

СТИ

НИЯУ МИФИ

Северский
технологический
институт



ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ. ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Л.Н. Лохтина, Е.С. Логинова, А.Л. Федянин

Северск
2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Северский технологический институт –
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СТИ НИЯУ МИФИ)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭиАТП
доцент, канд. техн. наук

« » 2026 г. А. Л. Федянин

Л.Н. Лохтина, Е.С. Логинова, А.Л. Федянин

**ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ.
ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ**

Учебно-методическое пособие

по курсу «Электронная и микропроцессорная техника»
для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Северск 2026

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73
Л 813

Авторы:

Лохтина Л.Н. — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматизация технологических процессов» СТИ НИЯУ МИФИ;
Логинова Е.С. — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматизация технологических процессов» СТИ НИЯУ МИФИ;
Федянин А.Л. — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматизация технологических процессов» СТИ НИЯУ МИФИ.

Рецензент:

Филипас А.А. — кандидат технических наук, Отделение автоматизации и робототехники (ОАР) ИШИТР ТПУ, доцент, заведующий кафедрой — руководитель отделения на правах кафедры.

Лохтина Л.Н.

Л 813 Элементная база электроники. Пассивные компоненты, полупроводниковые диоды: учебно-методическое пособие/Л.Н. Лохтина, Е.С. Логинова, А.Л. Федянин; Северский технологический институт НИЯУ МИФИ — Северск: Издательство СТИ НИЯУ МИФИ, 2026. — 125 с. — Текст: электронный.

В пособии изложены сведения об элементной базе аналоговой электроники, такой, как пассивные компоненты и полупроводниковые диоды. Изложены основы физических процессов в этих электронных устройствах и их аналитическое описание, показаны основные задачи, решаемые различными элементами электронной техники. Рассмотрен пример моделирования однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя в среде SimInTech. При написании пособия использованы материалы действующих государственных стандартов. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также полезно студентам, обучающимся по направлению/специальности подготовки, где изучают электронную технику.

Пособие рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Электрооборудование и автоматизация технологических процессов», рекомендовано к изданию (протокол № 1 от 03 июня 2026 г.).

Рег. № 9/26 от 23.06.2026 г.

Редактор М. В. Ворожейкина

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северский технологический институт — филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СТИ НИЯУ МИФИ), 2026

Содержание

Введение	6
1 Электронные устройства и их современная классификация	7
1.1 Этапы развития электроники	7
1.2 Классификация электронных устройств	9
1.3 Контрольные вопросы	15
2 Пассивные компоненты электронных устройств	17
2.1 Резисторы	17
2.2 Конденсаторы	28
2.3 Катушки индуктивности	36
2.4 Трансформаторы электронной аппаратуры	41
2.5 Контрольные задания	52
2.5.1 Электрические цепи постоянного тока. Тест	52
2.5.2 Трансформаторы. Тест	54
3 Полупроводники — основа современной элементной базы электроники	57
3.1 Преимущества полупроводниковых элементов перед электровакуумными	57
3.2 Физические основы электропроводности полупроводников	58
3.3 Электропроводность беспримесного (собственного) полупроводника	59
3.4 Электропроводность примесных полупроводников	61
3.5 Контрольные вопросы	69
4 Полупроводниковые диоды	71
4.1 Основные понятия	71
4.1.1 Назначение и классификация	71
4.1.2 Вольт-амперная характеристика диода	72
4.1.3 Пробой p - n -перехода	73
4.1.4 Математическое описание ВАХ диода	74
4.2 Выпрямительные диоды	76
4.3 Импульсные диоды	84
4.4 Стабилитроны и стабилитроны	86
4.5 Туннельные и обращенные диоды	89
4.6 Варикапы	91
4.7 Диоды Шоттки	93
4.8 Тиристоры	95
4.9 Оптоэлектронные компоненты	102
4.9.1 Общие сведения	102
4.9.2 Излучающие диоды	102
4.9.3 Фотодиоды	108
4.9.4 Оптроны	110

4.10	Контрольные вопросы	111
5	Моделирование в среде SimInTech силовой преобразовательной техники.....	113
Приложение А.	Система обозначений полупроводниковых диодов.....	122

Перечень принятых сокращений

i-	—	собственная проводимость;
n-	—	электронная (донорная) проводимость;
p-	—	дырочная (акцепторная) проводимость;
АЭУ	—	аналоговое электронное устройство;
БИС	—	большая интегральная схема;
ВАХ	—	вольт-амперная характеристика;
ДЭУ	—	дискретное электронное устройство;
ИК	—	инфракрасной;
ИС	—	интегральная схема;
ИТ	—	импульсный трансформатор;
ИЭУ	—	импульсное электронное устройство;
СБИС	—	сверх большая интегральная схема;
ТКЕ	—	температурный коэффициент емкости;
ТКС	—	температурный коэффициент сопротивления;
ТТЛ	—	транзисторно-транзисторная логика;
УГО	—	условное графическое обозначение;
УФ	—	ультрафиолетовой;
УЭ	—	управляющий электрод;
ФД	—	фотодиод;
ЭП	—	электронный прибор;
ЭУ	—	электронное устройство.

Введение

В настоящее время невозможно найти отрасль промышленности, в которой не использовались бы электронные приборы или электронные устройства измерительной техники, автоматики и вычислительной техники. Причем тенденция развития такова, что доля электронных информационных устройств и устройств автоматики непрерывно увеличивается. Значительные изменения во многих областях науки и техники обусловлены развитием *электроники*.

Электронику в самом общем смысле можно назвать наукой о формировании потоков электронов и об управлении этими потоками в технических устройствах различного назначения.

Несмотря на различие областей применения и многообразие режимов работы электронных устройств, все они строятся на общих принципах и состоят из ограниченного числа электронных приборов (ЭП). Для грамотной эксплуатации готовых электронных устройств и правильного применения ЭП в новых разработках, научных исследованиях инженеру необходимо знать их основные характеристики и параметры.

Промышленность выпускает почти все электронные функциональные узлы, необходимые для создания устройств измерительной и вычислительной техники, а также систем автоматики.

В развитии электроники на протяжении многих лет остается стабильным только одно — это непрерывное изменение элементной и схемотехнической баз.

1 Электронные устройства и их современная классификация

1.1 Этапы развития электроники

В основе развития электроники лежит непрерывное усложнение функций, выполняемых электронными устройствами. На определенных этапах становится невозможным решать новые задачи старыми электронными средствами, т.е. средствами на основе существующей элементной базы, например, с помощью электронных ламп. Так появляются предпосылки для дальнейшего совершенствования элементной базы.

Основными факторами, вызывающими необходимость разработки электронных устройств на новой элементной базе, являются повышение надежности, уменьшение габаритов, массы, стоимости и потребляемой мощности.

В зависимости от применяемой элементной базы можно выделить четыре основных поколения развития промышленной электроники, а вместе с ней, соответственно, и электронных устройств [1, 2].

I поколение (1904–1950 гг.) характеризуется тем, что основу элементной базы электронных устройств составляли электровакуумные приборы, в которых пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной рабочей средой (парами или газами) и действие которых основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе.

В соответствии с характером рабочей среды электровакуумные приборы подразделяют на электронные и на ионные.

Электронный электровакуумный прибор — прибор, в котором электрический ток создается только свободными электронами. *Ионный электровакуумный прибор* — прибор с электрическим разрядом в газе или парах. Этот прибор называют также газоразрядным.

Семейство электронных электровакуумных приборов обширно и объединяет такие группы приборов, как электронные лампы, электронно-лучевые приборы, электровакуумные фотоэлектрические приборы и др. Наиболее широко в элементной базе электронных устройств I-го поколения применялись электронные лампы — электровакуумные приборы, предназначенные для различного рода преобразований электрического тока. Электронные устройства, выполненные на лампах, имели сравнительно большие габариты и массу. Число элементов в единице объема (плотность монтажа) электронных устройств I-го поколения составляло $\gamma = 0,001\text{--}0,003\text{ эл/см}^3$. Сборка таких электронных устройств осуществлялась, как правило, вручную, путем соединения электровакуумных приборов между

собой и с соответствующими пассивными элементами (резисторами, катушками индуктивности и конденсаторами) с помощью проводов.

II поколение (1950 — начало 60-х годов) характеризовалось применением в качестве основной элементной базы дискретных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и тиристоров). Сборка электронных устройств II-го поколения осуществлялась обычно автоматически с применением печатного монтажа, при котором полупроводниковые приборы и пассивные элементы располагались на печатной плате — диэлектрической пластине с металлизированными отверстиями (для подсоединения полупроводниковых приборов и пассивных элементов), соединенными между собой проводниками. Проводники выполнялись путем осаждения медного слоя на плату по заранее заданному печатному рисунку, соответствующему определенной электронной схеме. Плотность монтажа электронных устройств II-го поколения за счет применения малогабаритных элементов составляла $\gamma \approx 0,5$ эл/см³.

III поколение электронных устройств (1960—1980 гг.) связано с бурным развитием микроэлектроники — раздела электроники, охватывающего исследование и разработку качественно нового типа электронных приборов — интегральных схем и принципов их применения. Основой элементной базы этого поколения электронных устройств стали интегральные схемы и микросборки.

Интегральная схема представляет собой совокупность нескольких взаимосвязанных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле, т. е. одновременно, на одной и той же несущей конструкции (подложке), и выполняющих определенную функцию преобразования информации. Микросборка представляет собой ИС, в состав которой входят однотипные элементы (например, только диоды или только транзисторы).

Широкое развитие находит блочная конструкция электронных устройств — набор печатных плат, на которые монтируют ИС и микросборки. Плотность монтажа электронных устройств III-го поколения составляет $\gamma \leq 50$ эл/см³.

Этот этап развития электронных устройств характеризуется не только резким уменьшением габаритов, массы и энергопотребления, но и резким повышением их надежности, в том числе и за счет сведения к минимуму ручного труда при изготовлении электронных устройств.

IV поколение (с 1980 г. по настоящее время) характеризуется дальнейшей микроминиатюризацией электронных устройств на базе применения БИС и СБИС, когда уже отдельные функциональные блоки выполняются в одной интегральной схеме, представляющей собой готовое электронное устройство приема, преобразования или передачи информации. Такие электронные устройства, выполненные в виде СБИС, и ряде случаев позволяют полностью обеспечить требуемый алгоритм обработки исход-

ной информации и существенно повысить надежность их функционирования.

Плотность монтажа электронных устройств IV-го поколения $\gamma = 1000$ эл/см³ и выше [2].

1.2 Классификация электронных устройств

Электронные устройства по способу формирования и передачи сигналов управления подразделяются на два класса: аналоговые (непрерывные) и дискретные (прерывистые) [3].

Аналоговые электронные устройства предназначены для приема, преобразования и передачи электрического сигнала, изменяющегося по закону непрерывной (аналоговой) функции. В аналоговом электронном устройстве (АЭУ) каждому конкретному значению реальной физической величины на входе датчика соответствует однозначное, вполне определенное значение выбранного электрического параметра постоянного или переменного тока. Это может быть напряжение или ток на участке электрической цепи, его частота, фаза и т. п.

Достоинствами АЭУ являются:

- теоретически максимально достижимые точность и быстродействие;
- простота устройства.

Недостатками АЭУ являются:

- низкая помехоустойчивость и нестабильность параметров, обусловленные сильной зависимостью свойств устройства от внешних дестабилизирующих воздействий (температуры, времени (старение элементов), действия внешних полей и т. п.);
- большие искажения при передаче на значительные расстояния;
- трудность длительного хранения результата;
- низкая энергетическая эффективность.

Примером устройства аналогового отображения информации является обычный потенциометр (рисунок 1.1), преобразующий линейное перемещение x в напряжение $U_{вых}$ [3].

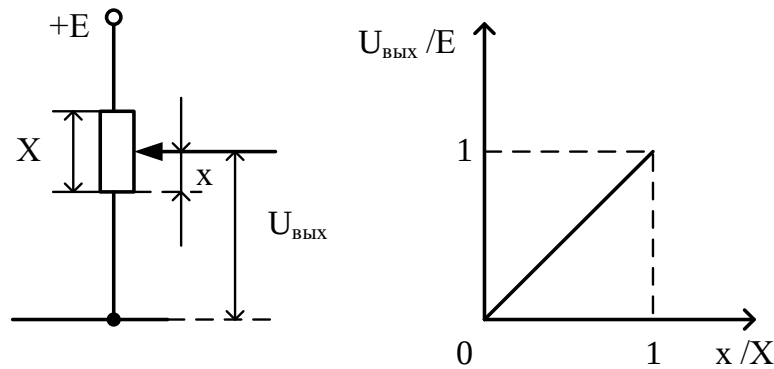


Рисунок 1.1 — Потенциометрический датчик, преобразующий линейное перемещение x в напряжение $U_{\text{вых}}$

Дискретные электронные устройства (ДЭУ) предназначены для приема, преобразования и передачи электрических сигналов, полученных путем квантования по времени и/или уровню исходной аналоговой функции $x(t)$. Поэтому действующие в них сигналы пропорциональны конечному числу выбранных по определенному закону значений реальной физической величины, отображаемой в виде различных параметров импульсов или перепадов напряжения или тока. Поскольку обычно интересуются не только конкретными значениями $x(t)$, но и ее изменением, для передачи информации используют последовательности импульсов или перепадов.

Основные параметры импульсных последовательностей (см. рисунок 1.2), используемых в ДЭУ для отображения информации, являются [2]:

U_m — амплитуда импульса или перепада: наибольшее отклонение напряжения от исходного, установившегося значения U_0 ;

t_ϕ , t_{cn} — длительности фронта и спада импульса — временной интервал между моментами, в которые мгновенное напряжение u удовлетворяет условию $0,1U_m \leq u \leq 0,9U_m$.

Для перепадов аналогичные параметры называют длительностью фронта положительной t_ϕ^+ и отрицательной t_ϕ^- ;

t_u — длительность импульса — временной интервал между моментами на соседних интервалах / t_ϕ и t_{cn} , для которых $u = 0,5U_m$;

T — период следования импульсов — временной интервал между моментами на соседних интервалах t_ϕ и t_{cn} , для которых $u = 0,5U_m$.

Величина $f=1/T$ называется частотой следования импульсов;

$t_n = T - t_u$ — длительность паузы между импульсами;

$K_3 = t_u / T$ — коэффициент заполнения импульсов;

$\gamma = T/t_u$ — скважность импульсов.

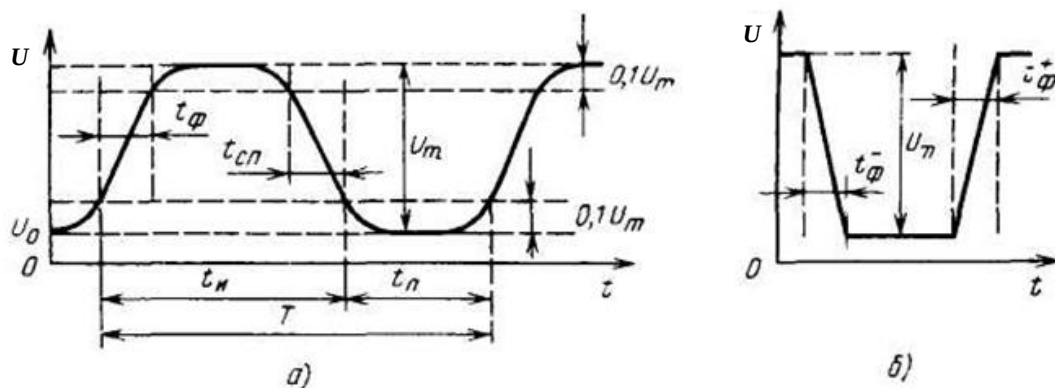


Рисунок 1.2 — Основные параметры импульсных последовательностей

Периодически повторяющиеся перепады напряжения с производными du/dt различных знаков (положительные $du/dt > 0$ и отрицательные $du/dt < 0$ перепады) образуют импульсы прямоугольной формы. В частном случае, когда положительные и отрицательные перепады следуют через равные промежутки времени, напряжение прямоугольной формы называют *меандром*.

В ДЭУ хотя каждому значению реальной физической величины ставится в соответствие вполне определенный параметр импульсного сигнала, но так как информация о ее изменении может быть получена только при сравнении двух импульсов, получение такой информации растягивается во времени. Следовательно, для получения полной информации о конечном во времени физическом процессе необходимо бесконечное число импульсов, т. е. временные масштабы протекания физического процесса и его отображения при помощи импульсов не совпадают. Поэтому в ДЭУ используется только часть информации о реальной физической величине, т. е. процесс представления информации сопряжен с частичной ее потерей [1].

К достоинствам ДЭУ следует отнести следующее [1, 3].

1) В дискретных устройствах мощности импульсная P_u и средняя P_{cp} связаны соотношением

$$P_u = \gamma P_{cp}$$

Как видно, при большой скважности ($\gamma \rightarrow \infty$) можно получить существенное превышение мощности в импульсе над средним ее значением. Это (по сравнению с аналоговыми устройствами) способствует улучшению массогабаритных показателей отдельных элементов ДЭУ.

2) В ДЭУ усилительные приборы (транзисторы) используют в специфическом режиме ключа (включено/выключено), при котором мощ-

ность, рассеиваемая в них, минимальна. Это повышает коэффициент использования усилительного прибора.

