



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДО

\_\_\_\_\_ С.И. Качин

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания и индивидуальные задания  
для студентов ИДО, обучающихся по направлению  
140400 «Электроэнергетика и электротехника»

*Составители*

**В.П. Петрович, А.В. Глазачев**

Направление	140400
Семестр	2
Кредиты	4
Лекции, часов	8
Лабораторные занятия, часов	4
Практические занятия, часов	4
Индивидуальные задания	№ 1
Самостоятельная работа, часов	94
Формы контроля	Зачёт

Издательство

Томского политехнического университета  
2012



УДК 621.38:53(076.5)

ББК 32.85:22.3я73

Физические основы электроники: метод. указ. и индивид. задания для студентов ИДО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / сост. В.П. Петрович, А.В. Глазачев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 39 с.

Методические указания и индивидуальные задания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры электрооборудования и электропривода.

Зав. кафедрой ЭПЭО  
доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ Ю.Н. Дементьев

### **Аннотация**

Методические указания и индивидуальные задания по дисциплине «Физические основы электроники» предназначены для студентов ИДО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника». Данная дисциплина изучается в одном семестре.

Приведено содержание основных тем дисциплины, указаны темы лабораторных работ. Приведены варианты заданий для индивидуальной домашней работы. Даны методические указания по выполнению индивидуального задания.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>5</b>
Тема 1. Физические основы работы полупроводниковых приборов .....	5
Тема 2. Полупроводниковые диоды .....	7
Тема 3. Биполярные транзисторы .....	8
Тема 4. Полевые транзисторы .....	10
Тема 5. Тиристоры .....	11
Тема 6. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы .....	12
<b>3. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>14</b>
3.1. Перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину по КЗФ .....	14
3.2. Перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину с применением ДОТ .....	16
<b>4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ .....</b>	<b>17</b>
4.1. Общие методические указания .....	17
4.1.1. Требования к оформлению индивидуального задания .....	17
4.2. Варианты индивидуального задания и методические указания .....	18
<b>5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ .....</b>	<b>29</b>
5.1. Требования для сдачи экзамена .....	29
5.2. Вопросы для подготовки к экзамену .....	29
5.3. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по КЗФ .....	31
5.4. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину с применением ДОТ .....	32
<b>6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>37</b>



## **1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ**

Дисциплина «Физические основы электроники» ориентирована на изучение устройства, физических принципов работы, характеристик и параметров основных компонентов современной электроники.

Дисциплина относится к вариативной части математического и естественнонаучного цикла и является пререквизитом дисциплины «Электронная и микропроцессорная техника, силовые преобразователи электрической энергии».

Для освоения дисциплины необходимы знания по дисциплинам «Математика» и «Физика».

Для успешного освоения дисциплины студенты должны знать:

- электричество и магнетизм (электрический ток, сила тока, вектор плотности тока, закон Ома для участка цепи, сопротивление проводников);
- квантовую физику (уровень Ферми; число и плотность числа электронных состояний в зоне; заполнение зон; деление твердых тел на диэлектрики, металлы, полупроводники; квантовая теория электропроводности и теплопроводности металлов; электропроводность полупроводников; спин электрона; принцип Паули; заполнение электронных оболочек);
- методы решения дифференциальных уравнений; методы расчета токов и напряжений для простейших схем.

С данной дисциплиной может изучаться дисциплина «Теоретические основы электротехники». Параллельное изучение дисциплин обеспечивает лучшее усвоение материала. Знание содержания дисциплины необходимо для освоения дисциплин общепрофессионального и профессионального циклов.



## 2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ

### Тема 1. Физические основы работы полупроводниковых приборов

Предмет дисциплины и ее задачи. Модели структур полупроводников. Ковалентная связь. Кристаллическая решетка. Электроны и дырки. Энергетические зоны. Механизм собственной электропроводности полупроводника. Понятия «валентная зона», «зона проводимости», «запрещённая зона», «кристаллическая решётка», «дырка», «рекомбинация носителей заряда», «время жизни носителей электрического заряда», «длина свободного пробега электрона», «дрейфовая скорость носителей заряда», «подвижность носителей заряда», «удельная электрическая проводимость», «собственная электрическая проводимость».

Распределение электронов по энергетическим уровням при неизменном температурном состоянии полупроводника. Квантовая статистика Ферми – Дирака. Функция распределения Ферми для вероятности заполнения электроном энергетического уровня. Функция распределения Ферми для вероятности заполнения дыркой энергетического уровня.

Механизм примесной электропроводности полупроводника. Донорная примесь. Акцепторная примесь. Вырожденные полупроводники. Процессы переноса зарядов в полупроводнике: дрейфовый и диффузионный токи.

Физика явлений в  $p$ - $n$ -переходе. Определение  $p$ - $n$ -перехода. Рекомбинация носителей электрического заряда. Поле потенциального барьера и контактная разность потенциалов. Запирающий слой. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода. Влияние концентрации примесей на высоту потенциального барьера. Вентильное свойство  $p$ - $n$ -перехода. Прямой ток  $p$ - $n$ -перехода. Инжекция носителей заряда. Обратный ток  $p$ - $n$ -перехода. Экстракция носителей заряда.

Вольтамперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода. Пробои  $p$ - $n$ -перехода: электрический пробой  $p$ - $n$ -перехода (туннельный пробой, лавинный пробой); тепловой пробой; поверхностный пробой.

Ёмкость  $p$ - $n$ -перехода. Барьерная ёмкость. Диффузионная ёмкость.

Контакт «металл-полупроводник». Контактная разность потенциалов. Инверсный слой. Обогащённый слой. Обеднённый слой.

Контакт между полупроводниками одного типа проводимости. Омические контакты «металл-полупроводник». Свойства и применение. Гетеропереходы.

Свойства омических переходов.



**Рекомендуемая литература:** [1, раздел 1], [2, с. 9–44].

### Методические указания

Необходимо изучить физические принципы работы полупроводниковых приборов, используя уже изученный раздел курса «Физика» «Физика твердого тела».

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое разрешенные и запрещенные энергетические зоны?
2. Что такое уровень Ферми?
3. Как влияет концентрация примеси на положение уровня Ферми?
4. Что такое собственная электропроводность полупроводника?
5. Что такое диффузия и дрейф носителей заряда?
6. Как объяснить температурную зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике?
7. Что такое примесная электропроводность полупроводника?
8. Поясните механизм образования электронно-дырочного перехода.
9. Что такое инжекция и экстракция носителей заряда?
10. Как влияет внешнее напряжение на высоту потенциального барьера и ширину  $p$ – $n$ -перехода.
11. Нарисуйте вольт-амперную характеристику  $p$ – $n$ -перехода и напишите ее уравнение.
12. Объясните механизм лавинного пробоя.
13. При каких условиях в  $p$ – $n$ -переходе возможен туннельный пробой?
14. Что такое барьерная ёмкость  $p$ – $n$ -перехода?
15. Что такое диффузионная ёмкость?
16. Почему электрический переход между двумя одинаковыми полупроводниками с одним типом электропроводности, но с разной концентрацией примесей, является омическим и неинжектирующим носители заряда в высокоомную область?
17. При каких условиях контакт «металл – полупроводник» будет невыпрямляющим?
18. При каких условиях контакт «металл – полупроводник» будет выпрямляющим?
19. В чем состоят особенности гетероперехода?
20. Каким требованиям должны удовлетворять омические переходы?





## **Тема 2. Полупроводниковые диоды**

Выпрямительные диоды. Основные параметры, влияющие на работу выпрямительного диода. Особенности вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов.

Импульсные диоды. Процесс переключения импульсного диода.

Туннельные диоды. Вольтамперная характеристика туннельного диода. Энергетические диаграммы, иллюстрирующие работу туннельного диода.

