**

#### **1. Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения дисциплины является: формирование знаний элементной базы электроники, применяемой в преобразовательных устройствах для питания электроприводов, электротехнологических установок и для возбуждения синхронных машин. Изучение принципов действия, характеристик, параметров и особенностей устройства важнейших полупроводниковых и оптоэлектронных приборов.

Задачей изучения дисциплины является: ознакомление обучающихся с современным уровнем развития физических основ полупроводниковой электроники с учетом использования перспективных полупроводниковых материалов; изучение физических процессов образования свободных носителей заряда в полупроводниках; изучение физических процессов, происходящих на границе двух полупроводников, на границе металл-полупроводник, на границе диэлектрик - полупроводник; изучение электрических параметров и характеристик электронных устройств.

#### **2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк- 4 час; ЛР- 6 час; СР- 94 час.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часа, 3 зачетных единицы.

2.2 Основные разделы дисциплины:

- 1 - Введение
- 2 - Полупроводниковые приборы
- 3 - Биполярные транзисторы
- 4 - Полевые транзисторы
- 5 - Преобразование электрической энергии

#### **3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-2 Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач.

ПК-2 Способность обрабатывать результаты экспериментов

**3. Вид промежуточной аттестации:** зачет

**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 2014 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для заочной формы обучения от «3» июля 2018г. №413

**Программу составил:**

Астапенко Н.А. ст.преподаватель кафедры ЭиЭ \_\_\_\_\_

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «28» декабря 2018 г., протокол №5

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 «28» декабря 2018 г., протокол №5

Председатель методической комиссии факультета \_\_\_\_\_ А.Д.Ульянов

**СОГЛАСОВАНО:**

Начальник  
учебно-методического управления \_\_\_\_\_ Г.П. Нежевец

Регистрационный № \_\_\_\_\_