Мощность нагрузки может многократно превышать мощность, рассеиваемую в самом усилительном приборе. Это позволяет для управления большой мощностью применять в ДЭУ маломощные усилительные приборы. В транзисторных устройствах кратность превышения мощности может достигать 10–20.

3) Свойства дискретных устройств в меньшей степени зависят от нестабильности параметров используемых элементов. Это объясняется как меньшим тепловыделением, что, снижая перегрев, сужает реальный диапазон рабочих температур, так и работой полупроводниковых приборов в режиме ключа.

4) Помехоустойчивость ДЭУ выше, чем АЭУ, так как при передаче импульсов сокращается время, в течение которого помеха может повлиять на передаваемый сигнал.

5) ДЭУ характеризуются применением однотипных элементов в каналах обработки, передачи и хранения информации. В связи с этим облегчается их изготовление средствами интегральной технологии, обеспечивающей повышенную надежность, малогабаритность, дешевизну и т. п.

Указанные достоинства ДЭУ обусловили их широкое использование во многих областях как силовой, так и информационной электроники (радиолокации, телевидении, вычислительной технике), метрологии и т. п.

В свою очередь по типу квантования сигнала ДЭУ подразделяются на три подкласса: импульсные, релейные и цифровые.

Импульсные электронные устройства (ИЭУ) реализуют квантование (дискретизацию) исходного сигнала $x(t)$ (рисунок 1.3) по времени и преобразуют его в последовательность импульсов, как правило, неизменной частоты. В ИЭУ хотя и нарушается непрерывность представления сигналов (информация) во времени, сами значения для выбранных моментов времени точно соответствуют значениям $x(t)$, т. е. непрерывность сигнала по величине сохраняется.

Процесс преобразования исходной аналоговой информации в последовательность импульсов носит название импульсной модуляции. В процессе импульсной модуляции форма импульсов исходной последовательности, как правило, остается неизменной [1-3].

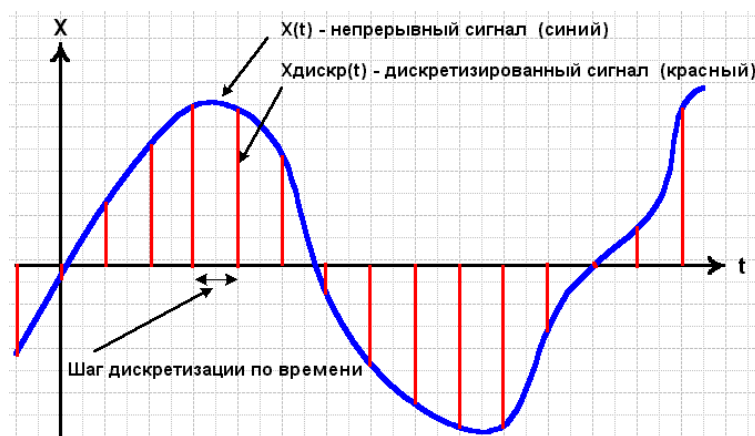


Рисунок 1.3 — Дискретизация сигнала по времени

На практике наибольшее распространение получили:

- амплитудно-импульсная модуляция (АИМ);
- широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
- фазоимпульсная модуляция (ФИМ).

Релейные электронные устройства (РЭУ) реализуют квантование исходного сигнала $x(t)$ по уровню и преобразуют его в ступенчатую функцию, высота каждой из ступенек которой пропорциональна некоторой наперед заданной величине h (шаг квантования) (см. рисунок 1.4). Изменение уровня сигнала происходит в произвольные моменты времени, определяемые только заданными уровнями nh и величиной $x(t)$. Поэтому аналогично с ИЭУ в моменты формирования ступенек сигнал РЭУ точно отражает значение исходной $x(t)$. Следовательно, при дискретизации представления по величине в РЭУ сохраняется непрерывность отображения информации во времени.

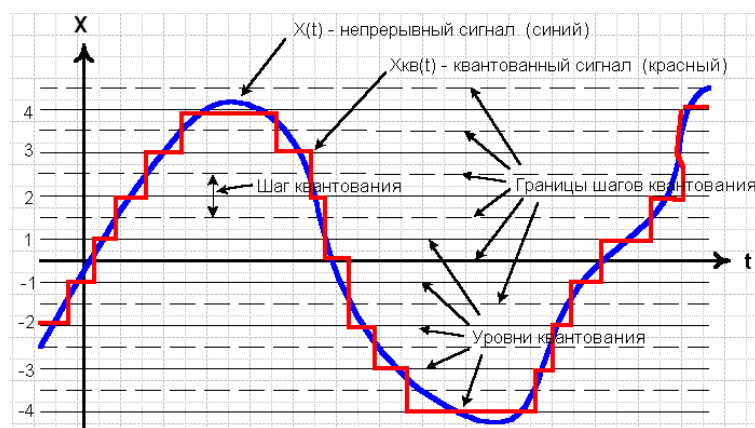


Рисунок 1.4 — Квантование сигнала по уровню

Основная область применения РЭУ связана не с преобразованием информации, а с преобразованием энергии, т. е. с силовой электроникой.

По сравнению с ИЭУ они, как правило, проще (отсутствует импульсный модулятор) и обладают большим быстродействием.

Цифровые электронные устройства (ЦЭУ) реализуют квантование исходного сигнала $x(t)$ как по времени, так и по величине (рисунок 1.5). Поэтому, в фиксированные моменты времени такие сигналы только приближенно соответствуют значениям $x(t)$. Очевидно, чем больше дискретных значений, которые может принимать сигнал, т. е. чем больше уровней дискретизации, тем точнее соответствует дискретный сигнал аналоговому. Однако в любом случае имеем дело с конечным числом его значений. Таким образом, в дискретном сигнале нарушена непрерывность представления информации как по величине, так и во времени [1-3].

В свою очередь, конечному числу дискретных значений исходной физической величины можно поставить в соответствие некоторое число. Процесс замены дискретных уровней сигнала последовательностью чисел носит название кодирования, а совокупность полученных чисел называется кодом сигнала. Таким образом, процесс непосредственного преобразования и передачи сигналов можно заменить процессом преобразования и передачи кодов, поставленных в соответствие исходным сигналам.

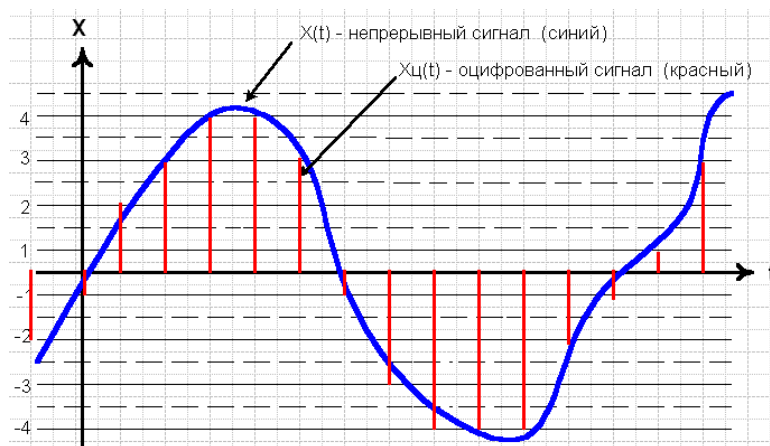


Рисунок 1.5 — Квантование сигнала по уровню и по времени

Устройства, занимающиеся формированием, преобразованием и передачей кодов, поставленных в соответствие реальным значениям физических переменных, называют *цифровыми устройствами*.

Передача кодов, каждый из которых, как правило, представляется некоторой последовательностью однотипных импульсов, требует некоторого времени. Очевидно, что это время больше времени, необходимого для передачи той же информации в импульсной и тем более в непрерывных системах. Поэтому при прочих равных условиях количество информации, передаваемой цифровым способом, минимально [1-3].

Достоинства ЦЭУ:

- высокая помехоустойчивость;

- высокая надежность;
- возможность длительного хранения информации без ее потери;
- экономическая эффективность, обусловленная высокой технологичностью и повторяемостью устройств;
- энергетическая эффективность, а также совместимость с интегральной технологией.

Недостатки ЦЭУ:

- малое быстродействие;
- малая точность.

Однако меньшее быстродействие цифровых устройств с лихвой окупается возможностью унификации самих цифровых элементов, что позволяет с помощью их большого количества успешно решать вопросы повышения точности и быстродействия ЦЭУ.

Минимально возможный объем, который может занимать ЭУ, в конечном счете, определяется количеством теплоты, выделяемой в этом объеме. Поэтому использование дискретных методов обработки информации позволяет реализовать ДЭУ в значительно меньшем объеме, чем в случае аналоговой информации.

Ранее отмечено, что способность реализации сложных алгоритмов обработки информации в минимальных объемах с минимальными затратами и высокой надежностью работы является основной причиной повсеместного использования электронных устройств. Сказанному в полной мере отвечают цифровые электронные устройства, которые, несмотря на меньшее быстродействие и точность по сравнению с другими рассмотренными типами ЭУ, получают в настоящее время все большее распространение.

Все современные ЭУ, независимо от типа, являются, как правило, твердотельными устройствами, принцип действия которых основан на протекании электрического тока через полупроводниковые материалы [1-3].

1.3 Контрольные вопросы

- 1) Сколько поколений элементной базы можно выделить к настоящему времени?
- 2) В чем принципиальное отличие элементной базы III-го и IV-го поколений?
- 3) Что общего между элементной базой II-го, III-го и IV-го поколений?
- 4) Что понимается под квантованием сигнала по уровню и по времени?
- 5) Какие типы электронных устройств знаете?

6) Каковы основные признаки аналоговых, импульсных и цифровых электронных устройств?

7) Какие параметры электрических сигналов могут использоваться в аналоговых, импульсных и цифровых устройствах для отображения реальной физической величины?

8) Какие электронные устройства могут обеспечить наибольшую точность отображения информации о реальной физической величине?

9) Какие параметры импульсов используются для отображения реальной физической величины при амплитудной, широтной и фазовой модуляциях?

10) Что понимается под кодированием информации в цифровых устройствах?

11) Что является причиной широкого распространения цифровых устройств?

2 Пассивные компоненты электронных устройств

2.1 Резисторы

Резисторы (сопротивления) — это наиболее распространенные компоненты электронной аппаратуры, с помощью которых осуществляется регулирование и распределение электрической энергии между цепями и элементами схем [3].

В зависимости от назначения резисторы подразделяются на две группы:

1) общего назначения (диапазоны номиналов 10 Ом–10 МОм, номинальные мощности рассеивания 0,062–100 Вт);

2) специального назначения, которые подразделяются на:

а) высокоомные резисторы (от десятков мегаом до сотен тераом, рабочее напряжение 100–400 В);

б) высоковольтные (сопротивления до 10^{11} Ом, рабочее напряжение единицы — десятки киловольт);

в) высокочастотные (имеют малые собственные емкости и индуктивности);

г) прецизионные (повышенная точность — допуск 0,001–1%, стабильность, номиналы от 0,1 Ом до 10 МОм, номинальные мощности рассеивания до 2 Вт).

Переменные резисторы подразделяются на *подстроечные* и *регулируемые* [3, 6].

Подстроечные резисторы рассчитаны на проведение подстройки электрических режимов и имеют небольшую износостойчивость (до 1000 циклов перемещения подвижной части).

Регулируемые резисторы рассчитаны для проведения многократных регулировок. Они отличаются большей износостойчивостью (более 5000 циклов). В зависимости от характера изменения их сопротивлений при перемещении подвижной части регулировочные резисторы делятся на резисторы с:

- линейной функциональной характеристикой (А);
- нелинейной функциональной характеристикой.

Нелинейная функциональная характеристика может быть логарифмической (Б), обратнологарифмической (В), характеристиками типа И, Е (рисунок 2.1, а, б).

На рисунках использованы следующие обозначения:

- α_n , и α — полный и текущий углы поворота подвижной части;
- R_n , и R — полное и текущее значения сопротивления

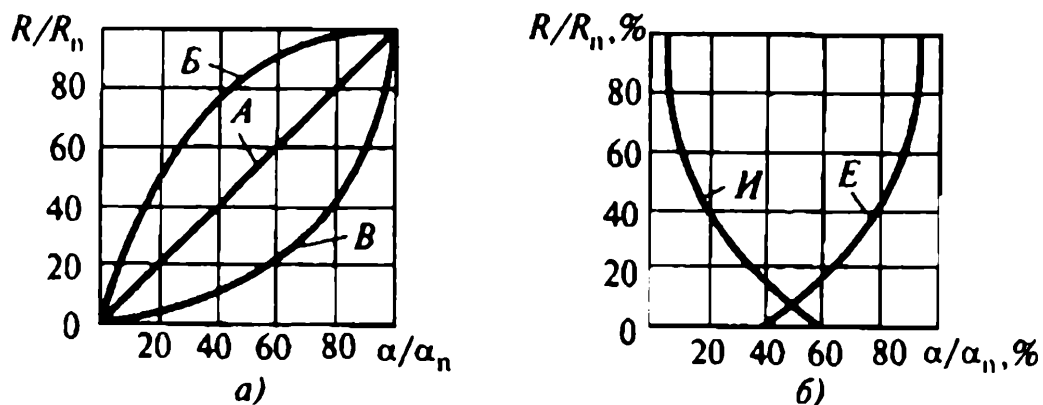


Рисунок 2.1 — Функциональные характеристики переменных резисторов:
 а — линейная (А), логарифмическая (Б); антилогарифмическая (В);
 б — характеристики типа И, Е;

Проводящий элемент резистора выполняют в виде пленки, осажденной на поверхность изоляционного основания; проволоки или микропроволоки; объемной конструкции.

В зависимости от материала, использованного для создания проводящего элемента, резисторы подразделяют на:

- проволочные;
- непроволочные;
- металлофольговые (проводящий элемент выполнен из фольги, нанесенной на непроводящие основания).

У проволочных и металлофольговых резисторов в качестве материала проводящего элемента используют манганин и нихром [3, 6].

Непроволочные резисторы можно подразделить на следующие группы [3, 6]:

а) углеродистые и бороуглеродистые (проводящий элемент — пленка пиролитического углерода или его соединений, осажденная на непроводящее основание);

б) металлодиэлектрические, металлопленочные или металлооксидные (проводящий элемент — микрокомпозиционный слой из диэлектрика и металла или пленки из металла, оксида металла или его сплавов);

в) композиционные (проводящий элемент — гетерогенная система из нескольких компонентов, один из которых проводящий, например, графит или сажа);

г) полупроводниковые (проводящий элемент выполнен из полупроводникового материала).

По конструктивному исполнению резисторы изготавливают в нормальном и тропическом (всеклиматическом) вариантах и выполняют неизолированными (касание токоведущих частей не допускается), изолированными (касание токоведущих частей допускается), герметизированными

ми, в том числе и вакуумными (герметично изолированными от окружающей среды).

У любого резистора есть тепловые шумы. Они появляются вследствие тепловых движений носителей зарядов (электронов) внутри твердого тела. Их среднюю мощность определяют из формулы Найквиста [1, 7]

$$P_{ш}=4KT\Delta f,$$

где K — постоянная Больцмана, $K= 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T — абсолютная температура;

Δf — полоса частот, в которой измеряется мощность, $\Delta f = f_2 - f_1$.

Действующее значение напряжения шумов связано с их мощностью уравнением

$$P_{ш}=U_{ш}^2/R.$$

При температуре $T = 293$ К это уравнение имеет вид

$$U_{ш}=0,127(R\Delta f)^{1/2},$$

где R — в килоомах,

Δf — в килогерцах,

$U_{ш}$ — в микровольтах.

Напряжение тепловых шумов имеет случайный характер. Кроме того, резистор имеет токовые шумы, возникающие при приложении к нему электрического напряжения.

Уровень токовых шумов оценивают отношением действующего значения переменной составляющей напряжения на резисторе, измеренной в полосе частот, $\Delta f = f_2 - f_1$ к постоянному напряжению на нем U :

$$D= U_{ш}/U$$

Основная причина появления этого шума — временное изменение объемной концентрации электронов и изменение контактных сопротивлений между зернами проводника, имеющего зернистую структуру [7].

Значения шумов у непроволочных резисторов в зависимости от группы, на которые их иногда разделяют, находятся в пределах 1 мкВ/В (группа А), 5 мкВ/В (без обозначения).

У регулируемых резисторов этот показатель значительно выше и достигает значений 50 мкВ/В (у резисторов типа СП). Приведенные цифры обычно задаются для полосы частот от $f_1 = 60$ Гц до $f_2 = 6$ кГц, т. е. для

двух декад. У проволочных резисторов значения шумов при тех же f_1 и f_2 порядка 0,1 мкВ/В.

В эквивалентную схему резистора (рисунок 2.2) кроме сопротивления R входят конденсатор C и индуктивность L . Это обусловлено тем, что любой реальный резистор, даже выполненный в виде прямолинейного бруска, имеет определенную индуктивность. Емкость появляется между участками резистора, а также между резистором и близлежащими элементами. Индуктивность и емкость имеют распределенный характер. Однако для упрощения это обычно не учитывают и используют одну из эквивалентных схем, показанных на рисунке 2.2, а, б [2].