Обращённый диод. Диоды Шоттки. Варикапы. Назначение, принцип действия и вольтамперные характеристики таких полупроводниковых приборов.

Стабилитроны. Вольтамперная характеристика, температурный коэффициент напряжения стабилизации и термостабилизация стабилитрона. Стабисторы.

Примеры применения полупроводниковых диодов в стабилизаторах и выпрямителях. Принцип работы таких полупроводниковых устройств.

**Рекомендуемая литература:** [1, раздел 2], [2, с. 46–79].

### **Методические указания**

Необходимо изучить основные свойства и характеристики полупроводниковых диодов, основываясь на материале темы № 1 «Физические основы работы полупроводниковых приборов»

Особое внимание необходимо уделить тем типам полупроводниковых диодов, которые находят применение в устройствах силовой электроники: выпрямительные диоды, стабилитроны, стабисторы, диоды Шоттки.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что называется полупроводниковым диодом?
2. Какая область полупроводникового диода называется эмиттером?
3. Какая область полупроводникового диода называется базой?
4. Напишите уравнение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода?
5. Как влияет повышение температуры на прямую ветвь вольт-амперной характеристики полупроводникового диода?
6. Перечислите и объясните отличия в свойствах и параметрах кремниевых и германиевых выпрямительных диодов.

7. Какие процессы происходят в базе диода в импульсном режиме работы?
8. Что такое стабилитрон?
9. Что такое туннельный диод?
10. Что такое обращенный диод?
11. Почему в варикапах используется только барьерная ёмкость и не используется диффузионная ёмкость?
12. Что такое выпрямитель?
13. Поясните принцип действия однофазного однополупериодного выпрямителя.
14. Поясните принцип действия однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой.
15. Поясните принцип действия однофазного мостового выпрямителя.
16. Что такое стабилизатор напряжения?

### Тема 3. Биполярные транзисторы

Структура биполярного транзистора и принцип действия. Параметры транзистора. Схемы включения транзистора.

Статические характеристики биполярного транзистора: входные характеристики, выходные характеристики, характеристика обратной связи по напряжению, характеристика обратной связи по току.

Эквивалентные схемы транзистора.

Транзистор как линейный четырехполюсник. Система уравнений, связывающая между собой зависимые и независимые переменные.  $H$ -параметры. Эквивалентная схема транзистора с учётом  $h$ -параметров. Входные и выходные величины четырёхполюсника для схемы с общей базой. Динамические (дифференциальные)  $h$ -параметры для схемы с общей базой. Входные и выходные величины четырёхполюсника для схемы с общим эмиттером. Динамические (дифференциальные)  $h$ -параметры для схемы с общим эмиттером.

Режимы работы транзистора. Каскад усиления на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Выходные характеристики транзистора по схеме с ОЭ. Линия нагрузки. Положение рабочей точки на схеме с ОЭ. Зона отсечки. Транзистор, включенный по схеме с ОЭ, как разомкнутый ключ. Зона насыщения. Транзистор, включенный по схеме с ОЭ, как замкнутый ключ.

Предельные режимы работы транзистора. Кривая предельно допустимой мощности рассеивания транзистора на выходной характеристике.

Расчет рабочего режима транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ). Усилительный каскад по схеме с ОЭ со смещением во входной





цепи. Расчёт резистивного делителя напряжения для получения смещения во входной цепи транзистора. Расчёт балластного сопротивления в базовой цепи транзистора для получения смещения.

Режимы работы усилительных каскадов классов *A*, *B*, *C*, *D*.

Составной транзистор. Схема Дарлингтона. Составной транзистор на комплементарных транзисторах. Составной транзистор, выполненный по каскодной схеме.

Влияние температуры на работу транзисторов. Изменение выходных характеристик транзистора при значительном нагреве. Температурная стабилизация.

Схема эмиттерной стабилизации рабочей точки в схеме с общим эмиттером. Поясните наличие и работу обратной связи в схеме. Схема коллекторной стабилизации рабочей точки усилительного каскада с общим эмиттером.

Усилители постоянного тока. Дрейф нуля. Дифференциальные усилители. Операционный усилитель.

**Рекомендуемая литература:** [1, раздел 3], [2, с. 80–136].

### Методические указания

Необходимо изучить устройство, принцип действия и основные характеристики биполярных транзисторов. Особое внимание обратить на изучение ключевого режима работы транзистора, так как это является основой построения силовых полупроводниковых ключей, получивших исключительно широкое применение в устройствах силовой электроники, с которыми будут иметь дело специалисты, обучающиеся по данному направлению.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Охарактеризуйте режимы работы биполярного транзистора.
2. Каким образом в транзисторе происходит усиление электрических колебаний по мощности?
3. Охарактеризуйте схемы включения биполярного транзистора.
4. Нарисуйте и объясните семейство выходных характеристик транзистора в схеме с общей базой.
5. Нарисуйте и объясните семейство выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.
6. Как влияет температура на характеристики транзистора?
7. Поясните, как определяются *h*-параметры по характеристикам транзистора?



8. Какие существуют эквивалентные схемы транзистора?
9. Охарактеризуйте режимы работы усилительных каскадов.
10. Нарисуйте и объясните временные диаграммы работы транзистора в ключевом режиме.
11. Чем ограничивается быстродействие транзистора при работе в ключевом режиме?
12. Что такое динамические потери при работе транзистора в ключевом режиме?
13. Что представляет собой дифференциальный каскад усиления?
14. Что такое составной транзистор?

#### Тема 4. Полевые транзисторы

Полевые транзисторы. Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом. Схемы с общим стоком, истоком и затвором.

Основные статические характеристики полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом. Основные параметры полевых транзисторов.

Полевые транзисторы с изолированным затвором со встроенным каналом. Статические характеристики в режимах обогащения и обеднения.

Полевые транзисторы с изолированным затвором с индуцированным каналом. Статические характеристики.

Комбинированные транзисторы (биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ), *Insulated Gate Bipolar Transistor*, IGBT).

**Рекомендуемая литература:** [1, Раздел 4], [2, с. 138–154].

#### Методические указания

Необходимо изучить устройство, принцип действия и основные характеристики полевых транзисторов. Особое внимание обратить на полевые транзисторы с изолированным затвором – МДП-транзисторы (MOSFET), изучить их достоинства и недостатки; комбинированные транзисторы IGBT, так как на сегодняшний день они являются лучшими силовыми полупроводниковыми ключами в мире и широко применяются в устройствах силовой электроники.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Какие разновидности полевых транзисторов существуют?
2. Почему полевые транзисторы с управляющим  $p-n$ -переходом не должны работать при прямом напряжении на входе  $U_{зи}$ ?
3. Почему при изменении напряжения  $U_{си}$  толщина канала вдоль его длины меняется неодинаково?
4. Чем отличается полевой транзистор с изолированным затвором от транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом?
5. Чем отличаются структуры МДП-транзисторов с индуцированным и со встроенным каналом? Как это отличие отражается на статических характеристиках?
6. Нарисуйте и объясните управляющие и выходные характеристики полевого транзистора.
7. Дайте сравнительную характеристику МДП- и биполярного транзистора.
8. Что такое комбинированный транзистор?
9. Какие преимущества биполярных и полевых транзисторов сочетает в себе IGBT?

**Тема 5. Тиристоры**

Динисторы. Триодные тиристоры (тринисторы). Параметры тиристорov: а) время включения, б) время выключения, в) ток утечки, г) ток удержания. Обозначение тиристорov на принципиальных электрических схемах.

Способы запираания тиристорov. Естественная коммутация тиристорa. Устройства принудительной коммутации в цепях постоянного тока. Двухоперационные (запираемые) тиристоры. Симисторы.

Назначение и принцип действия некоторых наиболее распространённых электронных устройств, где нашли применение тиристоры.