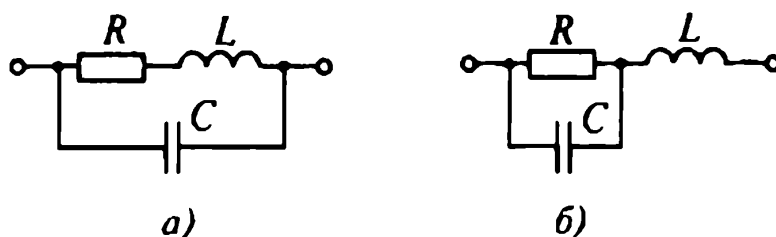


Рисунок 2.2 — Эквивалентные схемы резистора

Наличие индуктивности и емкости приводит как к появлению реактивной составляющей, так и к некоторому изменению эквивалентного значения активной составляющей. Кроме того, в проволочных резисторах из-за проявлений поверхностного эффекта сопротивление изменяется при повышении частоты. Это существенно проявляется с частоты в несколько мегагерц. Но в точных устройствах поверхностный эффект следует учитывать с частоты в несколько килогерц. Так, сопротивление медного провода диаметром 1 мм при $f=10$ кГц увеличивается на 0,01%.

При длительной эксплуатации происходит старение резисторов и их сопротивление изменяется. Например, у резисторов типа С2-6 сопротивление может измениться до 20% после 15 000 ч работы. У некоторых типов резисторов после их выдержки в течение нескольких часов при повышенной температуре сопротивление не возвращается к начальному значению.

Номинальное сопротивление резистора должно соответствовать одному из шести рядов: Е6; Е12; Е24; Е48; Е96; Е192 [2].

Значение сопротивления находят умножением или делением на 10^n (где n — целое положительное число или нуль) чисел номинальных величин, входящих в состав ряда. Их количество определяется цифрой, стоящей после буквы Е. Так, например, для ряда Е6 эти числа равны 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8.

Ряд допустимых отклонений также нормализован. Допуски указываются в процентах в соответствии с рядом $\pm 0,001$; $\pm 0,002$; $\pm 0,005$; $\pm 0,02$; $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; $\pm 1,0$; $\pm 2,0$; $\pm 5,0$; ± 10 ; ± 20 ; ± 30 [2].

Значение сопротивления некоторых типов резисторов может меняться в зависимости от приложенного напряжения. Причиной этого является зависимость концентрации носителей тока и их подвижности от напряженности электрического поля. Учитывают это явление с помощью коэффициента напряжения (K_u) [3, 7]

$$K_u = ((R_1 - R_2) / R_1) \cdot 100\%,$$

где R_1 и R_2 — сопротивления, измеренные при напряжениях, соответствующих 10%-ной и 100%-ной номинальной мощности рассеяния резистора.

Значение K_u может достигать от единиц до десятков процентов.

Система условных обозначений предусматривает как полные, так и сокращенные условные обозначения [3].

Полное обозначение обычно используется в технической документации, например Р1-33И-0,25 Вт — 100 кОм ± 2% А 0.467 027 ТУ. Оно состоит из сокращенного обозначения (Р1-33И), обозначений и величин основных параметров и характеристик (0,25 Вт — 100 кОм ± 2% А), А — группа по уровню шумов, обозначений документа на поставку (0.467.027 ТУ).

Сокращенное условное обозначение состоит из трех элементов [3]:

- первый — буква или сочетание букв, обозначающих подкласс резистора (Р — постоянные резисторы, РП — переменные резисторы, НР — наборы резисторов);
- второй — цифра 1 для непроволочных или 2 для проволочных резисторов;
- третий — цифра, обозначающая регистрационный номер каждого типа.

Например, резисторы постоянные непроволочные с номером 26 имеют обозначение Р1-26.

На практике используются резисторы, обозначение которых выполнено в соответствии с ГОСТами и принципами, которые в новых разработках не применяются, например, С2-26, СП5-40, МЛТ, ПКВ, СПО и др. [3]

Маркировка резисторов содержит полное или кодированное обозначение номинальных сопротивлений и их допускаемых отклонений.

Полное обозначение состоит из значения номинального сопротивления и обозначения единицы измерения (Ом — ом, кОм — килоом, МОм — мегаом; ГОм — гигаом; ТОм — тераом). Например, 365 Ом; 100 кОм; 4,7 МОм; 3,3 ГОм; 1 ТОм.

Кодированное обозначение состоит из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву.

Буква обозначает множитель, на который умножается цифровое обозначение. Буквы R, K, M, G, T соответствуют множителям 1, 10^3 , 10^6 , 10^9 ,

10¹². Например, 0,1 Ом — R1 (E1); 10 Ом — 10R (10E); 100 Ом — 100R (100E) или K10; 100 кОм — 100 K или M10; 1 МОм — 1 M0; 33,2 МОм — 33M2; 100 МОм — 100 M или G10; 590 МОм — 590 M или G59 (Г59); 1 ГОм — 1 G0 (1ГО); 100 ГОм — 100 G (100Г) или T10; 1 ТОм — 1 T0 [3].

Полное обозначение допускаемого отклонения состоит из цифр, а кодированное — из букв, приведенных в таблице 2.1 [2, 3].

Таблица 2.1 — Обозначение допускаемого отклонения

Допустимое отклонение, %	Кодированное обозначение		Допустимое отклонение, %	Кодированное обозначение
±0,001	C		±0,25	C
±0,002	L		±0,5	D
±0,005	R		±1	F
±0,01	P		±2	G
±0,02	U		±5	I
±0,05	X		±10	K
±0,1	B		±20	M
			±30	N

Кодированное обозначение резистора с номинальным сопротивлением 475 Ом с допускаемым отклонением ±2% — K475G.

Основные параметры резисторов [3]

- 1) Номинальные сопротивления.
- 2) Допускаемые отклонения сопротивлений от номинальных величин.
- 3) Номинальные мощности рассеивания (максимальная мощность, которую резистор может рассеивать без изменения своих параметров выше значений, указанных в технической документации, при непрерывной электрической нагрузке и определенной температуре окружающей среды).
- 4) Предельное рабочее напряжение (напряжение, которое может быть приложено к резистору без нарушения его работоспособности).
- 5) Температурный коэффициент сопротивления (характеризует изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1 °C)

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_1 \cdot \Delta t} \cdot 100 \%,$$

где R_l — сопротивление резистора при нормальной температуре;

Δt — предельная разность между предельной положительной (отрицательной) и нормальной температурами;

ΔR — алгебраическая разность между значениями сопротивлений, измеренными при предельной положительной (отрицательной) и нормальной температуре.

6) Уровень собственных шумов D (мкВ/В).

7) Максимальная температура окружающей среды для номинальной мощности рассеивания.

8) Коэффициент напряжения K_u .

9) Влагоустойчивость и термостойкость.

Промышленность выпускает резисторы:

- общего назначения (МЛТ, ОМЛТ, С2-6, С2-11, С2-23, С2-33 и др.);
- прецизионные (С2-1, С2-13, С2-14, С2-31 и др.);
- высокомегаомные (КВМ, КЛМ, С3-13, С3-14 и др.);
- высоковольтные (КЭВ, С3-9, С3-12, С3-14 и др.);
- высокочастотные (С2-10, С2-34, С3-8 и др.).

П р и м е ч а н и е — МЛТ — старое обозначение типа резистора (металлопленочные лакированные теплостойкие).

Номенклатура подстроенных и регулировочных резисторов также достаточно велика (СП5-1, СП5-6, РП-25, РП-80; СП5-21, СП5-30, СП5-54, СПО, СПЗ-10 и др.).

В практике кроме *линейных* иногда используются *термозависимые* (терморезисторы) и *нелинейные* (варисторы) резисторы [3].

Терморезисторы выполняют или из металла, сопротивление которого линейно меняется при изменениях температуры (медь, платина), или на основе полупроводников. Для этой группы основной характеристикой является температурная.

В некоторых случаях сопротивление терморезистора меняют за счет его нагрева от специального подогревателя, электрически изолированного от терморезистора. Такие терморезисторы называются подогревными или терморезисторами с косвенным подогревом.

Основное применение компонентов этого типа — параметрическая термостабилизация электронных цепей, компенсация температурных погрешностей, измерение температуры, регулирование в электрических цепях [3].

Промышленность выпускает терморезисторы типов СТ1-21, СТЗ-21, СТ1-27, СТЗ-27, СТЗ-31 и др., причем терморезисторы с косвенным подогревом типа СТ1-31 предназначены для использования в качестве бесконтактных управляемых сопротивлений в цепях постоянного и переменного

токов. Зависимость их сопротивления от тока подогревателя приведена на рисунке 2.3.

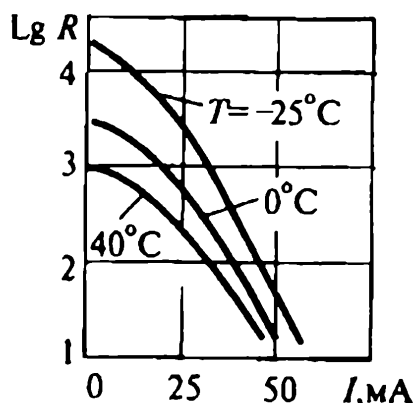


Рисунок 2.3 — Зависимость сопротивления терморезистора от тока подогрева

Нелинейные резисторы, сопротивление которых зависит от напряженности электрического поля, называют *варисторами*. Как правило, их изготавливают из карбида кремния. Нелинейность появляется из-за явлений, наблюдаемых на поверхностях зерен кристалла, из которого спрессован варистор (автоэлектронная эмиссия из острых углов и граней кристалла; увеличение электропроводности за счет пробоев оксидных пленок, покрывающих зерна, в сильных электрических полях напряженностью свыше 10^3 – 10^4 В/см; микронагрев точек контакта между зернами; наличие *p-n*-переходов, обусловленных различной электропроводностью отдельных зон, и пр.).

ВАХ варисторов приведены на рисунке 2.4. Характеристика 2 имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Варисторы с такими ВАХ называют негисторами [3].

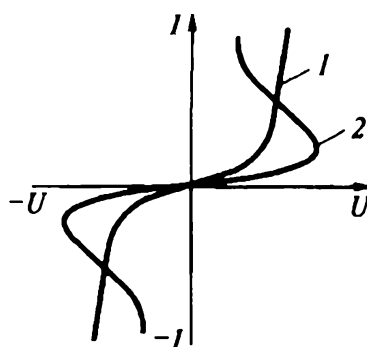


Рисунок 2.4 — Вольт-амперные характеристики варисторов
1 — варистор без участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением;
2 — негистор

Условные графические обозначения резисторов (ГОСТ 2.728-74) показаны на рисунке 2.5 [4].

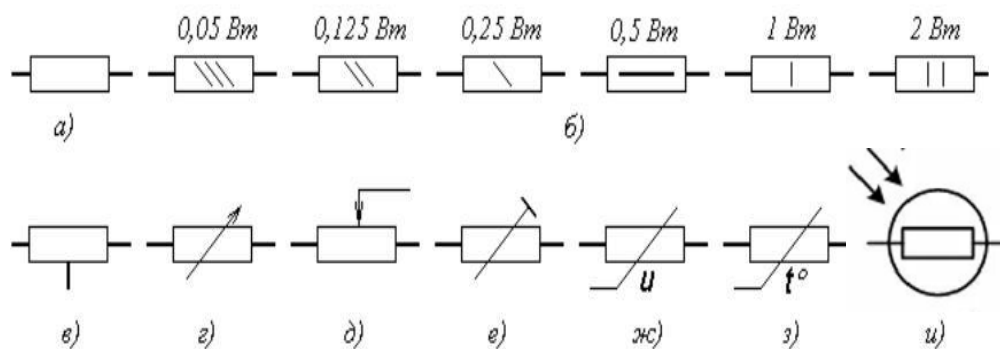


Рисунок 2.5 — Условные графические обозначения резисторов в принципиальных электрических схемах

На рисунке представлены следующие типы резисторов [3, 4]:

- а — нерегулируемый (общее обозначение);
- б — нерегулируемые с указанием (кодированием) номинальной мощности;
- в — нерегулируемый с отводом;
- г, д — переменного сопротивления;
- е — подстроечный;
- ж — нелинейный (варистор);
- з — нелинейный (терморезистор прямого подогрева);
- и — нелинейный (фоторезистор).

Терморезисторы, имеющие положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС), называются *позисторами*. Их обычно изготавливают из полупроводниковых твердых растворов, полученных на основе титана бария. Удельное сопротивление таких материалов в зависимости от состава находится в пределах $10\text{--}10^3$ Ом см и увеличивается на несколько порядков при увеличении температуры выше определенного значения (в области перехода в так называемую параэлектрическую модификацию).

Вольт-амперная характеристика позистора имеет вид, показанный на рисунке 2.6. Максимальное значение тока на ней I_k , которое соответствует напряжению U_k , называют пороговым или током опрокидывания. Электрическая мощность, рассеиваемая в позисторе при токе I_k и напряжении U_k , равная $P_k = U_k I_k$, становится достаточной для его разогрева выше «температуры переключения», при которой сопротивление резко увеличивается. Пока ток через позистор меньше I_k ($I < I_k$) и напряжение на нем меньше U_k ($U < U_k$), сопротивление позистора мало. При достижении током значения I_k он разогревается. Сопротивление его увеличивается, а ток уменьшается. При этом падение напряжения на позисторе будет больше, чем U_k [3].

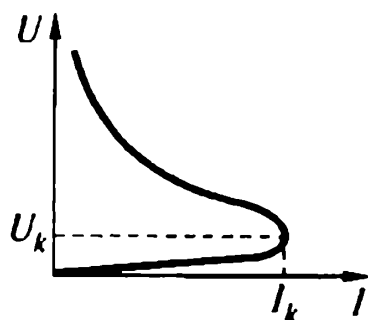


Рисунок 2.6 — Вольт-амперная характеристика позистора

Установившееся значение тока и падение напряжения можно найти, исходя из баланса рассеиваемой в позисторе электрической мощности P

$$P = U \cdot I,$$

и мощности, отдаваемой в окружающую среду. Температурная зависимость сопротивления у одного из типов позистора (ТРП-9) показана на рисунке 2.7. Из нее видно, что пока температура меньше $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, сопротивление позистора изменяется мало. Его значение порядка 10 Ом в зоне температур $0\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как только позистор нагревается свыше $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, его сопротивление существенно увеличивается (на несколько порядков). В итоге ток в электрической цепи резко уменьшается. Температурный коэффициент сопротивления за точкой с температурой $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $14\text{--}17\text{ \%/град.}$ [3].

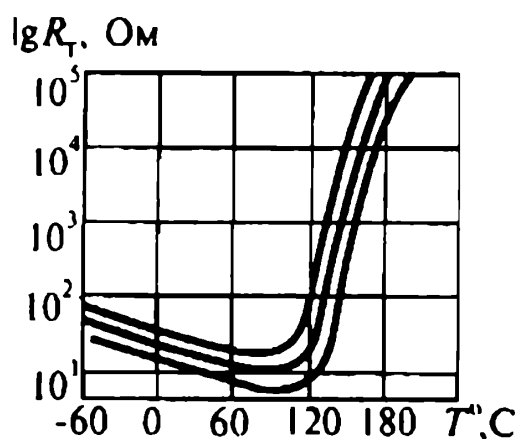


Рисунок 2.7 — Изменение сопротивления терморезистора ТРП-9 в зависимости от температуры

Так как изменение сопротивления связано с температурой позистора, которая не может измениться мгновенно, динамические свойства принято характеризовать временем опрокидывания. Под ним понимают промежуток времени, в течение которого начальный ток уменьшается в два раза. Время

опрокидывания, оцениваемое секундами, зависит от значения начального тока и уменьшается при его увеличении.

Позисторы обычно используются для токовой защиты электрических цепей различного назначения, например, для защиты блоков питания. Пока блок питания работает в нормальном режиме, мощность, рассеиваемая в позисторе, меньше, чем P_k . Температура его существенно ниже 120 °С и сопротивление имеет низкую величину (около 10 Ом у ТРП-9). При увеличении нагрузки на блок питания ток первичной обмотки повышается. Если мощность, рассеиваемая на позисторе, превысит значение P_k , то он нагревается. Его сопротивление увеличивается, что приводит к уменьшению тока в первичной обмотке и его ограничению на том уровне, при котором будет обеспечиваться баланс энергий рассеиваемой на позисторе и отдаваемой в окружающую среду.

Основные параметры позисторов [3]

1) Номинальное сопротивление при температуре 25 °С (единицы ом — десятки ом).

2) Допуск на номинальное сопротивление, % (обычно ± 30 %).

3) Температура переключения (порядка 120°С).

4) Ток опрокидывания I_{opr} , равный при температуре 25 °С пороговому току I_k (280–390 мА у ТРП-9).

5) Предельное значение тока опрокидывания, при котором начинается ограничение тока при любой температуре из рабочего диапазона температур окружающей среды, заданного для конкретного позистора (420–500 мА у ТРП-9).

6) Время опрокидывания (время уменьшения начального тока в 2 раза, у ТРП ≤ 2 с).

7) Максимальное напряжение (у ТРП-9 60 В).

8) Остаточный ток $I_{ост}$ при максимальном напряжении (30 мА у ТРП-9).

9) Кратность изменения сопротивления ($\geq 10^3$).

10) Предельное значение номинального тока /ном, при котором гарантируется устойчивая работа (без переключения) во всем диапазоне температур окружающей среды (150–200 мА у ТРП-9).

11) Температурный коэффициент сопротивления (14–17%/°С).

12) Максимальная мощность (1,5 Вт у ТРП-9).

13) Постоянная времени (20 с у ТРП-9).

14) Коэффициент рассеивания (12 мВт/°С у ТРП-9).

15) Теплоемкость (0,24 Дж/°С у ТРП-9).

16) Нарботка на отказ (20000 ч у ТРП-9).

2.2 Конденсаторы

Конденсаторы, как и резисторы, являются одним из наиболее массовых элементов электронных цепей. Электрические характеристики, конструкция и область их применения зависят от типа диэлектрика между его обкладками [3].

По виду диэлектрика конденсаторы постоянной емкости можно подразделить на пять групп:

- 1) с газообразным диэлектриком (воздушные, газонаполненные, вакуумные);
- 2) с жидким диэлектриком;
- 3) с твердым неорганическим диэлектриком (керамические, стекло-керамические, стеклоэмалевые, стеклопленочные, тонкослойные из неорганических пленок, слюдяные);
- 4) с твердым органическим диэлектриком (бумажные, металлобумажные, фторопластовые, полиэтиленфталатные);
- 5) с оксидным диэлектриком (электролитические, оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические), выполняемые с использованием алюминия, титана, ниобия, сплавов тантала и ниобия.

У конденсаторов различают номинальное $C_{ном}$ и фактическое $C_{ф}$ значения емкости. Номинальная емкость указывается на его маркировке в сопроводительной документации; фактическая — это значение емкости, измеренное при данной температуре и определенной частоте.

Допускаемое отклонение емкости обычно задается в процентах [3]:

$$\Delta C_{ном} = \frac{C_{ф} - C_{ном}}{C_{ном}} \cdot 100\%.$$

Изменения значения емкости в зависимости от температуры характеризуются температурным коэффициентом емкости (ТКЕ), который иногда обозначают α_c :

$$\alpha_c = \text{ТКЕ} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dT}.$$

Этот коэффициент показывает изменение емкости при изменении температуры окружающей среды на 1 К.

В зависимости от материала диэлектрика ТКЕ может быть положительным, нулевым или отрицательным. Его значение, определенное на конкретной частоте, указывается в маркировке конденсатора с помощью букв и цифр или цветного кода. По допускаемому отклонению ТКЕ от нормированного значения конденсаторы подразделяются на два класса: А и Б [3].

У класса А отклонение в 2,0–2,5 раза меньше, чем у класса Б. При необходимости получить определенное значение ТКЕ применяют последовательное, параллельное и смешанное соединения конденсаторов с разными номиналами и разными ТКЕ.

При параллельном соединении m конденсаторов ТКЕ полученной результирующей емкости C находят из уравнения [3]:

$$\alpha_C = \frac{C_1}{C} \cdot \alpha_{C1} + \frac{C_2}{C} \cdot \alpha_{C2} + \dots + \frac{C_m}{C} \cdot \alpha_{Cm}.$$

При последовательном соединении — из уравнения:

$$\alpha_C = \frac{C}{C_1} \cdot \alpha_{C1} + \frac{C}{C_2} \cdot \alpha_{C2} + \dots + \frac{C}{C_m} \cdot \alpha_{Cm}.$$

Подбирая номиналы и ТКЕ, а также комбинируя последовательное и параллельное соединения, можно обеспечить нулевой ТКЕ, что применяется при создании измерительных конденсаторов.

Упрощенные эквивалентные схемы конденсаторов содержат емкость $C(\omega)$, сопротивление $R(\omega)$ и индуктивность $L_{\text{эк}}$. Используются последовательное и последовательно-параллельное включение этих элементов (рисунки 2.8, а, б).

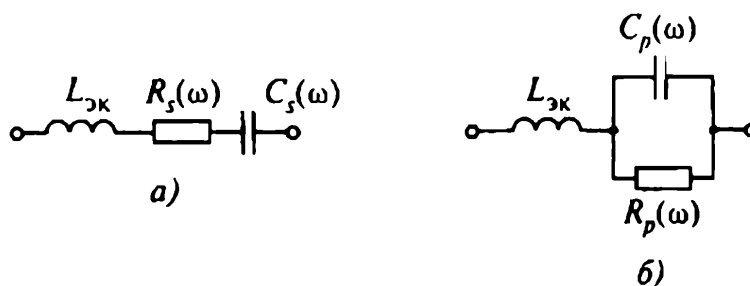


Рисунок 2.8 — Эквивалентные схемы конденсатора с последовательным (а) и последовательно-параллельным (б) включением элементов

Индуктивность $L_{\text{эк}}$ образована элементами конструкции конденсатора. Сопротивление $R(\omega)$ характеризует потери энергии и отражает тот факт, что напряжение и ток реального конденсатора сдвинуты по фазе на угол $\varphi < 90^\circ$ в диапазоне частот, где индуктивностью $L_{\text{эк}}$ можно пренебречь.

На частотах, больших f_0 , где $f_0 = \omega_0/(2\pi)$ (ω_0 — резонансная частота), конденсатор становится индуктивностью. Поэтому в электронных цепях конденсаторы стремятся использовать в той полосе частот, в которой индуктивность $L_{\text{эк}}$ не оказывает существенного влияния.

Так, у воздушных конденсаторов максимальная частота порядка 2,5–3,6 МГц, слюдяных — 150–200; бумажных — 50–80; керамических дисковых — 200–2000; керамических трубчатых — 5–200 МГц.

Следует обратить внимание на то, что значения конденсатора и сопротивления потерь, измеренные по последовательной и параллельной схемам включения этих элементов, различаются между собой. Это вытекает из правила эквивалентного преобразования последовательного соединения сопротивлений в параллельное. Отличия между значениями тем больше, чем больше тангенс угла потерь $tg\delta$.

Тангенс угла потерь характеризует электромагнитные потери в конденсаторе и определяется как отношение его активной P к реактивной Q мощности: $tg\delta = P/Q$.

В отличие от емкости тангенс угла потерь не зависит от схемы, по которой проводились измерения.

Значения $tg\delta$ зависят от вида диэлектрика и могут меняться с частотой и с течением времени, а также зависеть от температуры и напряженности электрического поля.

При воздействии на конденсатор напряжения в нем возникают электрические и акустические шумы. Электрические шумы вызваны частичными разрядами, мерцаниями емкости и пьезоэлектрическими эффектами (в керамических конденсаторах). Акустические шумы конденсатора обусловлены вибрацией обкладок под действием кулоновских и электродинамических сил [3].

Частичные разряды — местные разряды внутри изоляции и на поверхности, не вызывающие полного пробоя межэлектродного промежутка. Они имеют вид или коронных разрядов, или частичных пробоев отдельных элементов изоляции, которые могут самовосстанавливаться.

Мерцание емкости — скачкообразное изменение емкости, имеющее случайный характер. Оно обусловлено тем, что у ряда конденсаторов края обкладок состоят из отдельных островков. При приложении внешнего напряжения между ними и сплошной частью обкладки возникают микродуги, соединяющие их вместе и меняющие емкость. Спектр этих шумов широкий. Изменения емкости могут достигать 10^{-4} номинального значения. Этот вид шумов характерен для стеклянных, стеклокерамических и слюдяных конденсаторов.

Пьезоэлектрические шумы возникают, как правило, в результате механических воздействий и имеют характер импульсов.

При создании точных устройств с заряжаемыми и разряжаемыми конденсаторами необходимо учитывать явление адсорбции, приводящее к замедленной поляризации и деполяризации. Сущность его влияния заключается в том, что конденсатор не удается полностью зарядить или разрядить за малый промежуток времени из-за медленных перемещений зарядов в толще диэлектрика. Так, если обкладки заряженного конденсатора за-

мкнуть накоротко на небольшой промежуток времени, а потом разомкнуть, то через некоторый промежуток времени на обкладках появится остаточное напряжение и соответственно остаточный заряд. Отношение напряжения $U_{ост}$ появившегося через промежуток времени t_3 после размыкания, к напряжению $U_{зар}$, до которого заряжен конденсатор в течение времени t_1 после замыкания накоротко в течение времени t_2 , называется коэффициентом адсорбции, который выражают в процентах [3]:

$$K_a = \frac{U_{ост}}{U_{зар}} \cdot 100\%.$$

Коэффициент K_a зависит от интервалов времени t_1 , t_2 , t_3 (рисунок 2.9, а) и обычно уменьшается при увеличении емкости C [3].

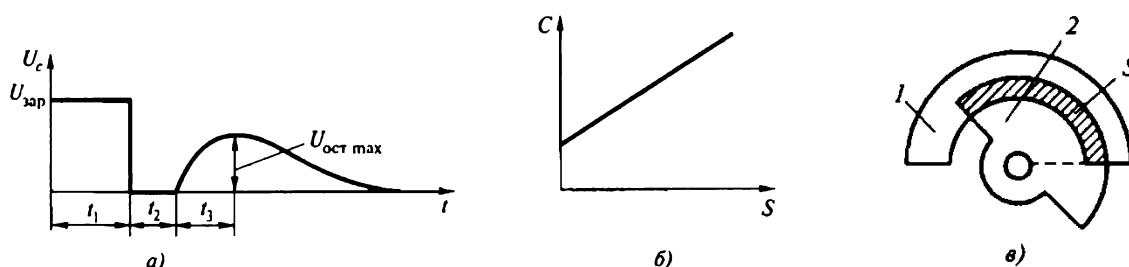


Рисунок 2.9 — Напряжение на конденсаторе при определении коэффициента K_a (а); изменение емкости C в зависимости от площади перекрытия пластин S (б); переменный конденсатор (в): 1 — статор; 2 — ротор

Его значение при $t_1 = 15$ мин, $t_2 = 5$ с, $t_3 = 3$ мин у фторопластовых конденсаторов равно 0,01–0,05, у слюдяных — 2–5; у электролитических — 0,5–6; у керамических — 5–15. Для большинства конденсаторов, кроме электролитических, полярность напряжения не играет роли. Электролитические конденсаторы бывают как неполярными (К50-6), так и полярными. Это особый тип конденсаторов, в котором в качестве диэлектрика используется тонкий слой оксида металла. Он образуется на поверхности этого металла электролитическим путем за счет выделения кислорода у металлической поверхности, к которой при изготовлении приложен положительный потенциал. Толщина этого оксидного слоя зависит от напряжения, прикладываемого к металлу в процессе создания оксидного слоя (процессе формовки).

В связи с тем, что слой оксида обладает вентильными свойствами, электролитические конденсаторы полярны. Подключение напряжения к ним должно вестись с учетом указанной на электродах полярности. В противном случае конденсатор выйдет из строя. Малая толщина диэлектрика, большая диэлектрическая проницаемость и возможность создания надеж-

ных оксидных слоев на большой площади позволяют изготавливать электролитические конденсаторы большой емкости [3].

Для электролитических конденсаторов важным параметром является ток утечки I_y , (это электрический ток при постоянном напряжении, приложенном к нему). Ток определяется через минуту после подачи на конденсатор постоянного напряжения [3].

Различают полные и сокращенные условные обозначения конденсатора.

Полное обозначение состоит из четырех элементов, например, K10-25-100 пФ $\pm$ 10% M47-НМ-В ТУ.

Первый элемент — сокращенное обозначение (K10-25); второй — значения основных параметров и характеристик (100 пФ $\pm$ 10% M47-НМ: 100 пФ — номинальная емкость; $\pm$ 10% — допустимое отклонение номинальной емкости, M47 — группа по температурной стабильности (условное обозначение ТКЕ), НМ — с отсутствием мерцания емкости); третий — обозначение климатического исполнения (В — всеклиматическое, Т — тропическое); четвертый — обозначение документа на поставку (ТУ).

Сокращенное обозначение состоит из трех элементов. Первый — буквы, характеризующие подкласс конденсаторов (К — постоянной емкости; КТ — подстроечные; КП — переменной емкости; КС — конденсаторные сборки); второй — цифры, характеризующие тип диэлектрика и назначение конденсатора, т. е. его группу; третий — порядковый номер разработки, например, K10-25.

Для обозначения номинальной емкости, допустимого отклонения, группы по температурной стабильности применяют кодированное обозначение. Номинальная емкость характеризуется цифрой и буквой, указывающей на единицу измерений и представляющей собой множитель.

Так, буквы p , n , μ , m , F обозначают множители 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} , 1 соответственно для значений емкости, выраженной в фарадах (старое обозначение p , n , μ — p , n , m). За обозначением емкости следует буква, характеризующая допустимое отклонение, например 100 nI (емкость 100 нФ с допускаемым отклонением $\pm$ 5%). Соответствующие обозначения номиналов имеют такой вид: 0,1 пФ — $p10$; 10 пФ — $10p$; 100 пФ — $100p$ ($n10$); 590 пФ — $590p$ ($n59$); 1 нФ — $1n0$; 100 нФ — $100n$ ($\mu10$); 1 мкФ — $1\mu0$; 100 мкФ — 100μ ($F10$); 1 мФ — $1m0$; 100 мФ — $100m$ ($F10$); 1 Ф — $1F0$; 10 Ф — $10F$ [3].

В обозначении ТКЕ буквы означают его знак (М — минус, П — плюс, МП — близкое к нулю), а цифры указывают значение ТКЕ, например, П100 (ТКЕ = $+100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), М750 (ТКЕ = $-750 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Буква Н указывает на то, что ТКЕ не нормируется, а цифры после нее — на возможное изменение емкости в диапазоне допустимых температур, например, Н20 (изменение емкости относительно измеренной при 20 °С не более $\pm$ 20%).

Для обозначения ТКЕ часто используют цветной код. Цвет покрытия корпуса указывает на знак ТКЕ, а цвет кодировочного знака — на его значение, например, синий и серый цвета корпуса — положительный ТКЕ; голубой — близкий к нулю; красный и зеленый — отрицательный ТКЕ; серый корпус с красным знаком — П60; красный с зеленым знаком — М330; зеленый без знака — М1500 и т. д.

Предусмотрены кодированные обозначения ТКЕ латинскими буквами, например: П100-А; П60-Г; П33-Н; МПО-С; М33-Н; М47-М; М75-Л; М150-Р; М220-Р; М330-С; М470-Т; М750-У; М1500-В; М2200-К; Н10-В; Н20-З; Н30-Д; Н50-Х; Н70-Е; Н90-Ф [3].

Аналогично резисторам номинальные емкости конденсаторов соответствуют рядам предпочтительных значений, на которые имеются ГОСТ-ы.

Основные параметры постоянных конденсаторов [3]

- 1) Номинальное значение емкости конденсатора.
- 2) Допускаемое отклонение действительной емкости от номинального значения (в %).
- 3) Тангенс угла потерь или добротность Q ($Q = 1/\operatorname{tg}\delta$).
- 4) Ток утечки (в основном для электролитических конденсаторов).
- 5) Сопротивление изоляции или постоянная времени саморазряда. Сопротивление изоляции определяют из формулы $R_{из} = U_0/I_{yn}$, где U_0 — постоянное напряжение, приложенное к конденсатору, вызвавшее ток I_{yn} .
- 6) Температурный коэффициент емкости.
- 7) Номинальное напряжение.

Переменные и подстроенные конденсаторы выполняются с механически или электрически изменяемой емкостью.

В конденсаторах с механически изменяемой емкостью одна группа пластин или пластина перемещается относительно других пластин или пластины, составляющих обкладки конденсатора. При этом может меняться или взаимное перекрытие пластин, или расстояние между ними. На практике в основном используют изменение взаимного перекрытия пластин. При этом легко получить линейное (см. рисунок 2.9, б) или функциональное изменение емкости — в зависимости от перемещения подвижной части. Чаще всего применяют вращательное движение и одну обкладку конденсатора выполняют в виде ротора, а другую — статора (см. рисунок 2.9, в). Известны также конструкции с линейно перемещающимися пластинами обкладок.

Промышленность выпускает переменные и подстроенные конденсаторы с воздушным, твердыми неорганическими (керамическими, слюдяными) и органическими (полистироловыми, полиэтиленовыми и т. д.) диэлектриками. При введении диэлектриков в зазор между подвижными и неподвижными обкладками конденсатора существенно увеличивается емкость и снижаются габаритные размеры. Однако при этом не удается из-

бежать воздушных зазоров, значения которых не остаются стабильными. Поэтому при каждой новой установке ротора в одно и то же положение значения емкости несколько отличаются от предыдущих. Конденсаторы с твердым диэлектриком чаще всего используют в качестве подстроечных. Воздушные конденсаторы обычно применяют в тех цепях, в которых требуется хорошая повторяемость значений емкости.

Переменные и подстроечные конденсаторы различаются в основном конструктивным выполнением. Переменные конденсаторы имеют ручку, с помощью которой вращается подвижная часть. Их конструкция рассчитана на долговременную работу в режиме вращения ротора. У подстроечных конденсаторов подвижная часть, как правило, имеет шлиц для ее вращения отверткой и конструкция подвижной части упрощена. Она не рассчитана на долговременную работу в режиме вращения.

Максимальные значения емкости, которые можно получить у переменных конденсаторов, как правило, не превышают значений 600–5000 пФ, при этом воздушные зазоры между подвижными и неподвижными пластинами порядка 0,1–0,25 мм. Закон изменения емкости зависит от геометрической формы пластин.

Для переменных и подстроенных конденсаторов важны максимальная C_{max} и минимальная C_{min} емкости, коэффициент перекрытия по емкости $K_c = C_{max} / C_{min}$, $tg\delta$ и закон изменения емкости.