**Рекомендуемая литература:** [1, Раздел 5], [2, с. 155–174].

**Методические указания**

Необходимо изучить устройство, принцип действия и основные характеристики многослойных полупроводниковых переключающих приборов (динисторов, тиристорov, симисторов), а также их применения в устройствах силовой электроники. Особое внимание обратить на способы построения полностью управляемых силовых ключей (GTO-тиристорov)



### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое тиристор?
2. Какие разновидности тиристоров существуют?
3. Почему коллекторный переход тиристора оказывается смещенным в обратном направлении при переключении тиристора из закрытого состояния в открытое?
4. В чем преимущества тринистора перед динистором?
5. Какими способами можно перевести тиристор из открытого состояния в закрытое?
6. Что такое двухоперационный тиристор?
7. Какова структура и принцип действия симметричных тиристоров?
8. Чем отличается управляемый выпрямитель от неуправляемого?
9. Что такое импульсный регулятор напряжения?

### **Тема 6. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы**

Фотоэлементы (вакуумные и газонаполненные приборы, использующие внешний фотоэффект). Фотокатод и анод. Обозначение фотоэлемента на принципиальной схеме. Схема включения фотоэлемента. Принцип действия фотоэлемента. Основные характеристики фотоэлементов. Вольтамперная характеристика. Световая характеристика. Спектральная характеристика. Чувствительность. Пороговая чувствительность. Внутреннее сопротивление.

Фотоэлектронный умножитель, его назначение и принцип действия

Фоторезисторы. Вольтамперная характеристика фоторезистора. Световая характеристика. Спектральная характеристика. Основные параметры фоторезисторов.

Фотодиоды. Фотодиодное и фотогальваническое включение фотодиода. Основные характеристики фотодиодов. Фотодиодное включение. Вольтамперные характеристики фотодиода. Основные параметры фотодиодов.

Фототранзисторы. Устройство, принцип действия, вольтамперные характеристики, схема включения и символическое обозначение фототранзистора.

Фотиристоры. Устройство, принцип действия, вольтамперные характеристики, схема включения и символическое обозначение фотиристора.

Светодиоды. Устройство, принцип действия, схема включения и символическое обозначение светодиода.

Оптоэлектронные устройства. Оптрон.



**Рекомендуемая литература:** [1, Раздел 6], [2, с. 174–195].

### **Методические указания**

Необходимо изучить устройство, принцип действия и основные характеристики оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Особое внимание уделите вопросам практического применения фотодиодов в качестве альтернативных источников электрической энергии (солнечные батареи), а также силовым полупроводниковым ключам на основе фототиристоров и фототранзисторов.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое внешний и внутренний фотоэффект?
2. Какими параметрами характеризуется фоторезистор?
3. Какие физические факторы влияют на световую характеристику фоторезистора при больших световых потоках?
4. Каковы отличия в свойствах фотодиода и фоторезистора?
5. Как в фотоэлементе происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую?
6. Каковы отличия в принципе действия и свойствах фотодиода и биполярного фототранзистора?
7. Почему тиристор может управлять относительно большими мощностями, чем допустимая мощность рассеяния самого фототиристора?
8. Что такое оптопара?





### **3. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ**

Лабораторный практикум является составной частью учебного процесса по дисциплине «Физические основы электроники».

Целью лабораторных работ, является изучение особенностей работы, параметров и характеристик основных типов полупроводниковых приборов. Лабораторные работы призваны закрепить теоретические знания по изучаемому курсу.

#### **3.1. Перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме**

В данном разделе приведен перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме (КЗФ).

Лабораторные работы проходят во время сессии и выполняются на лабораторных стендах, которые имеют источник питания с различной формой сигнала, активное поле включения аналоговых элементов, набор таких элементов с определенным номиналом, блок мультиметров и электронный осциллограф. Для каждой работы предусмотрены методические указания по ее выполнению, контрольные вопросы и требования к оформлению отчета.

Студенты выполняют 3 лабораторные работы из 7 по заданию преподавателя.

**Рекомендуемая литература:** [12].

#### **Лабораторная работа № 1**

##### **«Определение основных параметров диодов и стабилитрона по вольт-амперным характеристикам» (2 часа)**

**Цель работы:** изучение основных свойств диодов и стабилитрона и определение их параметров по вольтамперным характеристикам.

#### **Лабораторная работа № 2**

##### **«Применение полупроводниковых диодов в источниках питания» (2 часа)**

**Цель работы:** исследование характеристик и параметров выпрямительных схем, сглаживающих фильтров и стабилизаторов напряжения, определение параметров различных выпрямителей и сравнение их между собой.



### **Лабораторная работа № 3**

#### **«Исследование характеристик тиристоров» (2 часа)**

**Цель работы:** исследование статических вольт-амперных характеристик динистора, управляемого тиристора и симистора. Определение основных параметров тиристоров.

### **Лабораторная работа № 4**

#### **«Исследование режимов работы биполярного транзистора» (2 часа)**

**Цель работы:** экспериментальное исследование классов усиления биполярного транзистора. Определение оптимальной точки покоя и максимальной амплитуды неискажённого выходного сигнала, а так же минимальной амплитуды входного напряжения, при которой транзистор переходит в режим насыщения.

### **Лабораторная работа № 5**

#### **«Исследование усилительных каскадов на биполярных транзисторах» (2 часа)**

**Цель работы:** изучение основных свойств усилительных каскадов на биполярных транзисторах, определение их входных и выходных сопротивлений.

### **Лабораторная работа № 6**

#### **«Исследование статических характеристик транзисторов» (2 часа)**

**Цель работы:** изучение основных статических характеристик биполярных и полевых транзисторов.

### **Лабораторная работа № 7**

#### **«Исследование основных характеристик оптопар» (2 часа)**

**Цель работы:** изучение основных свойств оптопар и определение их характеристик.



### 3.2. Перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину с применением ДОТ

В данном разделе приведен перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину с применением дистанционных образовательных технологий.

Лабораторные работы выполняются виртуально с использованием специализированной информационной среды.

**Рекомендуемая литература:** [13].

#### Лабораторная работа № 1

##### «Полупроводниковые диоды в источниках питания» (2 часа)

**Цель работы:** исследование простейших выпрямительных схем на полупроводниковых диодах с использованием сглаживающих фильтров и параметрического стабилизатора напряжения.

#### Лабораторная работа № 2

##### «Три схемы включения транзистора» (2 часа)

**Цель работы:** исследование трёх схем включения биполярного транзистора: с общим эмиттером, с общей базой, с общим коллектором.

#### Лабораторная работа № 3

##### «Ключевой режим работы транзистора» (2 часа)

**Цель работы:** исследование режима работы биполярного транзистора в качестве управляемого полупроводникового ключа.

## 4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ

### 4.1. Общие методические указания

В соответствии с учебным графиком предусмотрено выполнение одного индивидуального домашнего задания «Полупроводниковые диоды и их применение в схемах выпрямительных устройств».

При выполнении индивидуального задания студентам необходимо:

- провести анализ технического задания;
- выбрать принципиальную схему выпрямителя, выпрямительные диоды;
- рассчитать сглаживающий фильтр, параметры питающего трансформатора;
- построить временные диаграммы для рассчитанного выпрямителя.

**Номер варианта индивидуального задания определяется по последним двум цифрам номера зачетной книжки.** Если образуемое ими число больше 30, то следует взять сумму этих цифр. Например, если номер зачетной книжки 3-5A11/12, то номер варианта задания равен 12. Если номер зачетной книжки 3-5A11/31, то номер варианта задания равен 4.

#### 4.1.1. Требования к оформлению индивидуального задания

При оформлении индивидуального домашнего задания необходимо соблюдать следующие требования.