Кроме линейных конденсаторов распространение в электронике получили нелинейные конденсаторы, у которых емкость зависит от напряженности электрического поля и соответственно статические значения емкости $C = q / U$ (q — заряд емкости, U — напряжение на ней) и дифференциальные значения $C_{diff} = dq/dU$ не равны. Нелинейные конденсаторы, выполненные на основе сегнетоэлектриков (керамических диэлектриков со спонтанной поляризацией), получили название варикондов. Нелинейные конденсаторы на основе использования свойств р-п-перехода называют варикапами [3].

Для керамических материалов, называемых сегнетоэлектриками (титанат бария, стронция, кальция и т. д.), характерны высокие значения относительной диэлектрической проницаемости и ее сильная зависимость от напряженности электрического поля и температуры. Емкость конденсаторов с такими диэлектриками зависит от напряжения, приложенного к ним.

При практическом применении в основном используется зависимость дифференциальной емкости $C_{diff} = dQ/dU$ от значения приложенного напряжения

Для нелинейных конденсаторов вводят понятие эффективной емкости:

$$C_e = Q/U.$$

Эффективная емкость — это емкость такого линейного конденсатора, заряд которого Q при максимальном напряжении U равен заряду нелинейного конденсатора при том же напряжении [3].

Кроме того, иногда используют реверсивную емкость C . Реверсивная емкость — это усредненное в пределах амплитуды переменного напряжения, воздействующего на вариконд. Значение дифференциальной емкости

$$C_p = \left. \frac{\Delta Q}{\Delta U} \right|_{U=const}$$

где U — постоянное напряжение, приложенное к вариконду;

$\Delta Q, \Delta U$ — изменения заряда и напряжения на вариконде под влиянием переменного сигнала.

Характеристики вариконда оценивают с помощью коэффициента нелинейности K :

$$K_1 = C_{max}/C_u \text{ или } K_2 = C_{30}/C_5,$$

где C_{max} — максимальное значение емкости;

C_u — значение емкости при напряжении U (обычно $U = 5$ В);

C_{30} и C_5 — емкости вариконда при напряжениях 30 и 5 В.

Вариконды имеют значения емкостей от 100 пФ до 0,2 мкФ, при этом $K_1 \approx 2-6$; $K_2 \approx 2-2,5$ (на частоте 50 Гц).

Номинальные напряжения варикондов достигают 250–300 В. В их обозначение входят буквы КН, цифры, соответствующие точке Кюри, и порядковый номер изделия, например, КН75-5 — вариконд из материала с температурой точки Кюри 75 °С и порядковым номером 5. Условные обозначения конденсаторов показаны на рисунке 2.10, а—ж [3].

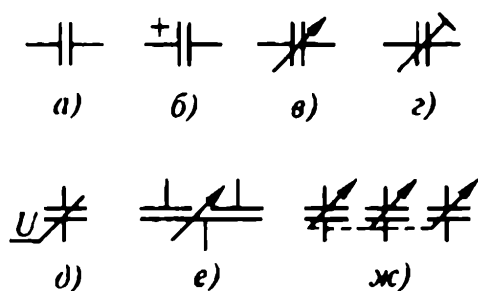


Рисунок 2.10 — Условные обозначения конденсаторов:

а — постоянной емкости; б — электролитический полярный; в — переменной емкости; г — подстроенный; д — вариконд; е — дифференциальный; ж — многосекционный

2.3 Катушки индуктивности

Катушки индуктивности, за исключением дросселей, предназначенных для использования в цепях питания, не являются комплектующими изделиями, как резисторы и конденсаторы. Они изготавливаются на сборочных заводах и имеют те параметры, которые необходимы для конкретных изделий.

Из-за трудностей микроминиатюризации, значительных массогабаритных показателей, плохой повторяемости характеристик и параметров, повышенной трудоемкости изготовления область их применения ограничена. Однако при создании ряда устройств электроники обойтись без них пока нельзя. При этом важным является то, что индуктивные компоненты с использованием существующей изоляции могут успешно работать при температуре до 200–500 °С [3].

Катушки индуктивности, как правило, имеют цилиндрическую или спиральную форму витков и выполняются как однослойными, так и многослойными. Характер намотки зависит от назначения катушки индуктивности. Так, для уменьшения межвитковых емкостей витки укладывают на каркас с определенным шагом или применяют специальные способы намотки, когда витки укладываются не параллельно, а под некоторым углом друг к другу (универсальная намотка).

Для увеличения значений индуктивности и повышения их добротности широко применяют магнитопроводы с постоянными или регулируемыми параметрами. Наиболее распространенные формы магнитопроводов — броневая и тороидальная (рисунок 2.11, а, б). Регулирование параметров магнитопровода осуществляют с помощью подвижного сердечника 3 (рисунок 2.11, а), который выполняют из ферромагнитного материала. При его перемещении меняются параметры магнитопровода и индуктивность катушки. В ряде случаев для подстройки катушек индуктивности внутрь их вводят только один подстроечный сердечник из ферромагнетика или диамагнетика. Диамагнетики (латунь, медь) используют только на высоких частотах (десятки — сотни мегагерц). В отличие от ферромагнетика при их введении индуктивность катушки уменьшается [3].

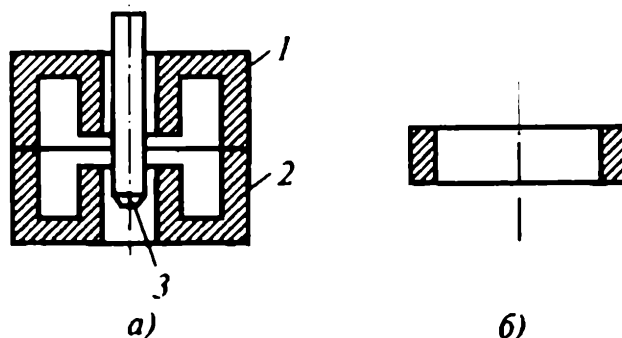


Рисунок 2.11 — Магнитопроводы катушек индуктивности:

а — броневой; б — тороидальный;

1, 2 — чашки броневого магнитопровода; 3 — подстроенный сердечник

В катушках индуктивности, работающих на низких частотах (до 1 кГц), в качестве магнитопроводов обычно используют пермаллой. При этом магнитопровод, как правило, тороидальный, собранный из тонких колец ($h = 0,002\text{--}0,1$ мм) или навитый из ленты тех же толщин. На более высоких частотах (до нескольких мегагерц) широко применяют ферриты, причем их марка зависит от диапазона рабочих частот. На частотах свыше нескольких мегагерц используют катушки индуктивности, имеющие только подстроенные сердечники или вообще не имеющие их.

Точный расчет значений индуктивности представляет собой сложную задачу.

При ориентировочных расчетах можно использовать приближенные формулы.

Для однослойной цилиндрической катушки, намотанной виток к витку или с шагом, индуктивность (микрогенри):

$$L \approx \frac{0.001dW^2}{l/d + 0.44},$$

где d, l — диаметр и длина катушки, мм;

W — число витков.

Для многослойной катушки (микрогенри):

$$L \approx \frac{0.008d_{\text{cp}}^2 \cdot W^2}{3d_{\text{cp}} + 9l + 10h},$$

где $d_{cp} = \frac{d_{нар} + d_{вн}}{2}$ ($d_{нар}$, $d_{вн}$ — наружный и внутренний диаметры катушки, мм);

l , h — длина и высота катушки;

W — число витков.

При наличии магнитопровода сначала находят его магнитное сопротивление [3].

В броневом магнитопроводе магнитные силовые линии замыкаются так, как показано на рисунке 2.12, а (поток Φ).

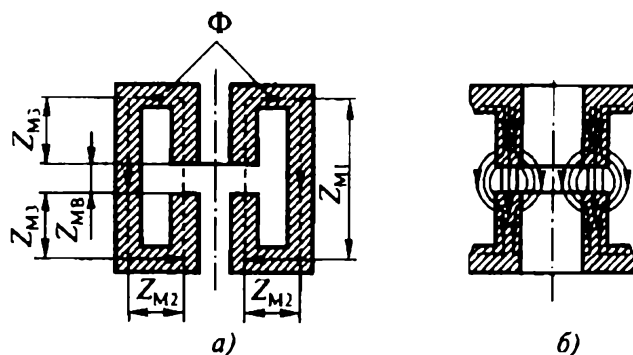


Рисунок 2.12 — Пример разбивки магнитопровода на участки (а);
выпучивание магнитного потока около воздушного зазора (б)

Магнитопровод условно разделен на участки, магнитные сопротивления которых Z_{M1} , Z_{M2} , Z_{M3} , $Z_{Mв}$,

Использованы следующие обозначения:

- Z_{M1} , — магнитное сопротивление внешней стенки;
- Z_{M2} , — магнитное сопротивление оснований;
- Z_{M3} , — магнитные сопротивления участка внутренней стенки;
- $Z_{Mв}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора.

Для их нахождения используют формулу

$$Z_{Mn} = \frac{l_{cpn}}{\mu_r \mu_0 S'}$$

где l_{cpn} — средняя длина магнитной силовой линии на n -м участке;

S — площадь поперечного сечения;

μ_r — относительная магнитная проницаемость материала магнитпровода на n -м участке;

μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Среднюю длину магнитной силовой линии обычно находят приближенно для конкретного участка. В ряде случаев и площадь S вычисляется

приблизенно, заменяя изменяющуюся по длине площадь на ее эквивалентное значение.

Для проведения электрических расчетов используют одну из эквивалентных схем, приведенных на рисунке 2.13, а, б [3].

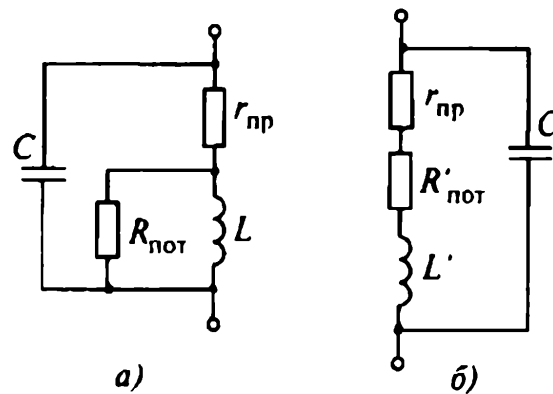


Рисунок 2.13 — Упрощенные эквивалентные схемы катушек индуктивности:

- а — сопротивление потерь включено параллельно с индуктивностью;
- б — сопротивление потерь включено последовательно с индуктивностью

В этих схемах учтены:

- активное сопротивление провода $r_{пр}$;
- индуктивность L ;
- потери в магнитопроводе $R_{пот}$;
- емкость C .

С помощью эквивалентной емкости C учитывают наличие межвитковых емкостей, емкости выводов катушки, емкости отдельных витков относительно окружающей его арматуры.

Следует отметить, что L и L' , $R_{пот}$ и $R'_{пот}$ не равны друг другу. Поэтому эти параметры должны быть привязаны к определенной эквивалентной схеме.

Важнейшим параметром катушки индуктивности является добротность, которая равна отношению мнимой части X ее полного сопротивления к действительной части R :

$$Q = X/R.$$

Значение добротности зависит от частоты. Если ферромагнитный магнитопровод отсутствует ($R_{пот} \rightarrow \infty$; $R'_{пот} \rightarrow 0$), а емкость C достаточно мала, то добротность зависит от соотношения между индуктивностью L и активным сопротивлением провода $r_{пр}$ и увеличивается при повышении частоты. Однако на частотах порядка нескольких мегагерц из-за проявлений поверхностного эффекта активное сопротивление провода увеличивается и добротность снижается.

Для снижения r_{np} обмотки катушек стремятся наматывать достаточно толстым проводом (излишне большой диаметр может привести даже к увеличению r_{np} на высоких частотах из-за проявления эффекта близости), применять специальный многожильный провод (литцендрат). Магнитопроводы и сердечники выбирают с малыми потерями на вихревые токи и гистерезис.

Для уменьшения емкости катушки изготавливают секционированными, по возможности разносят витки с максимальной разностью потенциалов, уменьшают объем диэлектрика в электрическом поле катушки (например, используют каркасы со специальными проточками), экраны располагают дальше от обмотки.

Температурные изменения индуктивности катушек без ферромагнитных сердечников сравнительно невелики и зависят от стабильности геометрических размеров. При наличии ферромагнитных сердечников необходимо учитывать температурный коэффициент магнитной проницаемости, который у разных материалов лежит в пределах 0,005–1%/°C [3].

Одна из разновидностей катушек индуктивности носит название дросселей. Их основное назначение — обеспечить большое сопротивление для переменных токов и малое для постоянных или низкочастотных токов.

Различают дроссели низкой и высокой частот.

Дроссели низкой частоты используются в выпрямительных устройствах для создания фильтров, сглаживающих пульсации. Их применяют тогда, когда источник питания должен отдавать большой ток (амперы — сотни ампер) и требуется получить малые пульсации постоянного напряжения. Дроссель низкой частоты наматывается аналогично силовым трансформаторам с использованием тех же магнитопроводов. Его основное отличие от трансформаторов заключается в том, что в магнитной цепи магнитопровода делается воздушный зазор $h = 0,05–0,1$ мм. Наличие его предохраняет магнитную цепь от насыщения постоянным током, значения которого достаточно велики, так как дроссель включают в цепь последовательно с сопротивлением нагрузки. Индуктивность и активное сопротивление дросселей низкой частоты рассчитывают исходя из параметров, которые необходимо получить у источника питания. При этом всегда необходимо знать значение постоянного тока нагрузки [3].

Дроссели низкой частоты выпускаются серийно. Их обозначения:

- Д1–Д274 — дроссели унифицированные, низкочастотные;
- Д, Др — дроссели фильтров для бытовой радиоаппаратуры.

В ряде случаев они имеют две обмотки: основную и компенсационную. Компенсационная обмотка при необходимости может соединяться последовательно с основной согласно или встречно. При согласном соединении (начало компенсационной с концом основной) индуктивность дросселя увеличивается, при встречном (концы или начала соединены вместе) — уменьшается.

Дроссели высокой частоты используют в высокочастотных электронных цепях, где пропускают токи только относительно низких частот. Они представляют собой катушки индуктивности, намотанные внавал или с определенным шагом на диэлектрический каркас. При этом стремятся, чтобы их емкость была минимально возможной, а индуктивность — не менее требуемой [3].

Основные параметры катушек индуктивности [3]

1) Номинальная индуктивность катушки (значение индуктивности, являющееся исходным для отсчета отклонений).

2) Допускаемое отклонение индуктивности катушки (разность между предельным и номинальным значениями индуктивности).

3) Номинальная добротность катушки индуктивности (значение добротности при номинальном значении индуктивности).

4) Эффективная индуктивность (значение индуктивности, определенное с учетом влияния собственной емкости, собственной индуктивности и изменения начальной проницаемости сердечника).

5) Начальная индуктивность (значение индуктивности, определенное на низкой частоте, где отсутствует влияние собственной емкости).

6) Температурный коэффициент индуктивности катушки (TKL) — отношение относительного изменения индуктивности $\Delta L/L$ к интервалу температур ΔT , вызвавшему это изменение:

$$TKL = \frac{\Delta L}{L \Delta T}.$$

7) Температурная нестабильность индуктивности катушки (относительное изменение индуктивности, вызванное изменением температуры).

8) Температурный коэффициент добротности (ТКД) — отношение относительного изменения добротности $\Delta Q/Q$ к интервалу температур ΔT .

9) Собственная емкость катушки индуктивности (электрическая емкость), составляющая с ее индуктивностью резонансный контур, измеренная на частоте собственного резонанса.

10) Рабочий диапазон температур (максимальная и минимальная температуры).

Для дросселей, используемых в цепях питания, важны ток подмагничивания I_0 , индуктивность L , сопротивление обмотки дросселя постоянно-му току.

2.4 Трансформаторы электронной аппаратуры

Трансформаторами называются статические устройства, обеспечивающие преобразования параметров переменных напряжений и токов.

Трансформаторы позволяют: изменять уровни и фазу напряжений (токов); согласовывать сопротивления источника сигнала и нагрузки; разделять цепи по постоянному току; изменять форму переменного напряжения (тока).

В настоящее время преимущественно применяются электромагнитные трансформаторы, принцип работы которых основан на преобразовании энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратном преобразовании последней. Тем самым осуществляется передача электрической энергии из одной цепи в другую. Такой трансформатор состоит из ферромагнитного магнитопровода и расположенных на нем обмоток. Обмотка, подключаемая к первичной питающей сети (источнику сигнала), называется первичной, а обмотки, к которым подключаются цепи нагрузки, — вторичными [3].

Различают трансформаторы:

- питания электронной аппаратуры;
- сигнальные.

Трансформаторы питания электронной аппаратуры — это трансформаторы малой мощности, предназначенные для преобразования напряжения электрической сети в напряжения, необходимые для питания электронных устройств.

Сигнальные трансформаторы — это трансформаторы малой мощности, предназначенные для точной передачи, преобразования, а иногда и запоминания электрических сигналов. Их подразделяют на входные (обеспечивающие согласование входных сопротивлений электронных узлов и источников сигнала), выходные (обеспечивающие согласование выходных сопротивлений электронных устройств с сопротивлениями нагрузок) и импульсные (обеспечивающие преобразование и формирование импульсных сигналов).

Магнитопроводы трансформаторов электронной аппаратуры имеют различные конфигурации. Широко используются стержневые, броневого и тороидальные конструкции (рисунок 2.14) [3].

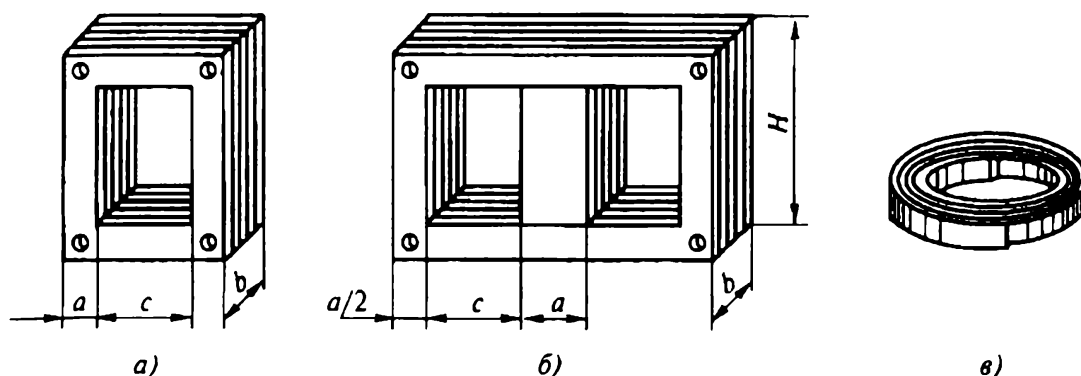


Рисунок 2.14 — Магнитопроводы трансформаторов:
а — стержневой; б — броневого; в — тороидальный (кольцевой)

Трансформаторы со стержневыми магнитопроводами (рисунок 2.14, а) имеют неразветвленную магнитную цепь, обладают относительно большим значением потока рассеивания и лучшими условиями охлаждения обмоток, так как они располагаются на разных стержнях. Такие конструкции менее чувствительны к внешним магнитным полям, в связи с тем, что ЭДС помехи, наводимые в обеих катушках, противоположны по знаку и частично или полностью уничтожаются. Указанные преимущества делают их предпочтительными при изготовлении трансформаторов большой мощности. Недостатки их — большие потоки рассеивания и большие, чем у броневых трансформаторов, массогабаритные показатели.

Броневые трансформаторы (рисунок 2.14, б) имеют разветвленную магнитную цепь. Обмотки располагаются на среднем стержне. Такие трансформаторы относятся к числу наиболее простых и дешевых в производстве. Недостатками их являются относительно высокая чувствительность к наводкам, большая величина потока рассеивания и плохое охлаждение обмоток.

Трансформаторы на тороидальных сердечниках (рисунок 2.14, в) наиболее сложные и дорогие. Основными преимуществами их являются малая чувствительность к внешним магнитным полям и малое значение потока рассеивания. Обмотки в трансформаторах тороидальной конструкции наматывают равномерно по всему тору, что позволяет еще более уменьшить магнитные потоки рассеивания.

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы изготавливают из тонких пластин трансформаторной стали (шихтованные), покрытых с одной стороны слоем изолирующего лака или оксида. Сборка сердечника из пластин, толщина которых меньше 0,1–0,2 мм, неудобна и плохо поддается автоматизации. В случаях тонкого магнитного материала удобнее и дешевле оказываются «витые сердечники», навиваемые из стальной ленты необходимой толщины. Их часто называют ленточными.

Пластинчатые магнитопроводы собирают из отдельных пластин встык или внахлест. При сборке встык все пластины составляются вместе и собираются одинаково. Магнитопровод состоит из двух частей, которые соединяются вместе. Это облегчает сборку и разборку трансформатора и позволяет получить воздушные зазоры, необходимые для нормальной работы дросселя низкой частоты. При сборке внахлест пластины чередуются так, чтобы у соседних пластин разрезы были с разных сторон. При этом уменьшается магнитное сопротивление магнитопровода, но трудоемкость сборки увеличивается.

Броневые и стержневые ленточные магнитопроводы изготавливают, как правило, из холоднокатаной стали и собирают встык из двух отдельных половин подковообразной формы.

Ленточные магнитопроводы по сравнению с пластинчатыми допускают применение на 20–30% большей магнитной индукции, имеют лучшее

заполнение объема магнитопровода обмотками, меньшие электромагнитные потери и повышенный КПД.

Магнитопроводы для трансформаторов изготавливают нескольких типов [3]:

а) броневого ленточного:

- ШЛ — с наименьшей массой;
- ШЛМ — со сниженным расходом меди;
- ШЛО — с увеличенной шириной окна;
- ШЛП — с наименьшим объемом;
- ШЛР — наименьшей стоимости;

б) стержневые ленточные:

- ПЛВ — с наименьшей массой;
- ПЛМ — с уменьшенным расходом меди;
- ПЛР — наименьшей стоимости;
- ОЛ — тороидальные ленточные с наименьшей массой.

Известны также трансформаторы, в которых магнитопроводы выполнены в виде полого кольца, внутри которого располагаются обмотки — обращенный тор (рисунок 2.15, а), в форме трубки — кабельные (рисунок 2.15, б), в форме шпули (рисунок 2.15, в). Конструкции трансформаторов с магнитопроводами кабельного типа и типа «шпуля» показаны на рисунке 2.16, а, б [3].

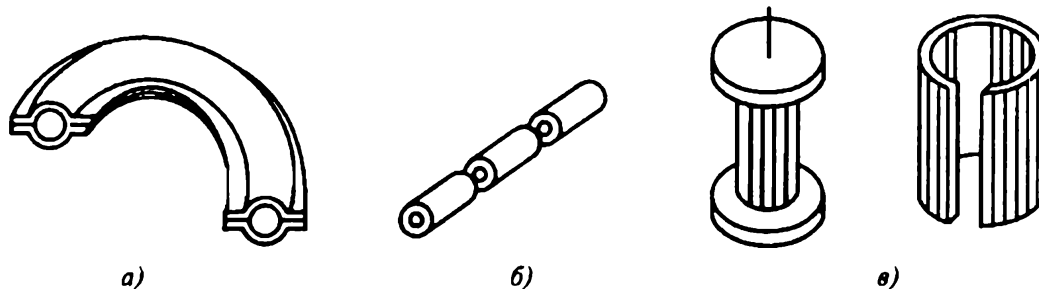


Рисунок 2.15 — Магнитопроводы типов:
а — обращенный тор; б — кабельные; в — шпули

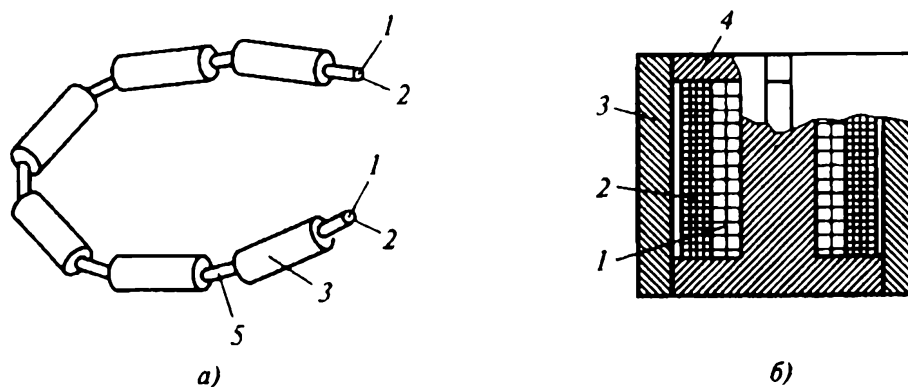


Рисунок 2.16 — Конструкция трансформаторов:

а — с кабельным магнитопроводом;

б — типа шпули (1, 2 — обмотки; 3, 4 — магнитопровод, 5 — труба из диэлектрика)

Свойства трансформатора определяются магнитными свойствами материала магнитопровода, который должен иметь минимальное магнитное сопротивление для основного потока. На рисунках 2.17, а, б изображена типичная зависимость магнитной индукции B от напряженности H магнитного поля, соответствующая изменению H от $-H_m$ до $+H_m$. Изображенная гистерезисная петля называется предельной. Она получается, если амплитуда H_m достаточно велика.

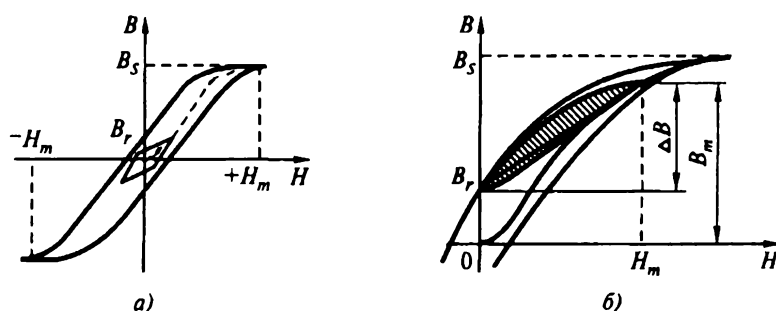


Рисунок 2.17 — Кривые перемagnetизации магнитопровода ИТ

Основная кривая намагничения, показанная на рисунке пунктирной линией, является важной характеристикой магнитного материала и представляет собой геометрическое место вершин частных симметричных петель гистерезиса, соответствующих различным величинам H_m . При наличии в функциях $H(t)$ или $B(t)$ постоянной составляющей соответствующая петля гистерезиса несимметрична. Материал магнитопроводов характеризуется следующими основными параметрами: индукцией насыщения B_s , остаточной индукцией B_r , магнитной проницаемостью $\mu = B/H$ и площадью петли гистерезиса. Применяются материалы, имеющие большие значения магнитной проницаемости μ и индукции насыщения B_s , а также

малую площадь петли гистерезиса, определяющей величину тепловых потерь в магнитопроводе [3].

Выбор материала (электротехнические стали, пермаллои, ферриты) зависит от назначения и свойств трансформатора.

Для низкочастотных силовых трансформаторов используют холоднокатанные текстурированные ленточные стали, например 3411, 3421 и др. Они имеют пониженные удельные потери, высокую индукцию насыщения, высокую магнитную проницаемость в средних и сильных полях.

Для сигнальных трансформаторов широко применяются пермаллой 50НП, 79НМ, 80НХС и т. д., причем сплавы 79НМ и 80НХС ввиду малой индукции насыщения ($B_s \approx 0,7$ Тл) не рекомендуют использовать в цепях, где имеет место подмагничивание постоянным током. Ферриты используются обычно в трансформаторах, работающих на повышенных частотах (выше нескольких десятков килогерц). Их применение ограничено из-за низкой индукции насыщения (0,4–0,5 Тл) и сильной температурой зависимости параметров. В основном используются марганец-цинковые ферриты марок 6000 НМ, 4000 НМ, 2000 НМ, 1500 НМЗ, 1000 НМЗ, 700 НМ (первые цифры указывают номинальные значения магнитной проницаемости μ магнитного материала).

Инженерный расчет трансформатора состоит из четырех этапов [3]:

- 1) выбор типа трансформатора и его принципиальной конструкции;
- 2) выбор и расчет магнитопровода с определением, его основных размеров;
- 3) электрический, конструктивный расчеты;
- 4) поверочный расчет.

В проектировании трансформатора любого назначения существенным является выбор магнитопровода, эта операция сводится к решению следующих двух задач:

- выбор типа, конструкции и материала магнитопровода;
- выбор (расчет) типоразмера магнитопровода.

Сигнальные трансформаторы, обеспечивающие точную передачу аналоговых информационных сигналов, проектируют так, чтобы вносимые ими частотные и нелинейные искажения не превышали заданных при коэффициентах трансформации, требуемых для согласования сопротивлений источников сигнала и нагрузок. Частотные искажения сигнала наблюдаются как в области низких, так и в области высоких частот. В области низких частот они обусловлены малым значением сопротивления взаимной индуктивности M (рисунок 2.18, а), в результате чего определенная часть электрического тока, созданного входным сигналом, ответвляется в нее. В области высоких частот частотные искажения обусловлены наличием у обмоток индуктивностей рассеивания L_s , электромагнитными потерями в магнитопроводе $R_{ном}$, а также наличием у обмоток и между обмотками паразитных емкостей C . Учесть емкости достаточно сложно из-за того, что

они имеют распределенный характер и существенно меняются в зависимости от технологии изготовления обмоток. Но с их наличием приходится считаться. На эквивалентной схеме приведенного трансформатора для области высоких частот (рисунок 2.18, д) часто вводят приведенную собственную емкость C (иногда емкость подключают параллельно взаимной индуктивности или подключают к входным и выходным зажимам).

Для упрощения часто используют эквивалентные схемы трансформатора для областей низких (рисунок 2.18, в), средних (рисунок 2.18, г), высоких (рисунок 2.18, д) частот и эквивалентную схему, приведенную к первичной обмотке (рисунок 2.18, б) [3].

Нелинейные искажения обусловлены тем, что взаимная индуктивность M и сопротивление потерь $R_{ном}$ зависят от значения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора: $M=f(B)$, $R_{ном}=f(B)$.

В результате этого соотношение между сопротивлениями эквивалентной схемы меняется в зависимости от уровня входного сигнала, а соответственно изменяется коэффициент трансформации трансформатора. Это приводит к искажениям формы выходного сигнала, которые называются нелинейными искажениями [3].

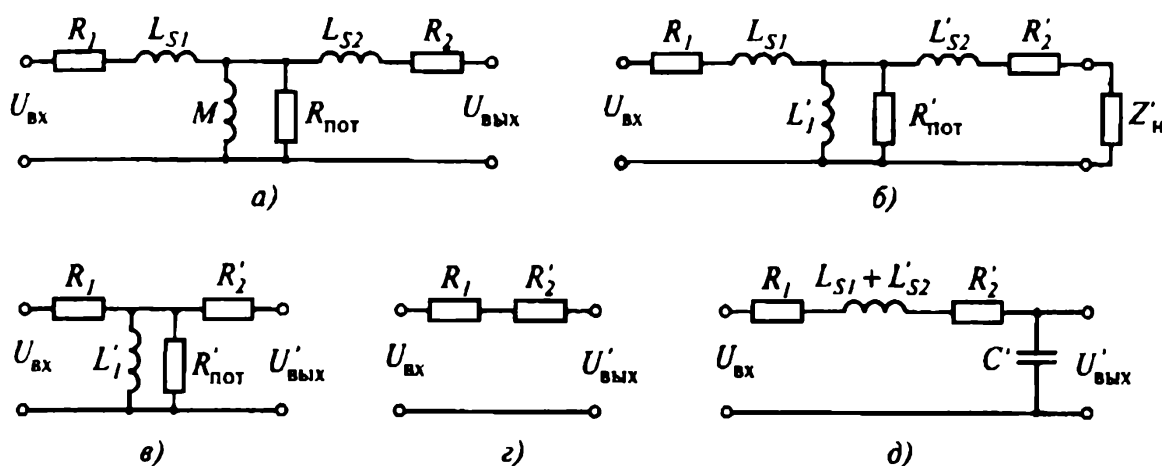


Рисунок 2.18 — Эквивалентные схемы:

а — трансформатора; б — приведенного трансформатора;
в — для областей низких частот; г — средних частот; д — высоких частот;

На рисунках использованы следующие обозначения:

- R_1, R_2 — активные сопротивления провода обмоток;
- L_{S1}, L_{S2} — индуктивности рассеяния обмоток;
- M — взаимная индуктивность;
- $R_{ном}$ — сопротивление, отражающее наличие потерь в магнитопроводе;
- C' — приведенная собственная емкость трансформатора

Импульсными трансформаторами (ИТ) называются специальные типы сигнальных трансформаторов, которые предназначены для трансфор-

мации или формирования импульсов напряжения (тока) различной формы. Основным требованием, предъявляемым к ИТ, является требование малых или определенных искажений формы трансформируемого импульса.

На рисунке 2.19 показаны типичные искажения формы прямоугольного импульса, который передан через импульсный трансформатор [3].

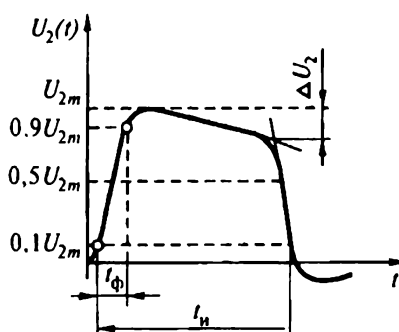


Рисунок 2.19 — Прямоугольный импульс, переданный через импульсный трансформатор

Увеличение длительности фронта импульса (быстрого нарастания сигнала) обусловлено действием индуктивности рассеяния L_{si} и собственной емкости C трансформатора.

Относительный спад $\lambda = \Delta U_2 / U_{2m}$ вершины импульса объясняется конечным значением индуктивности намагничивания L_1 .