1. Индивидуальное задание должно иметь титульный лист, оформленный в соответствии со стандартами ТПУ [14]. На титульном листе указываются номер индивидуального задания, номер варианта, название дисциплины; фамилия, имя, отчество студента; номер группы, шифр. **Образец оформления и шаблон титульного листа** размещен на сайте ИДО (<http://portal.tpu.ru/ido-tpu>) в разделе СТУДЕНТУ → ДОКУМЕНТЫ.

2. Текст индивидуального задания набирается в текстовом процессоре Microsoft Word. Шрифт Times New Roman, размер 12–14 pt, формулы набираются в редакторе формул (рекомендуется MathType).

3. Индивидуальное задание должно содержать условия и исходные данные в соответствии с вариантом.



4. Решение должно быть подробным, с включением промежуточных расчётов и указанием использованных формул.
5. Страницы задания должны иметь сквозную нумерацию.
6. В задание включается список использованной литературы.

Если работа не соответствует требованиям, студент получает оценку «не зачтено». В этом случае работа должна быть исправлена и повторно предоставлена преподавателю. При доработке в текст работы необходимо включить дополнительные вопросы, полученные после проверки работы преподавателем, и ответы на эти вопросы.

Студент, не получивший положительной аттестации по индивидуальному заданию, не допускается к сдаче экзамена по данной дисциплине.

#### 4.2. Варианты индивидуального задания и методические указания

Исходными данными для расчета выпрямителя являются:

- номинальное выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_d$ ;
- ток нагрузки  $I_d$ ;
- допустимый коэффициент пульсаций выходного напряжения на нагрузке  $k_{\Pi}$ ;
- частота питающей сети  $f$ ;
- количество фаз  $n$ ;
- номинальное напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора  $U_1$ .

В табл. 1 приведены варианты исходных данных для расчета.



Таблица 1

## Варианты индивидуального задания

№ п/п	Исходные данные
1.	$U_d = 9 \text{ В}; I_d = 0,04 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,07; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
2.	$U_d = 15 \text{ В}; I_d = 1,2 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,02; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
3.	$U_d = 24 \text{ В}; I_d = 1,6 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,04; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
4.	$U_d = 30 \text{ В}; I_d = 2,4 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,08; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
5.	$U_d = 5 \text{ В}; I_d = 0,01 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,05; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
6.	$U_d = 30 \text{ В}; I_d = 4 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,03; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
7.	$U_d = 12 \text{ В}; I_d = 10 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,025; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
8.	$U_d = 50 \text{ В}; I_d = 10 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,07; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
9.	$U_d = 27 \text{ В}; I_d = 3,5 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,04; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
10.	$U_d = 12 \text{ В}; I_d = 0,08 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,09; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
11.	$U_d = 15 \text{ В}; I_d = 1,2 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,02; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
12.	$U_d = 30 \text{ В}; I_d = 2,4 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,08; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
13.	$U_d = 27 \text{ В}; I_d = 2 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,06; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
14.	$U_d = 12 \text{ В}; I_d = 0,01 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,085; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
15.	$U_d = 24 \text{ В}; I_d = 0,02 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,095; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
16.	$U_d = 30 \text{ В}; I_d = 0,01 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,08; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
17.	$U_d = 15 \text{ В}; I_d = 2 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,04; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
18.	$U_d = 100 \text{ В}; I_d = 3 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,02; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
19.	$U_d = 27 \text{ В}; I_d = 5 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,05; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
20.	$U_d = 12 \text{ В}; I_d = 0,03 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,03; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
21.	$U_d = 24 \text{ В}; I_d = 4 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,07; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
22.	$U_d = 5 \text{ В}; I_d = 1,5 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,06; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
23.	$U_d = 30 \text{ В}; I_d = 0,5 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,05; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
24.	$U_d = 27 \text{ В}; I_d = 4 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,09; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
25.	$U_d = 9 \text{ В}; I_d = 5 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,05; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
26.	$U_d = 15 \text{ В}; I_d = 0,06 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,04; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
27.	$U_d = 5 \text{ В}; I_d = 0,015 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,07; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
28.	$U_d = 12 \text{ В}; I_d = 1 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,06; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
29.	$U_d = 24 \text{ В}; I_d = 3 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,05; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$
30.	$U_d = 15 \text{ В}; I_d = 2,5 \text{ А}; k_{\Pi} = 0,06; U_1 = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; n = 1.$

Процесс расчета выпрямительных устройств можно разделить на несколько этапов:

1. Анализ исходных данных и выбор принципиальной схемы выпрямителя.
2. Расчет параметров сглаживающего фильтра.
3. Расчет параметров вентильного узла и выбор типа выпрямительных диодов.
4. Расчет параметров трансформатора.
5. Построение временных диаграмм рассчитанного выпрямителя.

### **Выбор принципиальной схемы выпрямителя**

Выбор схемы выпрямителя производят в зависимости от значения требуемой выходной мощности, выходного напряжения, коэффициента пульсаций, числа фаз. Критериями для выбора конкретного вида выпрямителя служат достоинства и недостатки.

*Однополупериодные выпрямители* применяются в основном с выходной мощностью до 10 Вт и в тех случаях, когда допускается сравнительно высокий коэффициент пульсаций. Преимуществом таких выпрямителей являются простота и возможность работать без трансформатора. Их недостатки: низкая частота пульсаций, высокое обратное напряжение на выпрямительных диодах, плохое использование трансформатора, подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током.

*Двухполупериодные выпрямители со средней точкой* применяются при напряжениях нагрузки до нескольких десятков вольт и выходной мощности до 50 Вт. На выходе выпрямителя устанавливают Г- или П-образные LC- и RC-фильтры. Преимущества этих выпрямителей: повышенная частота пульсаций, малое число вентилях, возможность применения общего радиатора без изоляции вентилях, малое падение напряжения на вентилях. Недостатки: большая требуемая габаритная мощность трансформатора, повышенное обратное напряжение на вентильных диодах.

*Мостовая схема* выпрямления применяется наиболее часто. Их можно использовать при любом характере нагрузки (емкостная, индуктивная) при выходной мощности до 300 Вт. Ее применяют с емкостным, Г- или П-образными LC- и RC-фильтрами. Достоинствами мостовых выпрямителей являются: повышенная частота пульсаций, небольшое обратное напряжение на выпрямительных диодах, эффективное использование трансформатора. Недостатками являются: повышенное падение напряжения на вентилях, в результате чего ее не рекомендуют применять при напряжениях нагрузки менее 5 В; невозможность установки однотипных вентилях на одном радиаторе без изолирующих прокладок.

## Основные виды сглаживающих фильтров и особенности их применения

Режим работы выпрямителя в значительной степени определяется типом сглаживающего фильтра, включенного на его выходе. В мало-мощных выпрямителях, питающихся от однофазной сети переменного тока, применяются простейшие ёмкостные фильтры, в выпрямителях средней и большой мощности – Г-образные  $LC$ - и  $RC$ -фильтры и П-образные  $CLC$ - и  $CRC$ -фильтры.

Основным параметром сглаживающих фильтров является коэффициент сглаживания  $q$ :

$$q = \frac{k_{\text{п сх}}}{k_{\text{п н}}}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{п сх}}$  – коэффициент пульсаций на входе фильтра;  $k_{\text{п н}}$  – коэффициент пульсаций на нагрузке.

*Индуктивно-ёмкостные фильтры* (Г-образный  $LC$ -фильтр и П-образный  $CLC$ -фильтр) широко применяются при повышенных токах нагрузки, поскольку падение напряжения на них можно сделать сравнительно небольшим. КПД у таких фильтров достаточно высокий. Недостатки индуктивно-ёмкостных фильтров: большие габаритные размеры и масса, повышенный уровень электромагнитного излучения от элементов фильтра, сравнительно высокая стоимость и трудоемкость изготовления.