Важной особенностью работы ИТ является то, что обычно трансформируемые импульсы являются однополярными и поэтому магнитопровод перемагничивают по частному несимметричному гистерезисному циклу, который приведен рисунке 2.20, б. В этом случае он характеризуется импульсной магнитной проницаемостью $\mu_u = B_m / H_m$. Из рисунка 2.20, б видно, что величина μ_u может быть существенно меньше величины $\mu_u = B_m / H_m$ вследствие того, что $\Delta B < B_m$. Для увеличения импульсной магнитной проницаемости μ_u , определяющей величину индуктивности импульсного намагничивания L_u , необходимо использовать в ИТ сердечники с малой величиной остаточной магнитной индукции B_r и большой величиной индукции насыщения B_s . При расчете ИТ необходимо также учитывать размагничивающее действие вихревых токов. Учет этого эффекта достигается заменой μ_u на кажущуюся магнитную проницаемость $\mu_k < \mu_u$. Меньшей величине μ_k соответствует и меньшая величина кажущейся индуктивности намагничивания L_k . Величины μ_k и L_k могут быть не только экспериментально измерены, но и вычислены с достаточной для практики точностью. Для уменьшения размагничивающих вихревых токов в магнитопроводе необходимо уменьшать толщину пластин, которую следует выбирать в соответствии с выражением [3]:

$$\delta_c \approx a \sqrt{\frac{\rho_c \cdot t_u}{\mu_n}},$$

где δ_c — толщина пластины;

ρ_c — удельное сопротивление материала магнитопровода;

t_u — длительность импульса;

a — коэффициент пропорциональности.

Из приведенной формулы видно, что при коротких импульсах необходимая толщина пластин магнитопровода может быть весьма малой (0,05 мм и меньше).

В настоящее время для трансформации импульсов длительностью $t_u < 10^{-6}$ с при высоких частотах их следования в ИТ используют сердечники из феррита — материала с весьма большим удельным сопротивлением и, следовательно, с пренебрежимо малыми потерями на вихревые токи. Необходимо отметить, что вихревые токи уменьшают величину индуктивности намагничивания и увеличивают тепловые потери в сердечнике.

Задачей проектирования ИТ является выбор и определение материала, типоразмера магнитопровода, числа витков, конструктивных габаритов обмоток, исходя из условий получения допустимых искажений импульсов и высоких значений технико-экономических показателей. Основные конструктивные особенности ИТ обусловлены стремлением максимально уменьшить искажения импульса.

Обычно в ИТ малой мощности используют тороидальные магнитопроводы с очень малым магнитным полем рассеяния. В вычислительной технике широко используются импульсные трансформаторы на магнитопроводах с прямоугольной петлей гистерезиса.

Для многих условий разработаны и спроектированы импульсные трансформаторы малой мощности, которые нормализованы и серийно выпускаются промышленностью.

Полное условное обозначение унифицированных трансформаторов состоит из букв русского алфавита, указывающих на его тип, и последующих цифр, характеризующих основные параметры. Применяют следующие буквенные обозначения [3]:

- ТА — трансформатор питания анодных цепей;
- ТН — трансформатор питания накальных цепей;
- ТАН — трансформатор питания анодно-накальных цепей;
- ТПП — трансформатор питания устройств на полупроводниковых приборах;
- ТС — трансформатор питания бытовой аппаратуры;
- ТТ — трансформатор питания тороидальный;
- ВТ — трансформатор входной для транзисторных устройств;
- ТОТ — трансформатор выходной для транзисторных устройств;

- ТМ — трансформатор согласующий маломощный;
- ТИ — трансформатор импульсный;
- ТИМ — трансформатор импульсный маломощный.

Например, маломощный трансформатор питания электронной аппаратуры, который может подключаться к напряжениям 127 и 220 В с частотой питающей сети 50 Гц, имеет обозначение ТА 15-127/220-50.

Основные параметры трансформаторов питания [3]

- 1) Номинальное напряжение первичной обмотки U_1 .
- 2) Номинальный ток первичной обмотки I_1 .
- 3) Напряжение вторичной обмотки U_2 .
- 4) Ток вторичной обмотки I_2 .
- 5) Напряжение холостого хода U_0 (напряжение на разомкнутой вторичной обмотке).
- 6) Номинальная мощность (сумма мощностей вторичных обмоток).
- 7) Коэффициент трансформации.
- 8) Частота питания.

Для низкочастотных выходных трансформаторов также важны:

- 1) полоса частот (ограничивается нижней f_n и верхней f_v частотами рабочего диапазона);
- 2) сопротивление нагрузки (обычно задается на средней частоте);
- 3) номинальная выходная мощность;
- 4) коэффициент полезного действия.

У сигнальных трансформаторов параметры задаются в зависимости от их назначения.

Условное обозначение трансформаторов приведено на рисунке 2.20 а, б [3].

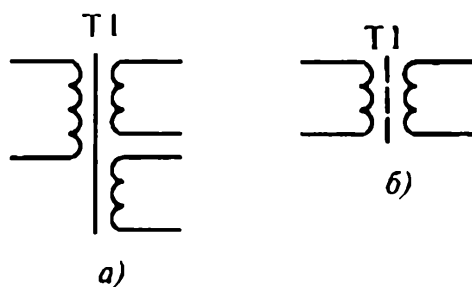


Рисунок 2.20 — Условные обозначения трансформаторов с магнитопроводами из стали (а) и ферродиеlectrica (б)

Пьезотрансформаторы состоят из пьезоэлемента с нанесенными на них электродами и корпуса с контактами. Простейший пьезотрансформатор содержит пьезокерамическую пластину прямоугольной формы, на которую методом вжигания нанесены электроды из серебра (рисунок 2.21).

К одной паре электродов подключается входное напряжение, создающее электрическое поле в диэлектрике. В результате в пьезоэлементе возникают колебания и определенные участки его деформируются. На деформируемых участках появляется ЭДС, которая может быть снята с помощью правильно расположенных электродов [3].

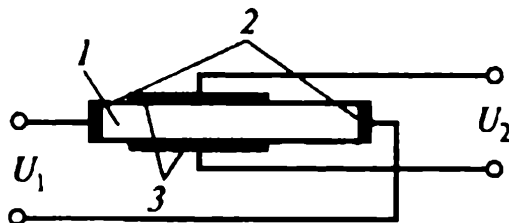


Рисунок 2.21 — Конструкция пьезотрансформатора:
1 — пластина из сегнетодиэлектрика; 2, 3 — электроды

Выбором параметров пьезоэлемента, геометрии и расположения электродов можно получить коэффициент трансформации в несколько сотен и более. Такие трансформаторы не обладают широкополосностью и хорошо работают только на определенных резонансных частотах (рисунок 2.22, а). При закреплении пьезоэлемента в корпусе крепежные узлы располагают в местах минимальной амплитуды механических колебаний. Амплитудная характеристика пьезотрансформатора имеет существенную нелинейность (рисунок 2.22, б), поэтому он не может быть эффективно использован для точного преобразования сигнала [3].

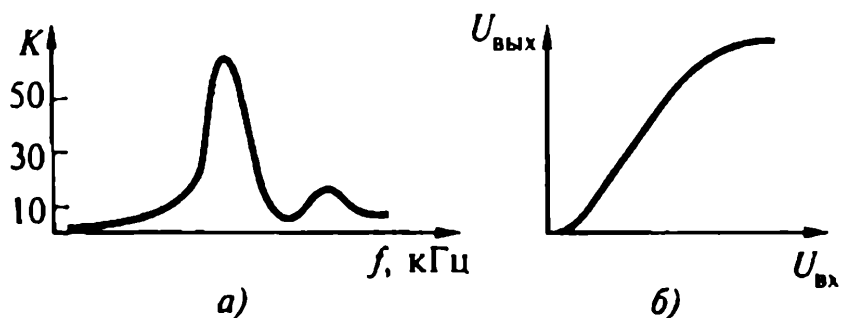


Рисунок 2.22 — Характеристики пьезотрансформатора:
а — частотная; б — амплитудная

В цепях, где не требуется особая точность, а важен лишь высокий коэффициент трансформации при малой отдаваемой мощности (до 5 Вт), они могут успешно конкурировать с трансформаторами электромагнитного типа.

Существует граничная напряженность электрического поля, превышение которой приводит к перегреву пьезоэлемента, что снижает надеж-

ность пьезотрансформатора. Поэтому допустимую напряженность следует выбирать в зависимости от материала и допустимого перегрева пьезотрансформатора [3].

2.5 Контрольные задания

2.5.1 Электрические цепи постоянного тока. Тест

Форма заданий: выбор одного правильного ответа из предложенных.

1.1 Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами с зарядами Q и q , если при $q = \text{const}$ заряд Q увеличить в два раза и расстояние между зарядами также удвоить?

- 1) Останется неизменной.
- 2) Увеличится в два раза.
- 3) Уменьшится в два раза.
- 4) Уменьшится в четыре раза.

1.2 Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами, если разделяющий их воздух заменить дистиллированной водой?

- 1) Увеличится.
- 2) Уменьшится.
- 3) Останется без изменения.

1.3 Какой из трех приведенных на рисунке 2.23 графиков соответствует изменению напряженности поля уединенного заряженного тела?

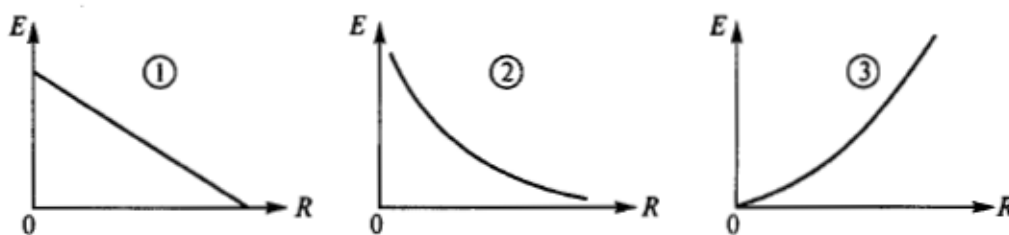


Рисунок 2.23 — Графики к вопросу 1.3

1.4 Как изменятся емкость и заряд на пластинах конденсатора, если напряжение на его зажимах увеличится?

- 1) Емкость и заряд увеличатся.
- 2) Емкость уменьшится, заряд увеличится.
- 3) Емкость останется неизменной, заряд увеличится.
- 4) Емкость останется неизменной, заряд уменьшится.

1.5 Как изменятся энергия последовательно включенных одинаковых конденсаторов и их заряд на рисунке 2.24 при замыкании ключа K ?

- 1) Энергия увеличится, заряд уменьшится.
- 2) Энергия увеличится, заряд не изменится.
- 3) Энергия увеличится, заряд увеличится.
- 4) Энергия уменьшится, заряд не изменится.

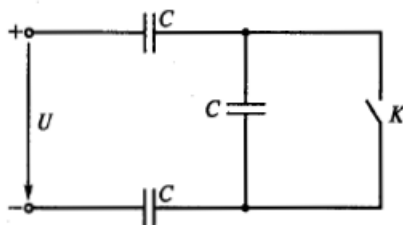


Рисунок 2.24 — Рисунок к вопросу 1.5

1.6. Какова эквивалентная емкость батареи конденсаторов на рисунке 2.25, если $C_1 = 40$ мкФ, $C_2 = 20$ мкФ, $C_3 = 20$ мкФ?

- 1) 80 мкФ.
- 2) 60 мкФ.
- 3) 40 мкФ.
- 4) 50 мкФ.
- 5) 20 мкФ.

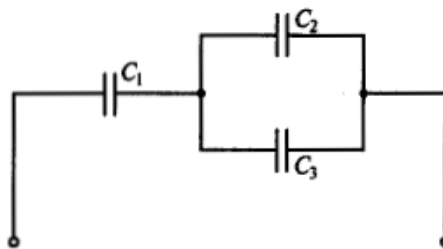


Рисунок 2.25 — Рисунок к вопросу 1.6

1.7 Как выразить напряжение U через параметры цепи E , R_0 , R , схема которой приведена на рисунке 2.26?

- 1) $U = (E(R - R_0)) / (R_0 + R)$.
- 2) $U = ER / (R_0 + R)$.
- 3) $U = ER_0 / (R_0 + R)$.
- 4) $U = E(R_0 + R) / R$.
- 5) Другой ответ.

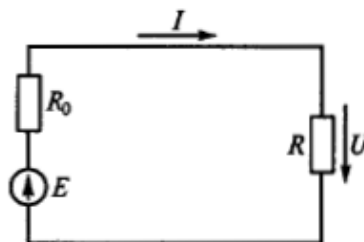


Рисунок 2.26 — Рисунок к вопросу 1.7

1.8 Как изменится сопротивление проводника, если его длину и диаметр увеличить в два раза?

- 1) Не изменится.
- 2) Уменьшится в два раза.
- 3) Увеличится в два раза.

1.9 При температуре 20 °С сопротивление проводника $R = 4,2$ Ом, его длина $l = 10$ м, а площадь поперечного сечения $S = 1$ мм². Каковы удельное электрическое сопротивление ρ , Ом •мм²/ м, проводника и материал, из которого он изготовлен?

- 1) Фехраль ($\rho = 1,4$).
- 2) Алюминий ($\rho = 0,029$).
- 3) Манганин ($\rho = 0,42$).
- 4) Нихром ($\rho = 1,1$).

2.5.2 Трансформаторы. Тест

Форма заданий: выбор одного правильного ответа из предложенных.

1.1 Почему магнитопровод трансформатора выполняется из электротехнической стали, а не из обычной, и собирается из отдельных тонких изолированных друг от друга листов? (Указать неправильный ответ.)

- 1) Из электротехнической стали для уменьшения потерь на вихревые токи.
- 2) Из электротехнической стали для уменьшения потерь на гистерезис.
- 3) Из тонких листов для уменьшения потерь на вихревые токи.
- 4) Из тонких листов для уменьшения потерь на гистерезис.

1.2 Почему магнитопроводы высокочастотных трансформаторов прессуют из ферромагнитного порошка?

- 1) Для упрощения технологии изготовления.
- 2) Для увеличения магнитной проницаемости.
- 3) Для уменьшения тепловых потерь.

1.3 Какая из обмоток трансформатора на рисунке 2.27 является обмоткой низкого напряжения?

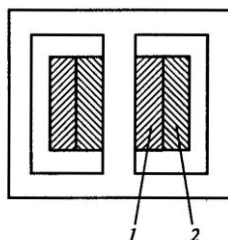


Рисунок 2.27 — Рисунок к вопросу 1.3

- 1) Обмотка 1.
- 2) Обмотка 2.
- 30 Для работы трансформатора это не имеет значения.

1.4 Какой закон лежит в основе принципа действия трансформатора?

- 1) Закон Ампера.
- 2) Закон электромагнитной индукции.
- 3) Принцип Ленца.

1.5 Схема какого трансформатора показана на рисунке 2.28?

- 1) Понижающего.
- 2) Повышающего.
- 3) Это зависит от значения первичного напряжения.

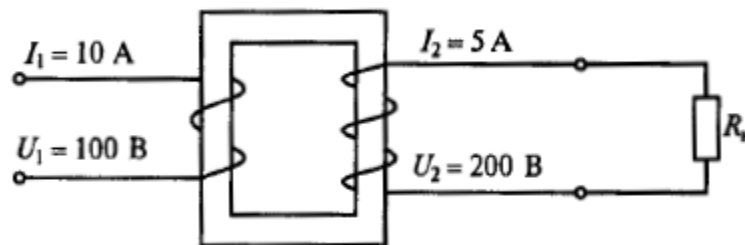


Рисунок 2.28 — Схема к вопросу 1.5

1.6 Как изменятся потери в стали (магнитные потери) при понижении напряжения, подводимого к первичной обмотке трансформатора?

- 1) Не изменятся.
- 2) Увеличатся.
- 3) Уменьшатся.

1.7 Чему равна активная мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе?

- 1) Номинальной мощности трансформатора.
- 2) Нулю.
- 3) Мощности потерь в стали сердечника.

1.8 От каких электрических параметров зависят потери мощности в стали трансформатора?

- 1) От тока первичной обмотки.

- 2) От тока вторичной обмотки.
- 3) От первичного напряжения, подводимого к трансформатору.

1.9 Когда КПД трансформатора имеет максимальное значение?

- 1) При номинальной загрузке трансформатора.
- 2) При работе трансформатора вхолостую.
- 3) Когда переменные потери мощности в меди равны постоянным потерям мощности в стали.

1.10 Как изменится показание ваттметра, включенного в первичную цепь трансформатора, при уменьшении первичного тока от номинального значения до значения тока холостого хода?

- 1) Не изменится.
- 2) Увеличится.
- 3) Уменьшится.

1.11 Посредством каких полей осуществляется передача электрической энергии в трансформаторе из первичной обмотки во вторичную?

- 1) Электрического и магнитного.
- 2) Электрического.
- 3) Магнитного.

1.12 Как изменятся потери мощности в стали при увеличении нагрузки трансформатора?

- 1) Останутся без изменения.
- 2) Увеличатся.
- 3) Уменьшатся.

1.13 Чему равен КПД трансформатора?

- 1) $\eta = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}}$;
- 2) $\eta = U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$;
- 3) $\eta = P_2/P_1$.

3 Полупроводники — основа современной элементной базы электроники

3.1 Преимущества полупроводниковых элементов перед электровакуумными

На начальном этапе развития электроники основой элементной базы были электровакуумные приборы (радиолампы), использующие явление протекания тока через вакуумный промежуток между двумя электродами: катодом и анодом (см. рисунок 3.1) [6, 7].

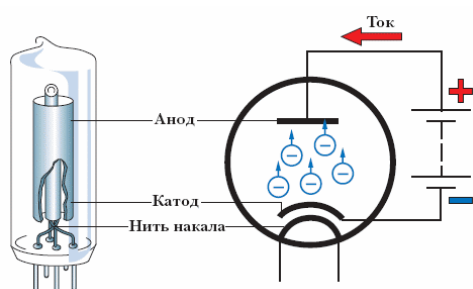


Рисунок 3.1 — Электровакуумный прибор

Электропроводность обеспечивалась за счет движения в этом промежутке электронов, испускаемых раскаленным катодом при наличии положительной разности потенциалов анод–катод.