Наиболее широко используется Г-образный  $LC$ -фильтр (рис. 1). Для эффективного сглаживания пульсаций таким фильтром необходимо выполнение следующих условий:

$$X_C = \frac{1}{m\omega C} \ll R_n; \quad X_L = m\omega L \gg X_C. \quad (2)$$

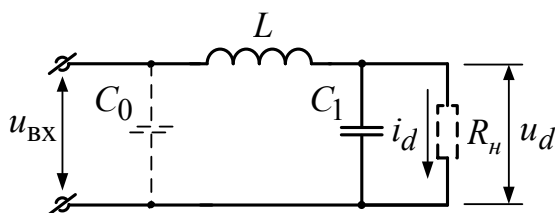


Рис. 1. Индуктивно-ёмкостный сглаживающий фильтр

При их выполнении, пренебрегая потерями в дросселе  $L$ , для коэффициента сглаживания можно записать:

$$q = (m\omega)^2 LC - 1. \quad (3)$$

Для того чтобы избежать резонансных явлений в фильтре необходимо выбирать  $q > 3$ . Кроме этого, одним из основных условий является обеспечение явно выраженной индуктивной реакции фильтра на выпрямитель, необходимой для большей стабильности внешней характеристики выпрямителя. При индуктивной реакции фильтра действующие значения токов в вентильях и обмотках трансформатора меньше. Для обеспечения индуктивной реакции необходимо, чтобы:

$$L \geq \frac{2U_d}{(m^2 - 1)m\omega I_d} = \frac{2R_H}{(m^2 - 1)m\omega}. \quad (4)$$

П-образный *CLC*-фильтр отличается от описанного *LC*-фильтра наличием еще одной ёмкости  $C_0$ , включаемой на входе фильтра. Расчет таких фильтров производят в два этапа, сначала рассчитывают ёмкость конденсатора  $C_0$ , исходя из допустимой величины пульсации напряжения на нем, затем по приведенным выше формулам рассчитывают Г-образное звено. Наибольший коэффициент сглаживания в П-образном фильтре достигается при  $C_0 = C_1$ .

При выборе конденсаторов фильтра следует следить за тем, чтобы они были рассчитаны на напряжение на 15...20 % превышающее напряжение холостого хода выпрямителя при максимальном напряжении сети (чтобы учесть перенапряжения, возникающие при включении выпрямителя). Необходимо также, чтобы амплитуда переменной составляющей напряжения на них не превышала предельно допустимого значения.

*Резистивно-ёмкостные фильтры* целесообразно применять при малых токах нагрузки (менее 10...15 мА) и небольших требуемых коэффициентах сглаживания. Достоинства этих фильтров – малые габариты и масса, низкая стоимость. Недостаток – сравнительно большое падение напряжения на фильтре (что снижает КПД устройства выпрямления в целом).

Простейший Г-образный *RC*-фильтр (рис. 2) состоит из балластного резистора  $R_\phi$  и конденсатора  $C_1$ . Коэффициент сглаживания такого фильтра вычисляется по формуле:

$$q = m\omega C \frac{R_H R_\phi}{R_H + R_\phi}. \quad (5)$$

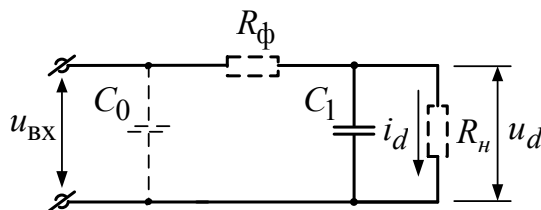


Рис. 2. Резистивно-ёмкостный сглаживающий фильтр

Сопротивление фильтра  $R_\phi$  выбирают из условия допустимого падения напряжения на фильтре или исходя из заданного КПД  $\eta$  по формуле:

$$R_\phi = \frac{R_n(1-\eta)}{\eta}. \quad (6)$$

Оптимальным считается КПД порядка  $\approx 0,6 \dots 0,8$ .

Расчет П-образного резистивно-ёмкостного фильтра (его схема включает дополнительный конденсатор  $C_0$ , показанный на рис. 2 пунктиром) производится, как и в случае П-образного  $CLC$ -фильтра, в два этапа после разделения этого фильтра на ёмкостной  $C_0$  и Г-образный  $LC_1$ -фильтр.

### Выбор выпрямительных диодов

Для того чтобы выбрать тип полупроводниковых диодов выпрямителя необходимо рассчитать с учетом характера нагрузки основные характеристики выпрямителя по формулам табл. 2:

- значение максимального обратного напряжения  $U_{обр\ max}$ , прикладываемого к силовым диодам при работе выпрямителя выбранного типа;
- максимальное значение прямого тока  $I_{пр\ ср\ max}$  диодов;

Характер нагрузки выпрямителя может быть активным ( $R$ ), активно-индуктивным ( $RL$ ) или активно-ёмкостным ( $RC$ ). Выпрямитель с выходным ёмкостным или резистивно-ёмкостным фильтром считается нагруженным на активно-ёмкостную нагрузку, а выпрямитель с фильтром, начинающимся на индуктивность – на активно-индуктивную нагрузку.

При наличии активно-ёмкостной нагрузки амплитудное и действующее значения тока выпрямительных диодов могут существенно превышать расчетное среднее значение. Поэтому в целях исключения перегрузки выпрямительных диодов на практике для однополупериодного выпрямителя используется повышающий коэффициент 2.2, а для двухполупериодного – 1.1.



Таблица 2

Параметры выпрямителя при работе на различную нагрузку

Тип выпрямителя	Тип нагр.	Режим работы диодов				$k_{п\ cх}$	$f_{п}$
		$U_{обр\ max}$	$I_{пр\ ср}$	$I_{пр\ д}$	$I_{пр\ ср\ max}$		
Однофазный однополупериод- ный	$R$	$\pi U_d$	$I_d$	$\frac{\pi}{2} I_d$	$\pi I_d$	1,57	$f_{вх}$
	$RC$	$2B\sqrt{2}U_d$	$I_d$	$D I_d$	$F I_d$	$\frac{H}{rC}$	$f_{вх}$
	$RL$	$\pi U_d$	$I_d$	$\sqrt{2} I_d$	$2 I_d$	1,57	$f_{вх}$
Однофазный двухполупериод- ный со средней точкой	$R$	$\pi U_d$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{\pi}{4} I_d$	$\frac{\pi}{2} I_d$	0,66	$2 f_{вх}$
	$RC$	$2B\sqrt{2}U_d$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{D}{2} I_d$	$\frac{F}{2} I_d$	$\frac{H}{rC}$	$2 f_{вх}$
	$RL$	$\pi U_d$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_d$	$I_d$	0,66	$2 f_{вх}$
Однофазный мостовой	$R$	$\frac{\pi}{2} U_d$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{\pi}{4} I_d$	$\pi I_d$	0,66	$2 f_{вх}$
	$RC$	$B\sqrt{2}U_d$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{D}{2} I_d$	$\frac{F}{2} I_d$	$\frac{H}{rC}$	$2 f_{вх}$
	$RL$	$\frac{\pi}{2} U_d$	$\frac{1}{2} I_d$	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_d$	$I_d$	0,66	$2 f_{вх}$

Учитывая вышеизложенные рекомендации необходимо подобрать по справочнику наиболее подходящий тип полупроводниковых диодов.

Если характер нагрузки выпрямителя активно-емкостной, выбор типа выпрямительных диодов выполняется в два этапа. Во-первых, необходимо рассчитать значение максимального обратного напряжения  $U_{обр\ max}$ , а также оценить максимальное среднее значения прямого тока, протекающего через диоды  $I_{пр\ ср\ max}$  формулам табл. 2 для активно-го характера нагрузки и по данным значениям предварительно выбрать тип диодов. Затем рассчитать вспомогательные коэффициенты по формулам и графикам, приведенным в следующем разделе и пересчитать основные характеристики выпрямителя по табл. 2 для активно-емкостного характера нагрузки.

### Расчет параметров трансформатора

После выбора схемы выпрямителя, сглаживающего фильтра и типа выпрямительных диодов следует рассчитать параметры требуемого трансформатора и режимов работы всех элементов выпрямителя.

Ниже приводится порядок таких расчетов.

1. Определяем сопротивления вторичной обмотки трансформатора  $r_{тр}$  и вентилей при прямом смещении  $r_{пр}$ , а также сопротивление фазы выпрямителя.

$$r_{тр} = \frac{jU_d}{I_d B f} \sqrt{\frac{jBf}{1,6U_d I_d}}, \quad (7)$$

где  $j$  – средняя плотность тока в обмотках трансформатора, А/мм<sup>2</sup>;

$B$  – магнитная индукция, Тл;

$f$  – частота входного напряжения, Гц.

На практике для выпрямителей мощностью до 10 Вт выбирают  $r_{тр} \approx (0,07 \dots 0,1)R_d$ , а для выпрямителей мощностью  $\geq 10$  Вт  $r_{тр} \approx (0,05 \dots 0,08)R_d$ .

Сопротивление вентилей, включенных в прямом направлении  $r_{пр}$ , может быть найдено из справочных данных на конкретный тип выпрямительных диодов:

$$r_{пр} = \frac{U_{пр\text{ ср max}}}{I_{пр\text{ ср max}}} \approx \frac{U_{пр\text{ ср max}}}{3I_{пр\text{ ср}}}. \quad (8)$$

Для однополупериодной и двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой:  $r = r_{пр} + r_{тр} + R_{\Phi}$ , а для мостовой схемы выпрямления  $r = 2r_{пр} + r_{тр} + R_{\Phi}$ . Сопротивление  $R_{\Phi}$  – это активное сопротивление сглаживающего RC-фильтра, для этих фильтров  $R_{\Phi} \approx (0,1 \dots 0,25)R_d$ .

2. Для случая активно-ёмкостной нагрузки необходимо определить вспомогательные коэффициенты  $A$ ,  $F$ ,  $D$ ,  $B$ ,  $H$ .

$$\text{Для однополупериодных выпрямителей: } A = \frac{I_d \pi r}{U_d}. \quad (9)$$

$$\text{Для двухполупериодных выпрямителей: } A = \frac{I_d \pi r}{2U_d}. \quad (10)$$

Затем необходимо определить остальные вспомогательные коэффициенты можно с помощью графиков на рис. 3, 4.

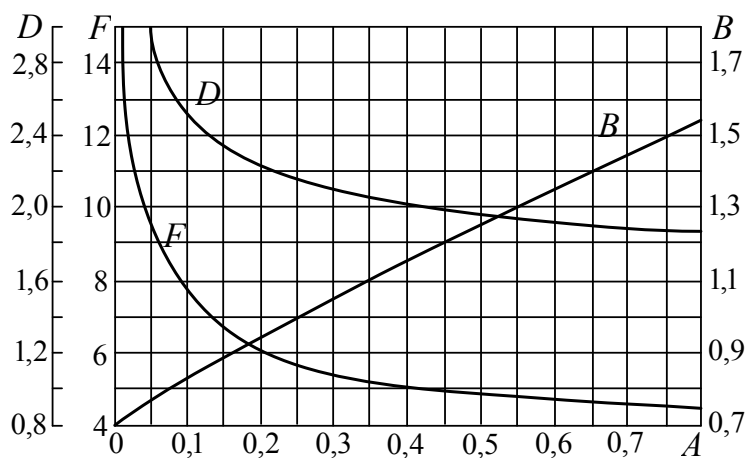


Рис. 3. Графики для расчета коэффициентов  $D$ ,  $F$ ,  $B$

На рис. 4 показаны зависимости: 1 – для однополупериодных выпрямителей; 2 – для двухполупериодных и мостовых выпрямителей.

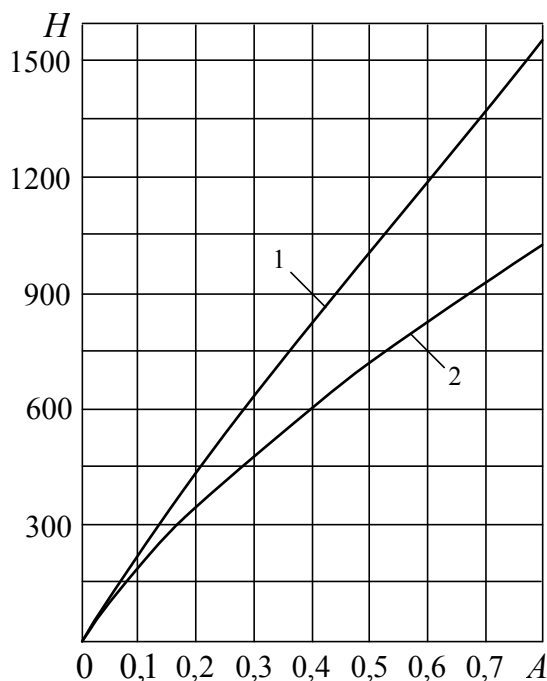


Рис.4. Графики для расчета коэффициента  $H$

По заданному коэффициенту пульсации  $k_{\Pi}$  определяется ёмкость конденсатора выходного ёмкостного фильтра, мкФ:

$$C = \frac{H}{rk_{\Pi}}. \quad (11)$$

3. Рассчитываем параметры трансформатора по табл. 3:

- действующее значение напряжения  $U_{2д}$  и тока  $I_{2д}$  вторичной обмотки трансформатора;
- минимальную требуемую мощность вторичной обмотки трансформатора  $P_2$ .

Таблица 3

Параметры трансформаторов выпрямителей,  
работающих при различной нагрузке

Тип выпрямителя	Тип нагрузки	Параметры вторичной обмотки трансформатора		
		$U_{2д}$	$I_{2д}$	$P_2$
Однофазный однополупериодный	$R$	$\frac{\pi}{\sqrt{2}} U_d$	$\frac{\pi}{2} I_d$	$\frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} P_d$
	$RC$	$BU_d$	$DI_d$	$BDP_d$
	$RL$	$\frac{\pi}{\sqrt{2}} U_d$	$\sqrt{2} I_d$	$\pi P_d$
Однофазный двухполупериодный со средней точкой	$R$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$ (две обмотки)	$\frac{\pi}{4} I_d$	$\frac{\pi^2}{8\sqrt{2}} P_d$ (две обмотки)
	$RC$	$BU_d$ (две обмотки)	$\frac{D}{2} I_d$	$\frac{BD}{2} P_d$ (две обмотки)
	$RL$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$ (две обмотки)	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_d$	$\frac{\pi}{4} P_d$ (две обмотки)
Однофазный мостовой	$R$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d$	$\frac{\pi^2}{8} P_d$
	$RC$	$2BU_d$	$\frac{D\sqrt{2}}{2} I_d$	$\frac{BD}{\sqrt{2}} P_d$
	$RL$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$	$I_d$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} P_d$

### Построение временных диаграмм выпрямителя

На рис. 5 приведён пример построения временных диаграмм однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром.

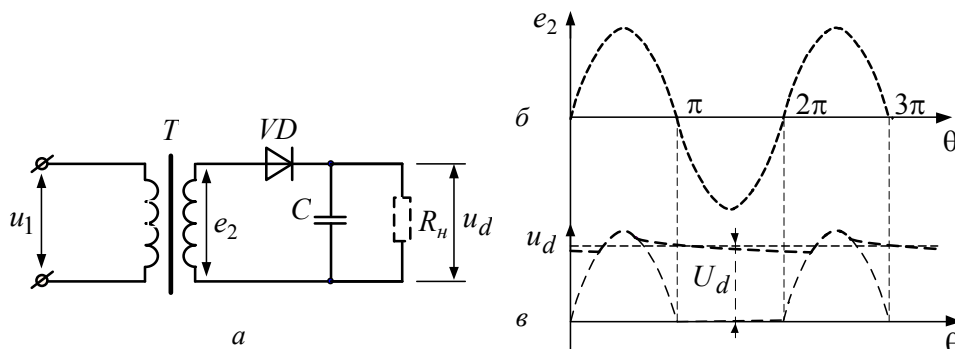


Рис. 5. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

**Контрольные вопросы:** см. № 1–16, с. 6 (настоящих метод. указаний).





## 5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ

### 5.1. Требования для сдачи экзамена

После завершения изучения дисциплины студенты сдают экзамен. К экзамену допускаются только те студенты, у которых зачтено индивидуальное задание и лабораторные работы.

### 5.2. Вопросы для подготовки к экзамену



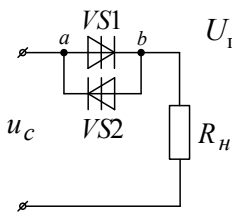
1. Энергетическая структура полупроводников.
2. Механизм собственной и примесной проводимости полупроводника.
3. Физика процессов формирования  $p$ – $n$ -перехода.
4. Описать механизм различных видов пробоя  $p$ – $n$ -перехода.
5. Емкости  $p$ – $n$ -перехода.
6. Свойства  $p$ – $n$ -перехода.
7. Выпрямительный диод. Основные характеристики.
8. Включение диода в проводящем направлении. Физика процессов
9. Включение диода в непроводящем направлении. Физика процессов.
10. Стабилитрон. Основные характеристики.
11. Однофазный однополупериодный выпрямитель. Схема, принцип действия, основные характеристики.
12. Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой. Схема, принцип действия, основные характеристики.
13. Однофазный мостовой выпрямитель. Схема, принцип действия, основные характеристики.
14. Параметрический стабилизатор напряжения
15. Биполярный транзистор. Устройство, принцип действия, основные характеристики.
16. Механизм усиления электрических сигналов при помощи биполярного транзистора.
17. Включение транзистора по схеме с общей базой. Основные параметры и характеристики.
18. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером. Основные параметры и характеристики.
19. Включение транзистора по схеме с общим коллектором. Основные параметры и характеристики.
20. Режимы работы усилительного каскада на транзисторах.



21. Ключевой режим работы транзистора.
22. Способы введения смещения в усилительных каскадах на биполярных транзисторах
23. Температурная зависимость транзистора и методы ее устранения.
24. Схема эмиттерной стабилизации положения рабочей точки.
25. Схема коллекторной стабилизации положения рабочей точки.
26. Составной транзистор и его особенности.
27. Способы включения полевого транзистора.
28. Полевой транзистор с управляющим  $p-n$ -переходом. Устройство, принцип действия, характеристики.
29. МДП-транзистор со встроенным каналом. Устройство, принцип действия, характеристики.
30. МДП-транзистор со встроенным каналом. Устройство, принцип действия, характеристики.
31. Параметры полевых транзисторов
32. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT). Структура, эквивалентная схема, свойства.
33. Динисторы. Устройство, принцип действия, вольт-амперная характеристика.
34. Тринисторы. Устройство, принцип действия, вольт-амперная характеристика.
35. Включение тиристора в проводящем направлении. Физика процессов
36. Включение тиристора в непроводящем направлении. Вольт-амперная характеристика
37. Способы запираания тиристорov.
38. GTO-тиристор. Устройство, принцип действия, вольт-амперная характеристика.
39. Симистор. Устройство, принцип действия, вольт-амперная характеристика.
40. Внешний фотоэффект и приборы на его основе.
41. Фотоэлектронный умножитель. Устройство, принцип действия
42. Внутренний фотоэффект, приборы на его основе.
43. Фоторезисторы. Устройство, принцип действия, характеристики
44. Фотодиоды. Устройство, принцип действия, характеристики
45. Светодиоды. Устройство, принцип действия.

### 5.3. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме

В данном разделе приведен образец билета для студентов, сдающих экзамен очно, во время сессии в Томске.

	<p>МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования <b>«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»</b></p>	
<p>Образовательная программа по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», дисциплина <b>Физические основы электроники</b> для студентов ИДО, курс 2</p>		
<p align="center"><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ №</b></p>		
<p>1. Описать механизм различных видов пробоя p–n-перехода.</p> <p>2. Ключевой режим работы транзистора.</p> <p>3. Изобразите для представленной схемы временные зависимости параметров указанных на графиках, считая характеристики полупроводниковых приборов идеальными:</p>		
		
<p>Утверждаю: Зав. кафедрой ЭПЭО _____ /Ю.Н. Дементьев/ «__» _____ 2012 г.</p> <p>Составители: _____ /В.П. Петрович/ _____ /А.В. Глазачев/</p>		

### 5.4. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину с применением ДОТ

В данном разделе приведены примеры вопросов из экзаменационного билета для студентов, сдающих экзамен дистанционно (через Интернет на сайте ИДО).

#### Задания на выбор единственного ответа

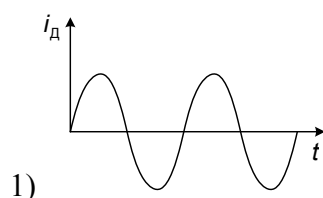
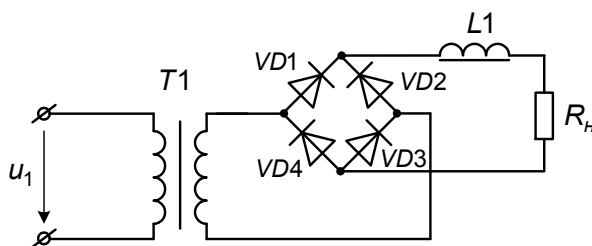
**1. Где размещается уровень Ферми в собственном полупроводнике?**

- 1) смещается к зоне проводимости
- 2) смещается к валентной зоне
- 3) в середине запрещенной зоны

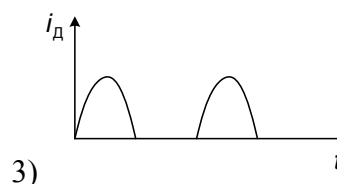
**2. Экстракция носителей заряда происходит при**

- 1) обратном напряжении и уменьшении высоты потенциального барьера
- 2) прямом напряжении и уменьшении высоты потенциального барьера
- 3) обратном напряжении и увеличении высоты потенциального барьера
- 4) прямом напряжении и увеличении высоты потенциального барьера

**3. Каким станет ток в нагрузке, если диод VD1 выйдет из строя?**



2)  $i_H = 0$



**4. Как изменится коэффициент по току биполярного транзистора при уменьшении длины базы**

- 1) не изменится

- 2) это зависит от типа транзистора
- 3) уменьшится
- 4) увеличится

**5. Семейство, каких характеристик можно получить для схемы с общим эмиттером, меняя  $I_b$ ?**

- 1) входных характеристик
- 2) выходных характеристик
- 3) характеристик передачи по току

**6. Для полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом с каналом  $n$ -типа, включенным по схеме с общим истоком, какой должна быть полярность напряжения на затворе  $U_{зи}$  и на стоке  $U_{си}$ .**

- 1)  $U_{зи} < 0$ ,  $U_{си} > 0$
- 2)  $U_{зи} > 0$ ,  $U_{си} > 0$
- 3)  $U_{зи} < 0$ ,  $U_{си} < 0$
- 4)  $U_{зи} > 0$ ,  $U_{си} < 0$

**7. Как смещаются  $p$ - $n$ -переходы тиристора в открытом состоянии?**

- 1) эмиттерные переходы в прямом направлении, коллекторный переход в обратном направлении
- 2) эмиттерные переходы в обратном направлении, коллекторный переход в прямом направлении
- 3) эмиттерные и коллекторный переход в прямом направлении
- 4) эмиттерные и коллекторный переход в обратном направлении

**8. Какие носители заряда обеспечивают ток в базе фототранзистора типа  $p$ - $n$ - $p$ ?**

- 1) электроны и дырки
- 2) только электроны
- 3) только дырки

**Задания на выбор множественных ответов**

**9. Химические элементы, используемые для получения донорной примесной проводимости**

- 1) фосфор
- 2) индий
- 3) кремний
- 4) мышьяк
- 5) алюминий



**10. Особенности вольт-амперных характеристик при нагреве кремниевых диодов**

- 1) увеличение прямого напряжения
- 2) уменьшение пробивного напряжения
- 3) существование обратного тока насыщения
- 4) уменьшение прямого напряжения
- 5) увеличение пробивного напряжения
- 6) отсутствие обратного тока насыщения

**11. Какие конструктивные особенности принципиально отличают базу от эмиттера и коллектора транзистора?**

- 1) ширина
- 2) размер электродов
- 3) концентрация примеси
- 4) геометрическая форма электродов

**12. Полупроводниковые приборы, используемые в качестве электронных ключей**

- 1) тиристоры
- 2) биполярные транзисторы
- 3) варикапы
- 4) полевые транзисторы

**Задания на установление последовательности****13. Установите последовательность образования выпрямляющего электрического перехода на основе контакта «металл – полупроводник»**

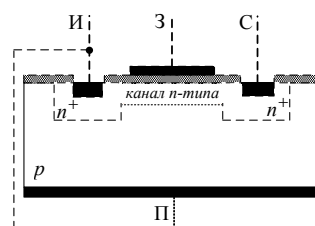
- 1) рекомбинация обеднение слоя вблизи границы раздела
- 2) выход электронов из металла в полупроводник
- 3) появление слоя с большим сопротивлением

**14. Установите последовательность образования невыпрямляющего электрического перехода на основе контакта «металл – полупроводник»**



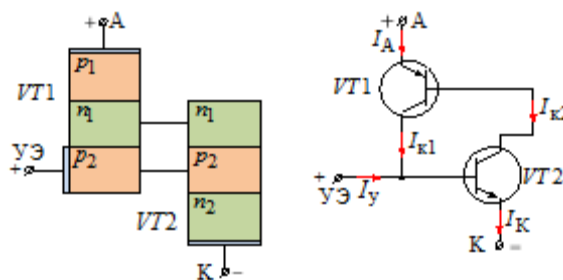
- 1) возникновение слоя с малым сопротивлением
- 2) выход электронов из полупроводника в металл
- 3) накопление основных носителей заряда вблизи границы раздела

**15. Установите последовательность управления выходным током  $I_C$  полевого транзистора при постоянном напряжении  $U_{СИ}$  в режиме обеднения**



- 1) подача на затвор отрицательного  $U_{ЗИ}$  напряжения
- 2) создание напряжение любой  $U_{СИ}$  полярности
- 3) увеличение сопротивления токопроводящего канала и уменьшение тока стока
- 4) возникновение поперечного электрического поля
- 5) выталкивание электронов из токопроводящего канала

**16. Установите последовательность отпираания однооперационного тиристора**



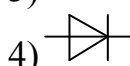
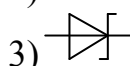
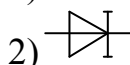
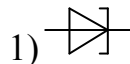
- 1) усиление тока транзистором VT1
- 2) усиление тока управления транзистором VT2
- 3) подача сигнала управления
- 4) вхождение транзисторов режим насыщения
- 5) лавинообразное усиление тока

**Задания на установление соответствия****17. Установите соответствие****Наименование прибора:**

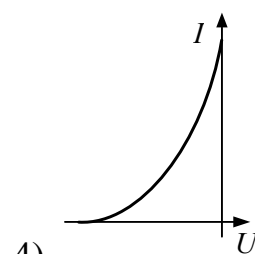
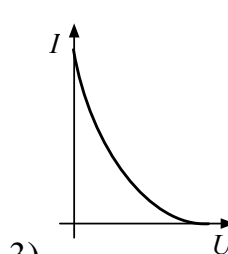
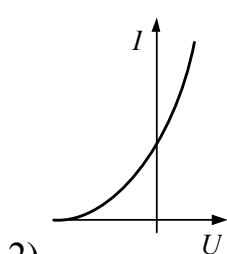
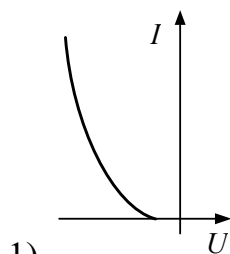
1) диод выпрямительный

2) диод туннельный

3) диод обращенный

**18. Установите соответствие****Наименование прибора:**1) полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом с каналом  $p$ -типа2) полевой транзистор с изолированным затвором со встроенным каналом  $n$ -типа;3) полевой транзистор с изолированным затвором с индуцированным каналом  $p$ -типа.

Управляющая характеристика:

**Задания для краткого ответа****19. Определите параметр  $h_{11}$ , если**

$$U_1 = 1,2 \text{ В}; \quad I_1 = 10 \text{ мА}; \quad U_2 = 12 \text{ В}; \quad I_2 = 200 \text{ мА};$$

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2; \quad I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2.$$

**20. Определите степень насыщения транзистора при ключевом режиме работы, если ток насыщения транзистора  $I_{б \text{ нас}} = 100 \text{ мА}$ , ток базы транзистора  $I_{б} = 120 \text{ мА}$ .**



## **6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Глазачев А.В., Петрович В.П. Физические основы электроники: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 212 с.
2. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств / под ред. А.А. Ровдо. – М.: Додэка XXI, 2001. – 368 с.
3. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Додэка XXI, 2005. – 384 с.
4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.
5. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: учебное пособие. – 4-е изд. – М.: Высш. шк., 2000. – 752 с.
6. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: учебное пособие. – Ростов-на-Дону.: Феникс, 2000. – 448 с.
7. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов. – 8-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2006. – 480 с.
8. Ровдо А.А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами. – М.: Лайт Лтд., 2000. – 288 с.
9. Ровдо А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах. – М.: Додэка XXI, 2002. – 256 с.

### **Дополнительная литература**

10. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: справочник. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 325 с.
11. Аксенов А. И. Отечественные полупроводниковые приборы: справочное пособие. Кн.1. Аналоги отечественных и зарубежных приборов / А. И. Аксенов, А. В. Нефедов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 544 с.



### **Учебно-методические пособия**

12. Физические основы электроники: Лабораторный практикум / В.П. Петрович, Н.А. Воронина, Л.А. Паюк, К.В. Образцов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 72 с.

13. Метод. указ. к выполнению лабораторных работ по курсу «Физические основы электроники» для студентов ИДО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / сост. А.В. Аристов, Е.А. Шутов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.

### **Интернет-ресурсы**

14. СТО ТПУ 2.5.01–2006. Система образовательных стандартов. Работы выпускные, квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления / ТПУ [Электронный ресурс] – Томск, 2006. – Режим доступа

<http://portal.tpu.ru/departments/head/methodic/standart>, свободный.





Учебное издание

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания и индивидуальные задания

*Составители*

**ПЕТРОВИЧ Виталий Петрович  
ГЛАЗАЧЕВ Александр Владимирович**

*Рецензент*

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры ЭПЭО ЭНИИ*

*Л.К. Бурулько*

*Верстка М.Ю. Дорофеева*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**


Подписано к печати. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать Хероx. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,05.  
Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ.** 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)