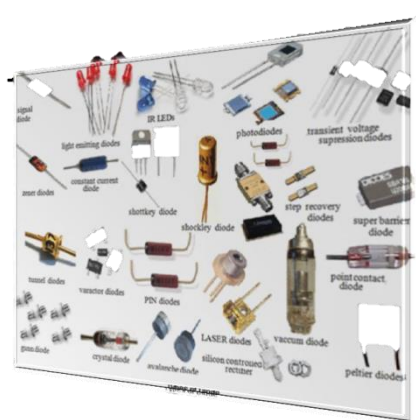
Основными недостатками радиоламп являются [6, 7]:

- 1) большие размеры, которые становятся все более ощутимыми при построении сложных электронных устройств (таких, например, как компьютер), содержащих десятки – сотни тысяч таких элементов (см. рисунок 3.2);
- 2) низкий срок службы (выгорание катода, нарушение вакуума);
- 3) низкая экономичность (анодное напряжение в несколько десятков – сотен вольт и необходимость постоянно поддерживать катод в раскаленном состоянии);
- 4) низкая технологичность изготовления (обеспечение высокого вакуума, сварка миниатюрных деталей и т. д.).



Рисунок 3.2 — Внешний вид электровакуумных приборов

Ситуация революционным образом изменилась, когда была выявлена возможность управления электропроводностью полупроводников, в которых все физические процессы проходят внутри твердого тела.



Твердотельная технология дает возможность изготавливать электронные элементы микроскопических размеров, позволяющие выполнять сложные электронные схемы, содержащие десятки тысяч компонентов на тонкой пластинке площадью в несколько квадратных миллиметров (см. рисунок 3.3) [6].

Рисунок 3.3 — Внешний вид электронных устройств

Полупроводниковые компоненты не имеют ограничений на срок годности, способны функционировать при ничтожно малом потреблении энергии. Именно твердотельная технология обеспечила внедрение электронных устройств во все сферы современной жизни [6].

3.2 Физические основы электропроводности полупроводников

Полупроводники, в отличие от металлов, в чистом виде при термодинамической температуре 0 К близки по свойствам диэлектрикам, т. е. электропроводность практически равна нулю. И лишь за счет введения специальных примесей, а также за счет высокой напряженности электрического поля электропроводность может быть существенно увеличена.

Физическую модель полупроводника описывает зонная теория. Ее основой являются постулаты физики твердого тела о движении электронов вокруг атомного ядра на дискретных орбитах, определяемых энергией электрона (разрешенных энергетических уровнях). Такие электроны жестко «привязаны» к конкретному атому и не могут свободно передвигаться, т. е. быть носителями тока [7].

При достаточном энергетическом воздействии электрон может приобрести дополнительную энергию, достаточную для того, чтобы «оторваться» от связи с конкретным атомом и стать «свободным».

Свободные электроны способны участвовать в электропроводности или под воздействием градиента концентрации (электрохимического по-

тенциала) — диффузии, или за счет градиента электрического поля (электрического потенциала) — дрейфа.

В твердом теле разрешенные энергетические уровни отдельных электронов образуют разрешенные зоны, состоящие из дискретных уровней отдельных электронов.

Разрешенные зоны разделены друг от друга запрещенными зонами (значениями энергии, которыми электроны обладать не могут).

Проводимость в твердом теле возможна лишь при переходе электрона на ближайший (более высокий) разрешенный энергетический уровень. Такие уровни имеются в «верхней» разрешенной зоне, которая называется зоной проводимости (*conduction band*). Ближайшая к ней («нижняя») разрешенная зона при температуре абсолютного нуля является полностью заполненной и называется валентной зоной (*valence band*).

Электропроводность полупроводника определяется взаимодействием этих двух зон [6].

3.3 Электропроводность беспримесного (собственного) полупроводника

В беспримесном полупроводнике при абсолютном нуле ($T = 0$ К) все уровни валентной зоны заняты, а зоны проводимости — свободны, свободных носителей нет, электропроводность равна нулю. При повышении температуры ($T > 0$ К) отдельные электроны приобретают энергию, достаточную для перехода из валентной зоны в зону проводимости, где электрон становится свободным и может двигаться под воздействием электрического поля (см. рисунок 3.4) [6].

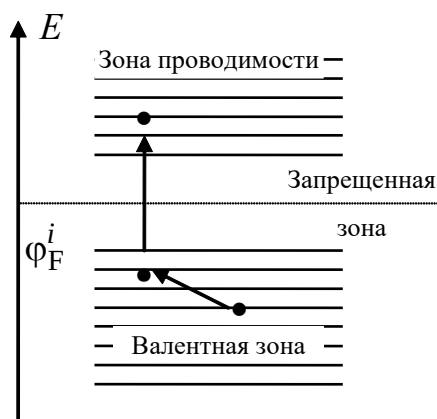


Рисунок 3.4 — Механизм возникновения свободных носителей

Но при уходе из валентной зоны электрон оставляет там «вакантное» место — освободившийся разрешенный уровень, который может быть занят соседним электроном валентной зоны, т. е. появляется возможность движения свободных зарядов и в валентной зоне. Поэтому в результате акта перехода одного электрона из валентной зоны в зону проводимости в полупроводнике появляется два свободных носителя — электрон (n) в зоне проводимости и свободный уровень в валентной зоне — дырка (p). В собственном полупроводнике число свободных электронов (n_i) и число дырок (p_i) равны ($n_i = p_i$) [6, 7].

Число свободных носителей при данной температуре T определяется плотностью разрешенных уровней в каждой зоне и вероятностью нахождения электрона на определенном уровне, подчиняется соотношению Максвелла – Больцмана и равно [1]

$$n_i = p_i = A \cdot T^{3/2} e^{-\frac{\varepsilon_z}{kT}} = A \cdot T^{3/2} e^{-\frac{\varphi_z}{2\varphi_T}} \quad (3.1)$$

где A — коэффициент, отражающий свойства материала;
 ε_z — ширина запрещенной зоны в электрон-вольтах;
 φ_z — ширина запрещенной зоны в вольтах (ε_z/q);
 φ_T — температурный потенциал:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q},$$

где k — постоянная Больцмана;
 q — заряд электрона.

При комнатной температуре $\varphi_T \approx 0,025$ В.

Для наиболее распространенных полупроводников:

германий	$\varepsilon_z = 0,66$ эВ;
кремний	$\varepsilon_z = 1,12$ эВ.

Поскольку $\varphi_z / 2\varphi_T \gg 1$, значение экспоненты в (3.1) очень сильно меняется от приращений ее показателя

Отсюда следует два важных вывода [1, 7]:

1) электропроводность собственного полупроводника очень резко зависит от ширины запрещенной зоны; так, при $T = 300$ К для германия $n_i = 2,5 \cdot 10^{13}$, для кремния $n_i = 2 \cdot 10^{10}$, т. е. электропроводность кремния на три порядка меньше электропроводности германия;

2) электропроводность собственного полупроводника сильно зависит от температуры (из-за влияния φ_T на показатель экспоненты). Температурная зависимость электропроводности является существенным фактором, затрудняющим применение полупроводниковых приборов, поскольку температурные изменения могут быть вызваны не только внешней средой, но и внутренним разогревом при протекании тока через полупроводник. Обеспечение эффективного отвода тепла от полупроводника, исключающего его перегрев, является одной из главных задач при проектировании как мощных дискретных полупроводниковых элементов, так и маломощных устройств, содержащих в ограниченном объеме огромное число элементов.

Инициировать электропроводность собственного полупроводника можно не только при его нагреве, но и за счет других энергетических воз-

действий: оптического, механического, электрического поля высокой напряженности.

На основе этих явлений электронной промышленностью выпускаются специальные полупроводниковые элементы: терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы, варисторы и др. Эти элементы меняют свою электропроводность (сопротивление) под воздействием одного из вышеуказанных факторов, т. е. являются преобразователями указанных величин — температуры, освещенности, механической деформации, напряженности электрического поля — в электрическое сопротивление. Перечисленные элементы широко используются в системах автоматики, измерительной технике и т. д., каждый из них описывается целым набором характеристик и параметров и имеет различные конструктивные модификации.

3.4 Электропроводность примесных полупроводников

Основная группа электронных элементов, с помощью которых решаются задачи электронной техники, — это элементы, основанные на механизме примесной электропроводности.

Собственная электропроводность полупроводников невелика. Повысить электропроводность полупроводников можно путем введения в их структуру примеси. В этом случае дополнительно к собственной возникает еще и примесная электропроводность.

При определенных условиях ничтожно малые относительные объемы примеси, внедренные в исходный полупроводник в результате сложного технологического процесса, могут существенно увеличить электропроводность уже при комнатной температуре [1, 7].

Донорные примеси

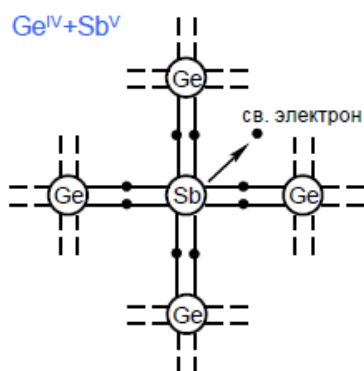


Рисунок 3.5 — Процесс образования свободного электрона

Если к *Ge* или *Si* с валентностью IV добавить небольшое количество элементов с валентностью V (на внешней оболочке атома находится 5 электронов), например, сурьмы (*Sb*), или мышьяка (*As*), или фосфора (*P*), то атомы примеси взаимодействуют с атомами полупроводника только четырьмя своими электронами, а пятый электрон является лишним и будет слабо связан с ядром (см. рисунок 3.5). Вследствие теплового движения все лишние электроны становятся свободными [1, 7].

Примеси легко отдающие и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов называются донорными примесями, а сами вещества — донорами. (Донор — дающий, жертвующий, дарящий.)

Полупроводники с преобладанием электронной электропроводности называют полупроводниками *n*-типа (от слова *negative* — отрицательный).

Одновременно с появлением свободных электронов, способных перемещаться атомы примеси превращаются в положительные ионы — неподвижные заряды. В целом полупроводник остается электрически нейтральным [1, 7].



Рисунок 3.6 — Донорная примесь

Введение примеси в полупроводник приводит к появлению на энергетической диаграмме (см. рисунок 3.6) в запрещенной вблизи зоны проводимости уровней энергии, заполненных электронами при температуре абсолютного нуля. При комнатной температуре эти электроны легко переходят в область проводимости и участвуют в создании электрического тока.

В отличие от электронов, уходящих из валентной зоны, электроны примеси, перешедшие в зону проводимости, не образуют дырок, т. к. при малой концентрации примеси расстояние между ее атомами настолько велико, что переход электрона от одного атома примеси на освободившийся уровень у другого атома становится невозможным, поэтому атом примеси, потерявший электрон, становится положительно заряженным ионом, не способным передвигаться в твердом теле.

Концентрация носителей в примесном полупроводнике подчиняется закону [1, 8]

$$n_n \cdot p_n = n_i^2. \quad (3.2)$$

Соотношение 3.2 означает, что увеличение объема примеси, с одной стороны, приводит к увеличению основных носителей, но, с другой стороны, возрастает и вероятность их рекомбинации, когда электрон из зоны проводимости возвращается на свободные уровни примеси, деионизируя ее атомы. В результате этих процессов и наступает равновесие, определяемое соотношением 3.2 [1, 8].

Поскольку уже при комнатной температуре практически все атомы примеси становятся ионизированными, число основных носителей от температуры практически не зависит ($n_n \approx \text{const}$).

Согласно соотношению 3.2

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n},$$

а это означает, что число неосновных носителей очень сильно зависит от температуры из-за аналогичной зависимости от температуры числа собственных носителей n_i .

Вывод. Электрический ток в полупроводнике n -типа в основном создается электронами, а полупроводник такого типа имеет электронную электропроводность. Носители, концентрация которых в данном полупроводнике преобладает называются основными. Неосновными называются носители заряда, концентрация которых меньше, чем концентрация основных носителей. Таким образом, в полупроводнике n -типа основными носителями являются электроны, а неосновными — дырки [1, 8].

Акцепторные примеси

Акцепторные примеси создают примесную *дырочную электропроводность* [1, 8].

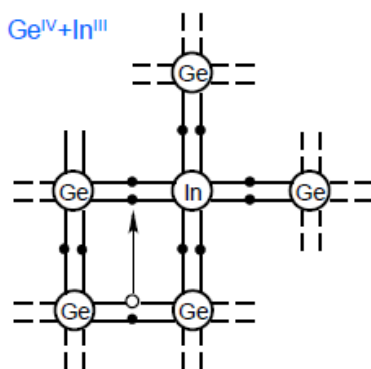


Рисунок 3.7 — Процесс образования дырки

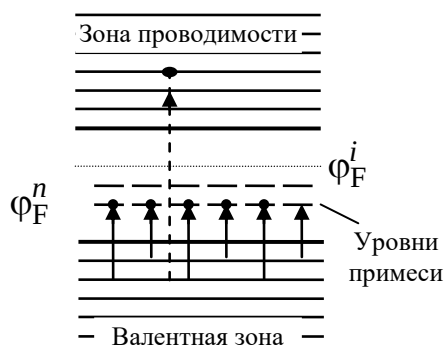
Полупроводник с дырочной электропроводностью создается путем введения примесей трехвалентных атомов (бор, индий, алюминий, галлий), которые, соответственно, имеют три валентных электрона на внешней оболочке. Атомы примеси отнимают электроны у атомов полупроводника, образуя с ними ковалентные связи в кристаллической решетке (см. рисунок 3.7) [1, 8].

Однако связь остается незаполненной. Недостающий электрон отбирается у соседнего атома кристаллической решетки. В результате на месте заимствованного электрона образуется дырка, а сам атом превращается в отрицательный ион. Атомы примеси, принимающие валентные электроны соседних атомов называются акцепторными примесями, а само вещество — акцепторами. Акцептор — принимающий.

Одновременно с появлением дырок (подвижные заряды) атомы примеси превращаются в отрицательные ионы (неподвижные заряды).

Полупроводники с преобладанием дырочной электропроводности называют полупроводниками *p*-типа (от слова *positive* – положительный).

Введение акцепторной примеси отражается на энергетической диаграмме полупроводника (см. рисунок 3.8). В запрещенной зоне вблизи валентной зоны появляются акцепторные уровни энергий, свободные от электронов при температуре абсолютного нуля. При комнатной температуре электроны из валентной зоны легко переходят на акцепторные уровни, оставляя в валентной зоне большую концентрацию дырок [1].



Уровни этой примеси располагаются близко к потолку валентной зоны. Электроны валентной зоны ионизируют атомы примеси, создавая свободные носители — дырки, которые преобладают над электронами и являются основными носителями:

$$p_p \gg n_p.$$

Уровень Ферми у него лежит ниже середины запрещенной зоны (рисунок 3.8).

Рисунок 3.8 — Акцепторная примесь

Вывод. Ток в дырочном полупроводнике создается в основном дырками. В полупроводнике *p*-типа основные носители — дырки, а неосновные — электроны [1, 8].

Особенности полупроводников

Для снижения сопротивления полупроводника необходимо, чтобы примесная электропроводность преобладала над собственной, т.е. концентрация атомов донорной (N_d) или акцепторной (N_a) примеси должна превышать концентрацию собственных носителей заряда (на 2-3 порядка).

Особенностью полупроводников является постоянство произведений концентраций основных и неосновных носителей при заданной температуре, описываемое выражением:

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i p_i$$

где $n_i = p_i$ — концентрация носителей в собственном (чистом) полупроводнике.

Зависимость концентраций носителей от температуры полупроводника накладывает определенные ограничения на температурный диапазон применения полупроводниковых приборов.

При температурах, превышающих верхний предел происходит нарушение условий $n_n \gg p_n$ и $p_p \gg n_p$. В этом случае решающее влияние имеет концентрация собственных носителей заряда, т. е. примесный полупроводник превращается в собственный (имеет название — вырожденный полупроводник) [1, 8].

Данное обстоятельство препятствует нормальному функционированию полупроводниковых приборов:

- верхний предел для Ge составляет 75–85 °С, для Si — 150–170 °С;
- нижний предел составляет от минус 60 до минус 55 °С.

Дрейфовое и диффузионное движение носителей заряда

В отсутствие приложенного к полупроводнику напряжения носители заряда (электроны и дырки) совершают упорядоченное хаотическое тепловое движение, поэтому ток через полупроводник равен нулю.

Электрический ток в полупроводнике — направленное движение носителей заряда возникает под действием разности потенциалов и разности концентраций носителей.

Под действием разности потенциалов в полупроводнике возникает электрическое поле, ускоряющее электроны и дырки и сообщающее им еще некоторое поступательное движение, представляющее *ток проводимости*. Направленное движение носителей заряда под действием электрического поля называют *дрейфом* (*дрейфовое движение*).

При создании в полупроводнике двух областей с разными концентрациями носителей заряда, в результате теплового движения носители переходят из области с их высокой концентрацией в область с меньшей концентрацией, т. е. стремятся к выравниванию концентраций. Направленное движение носителей заряда под воздействием разности концентраций называется *диффузией* (*диффузионное движение*). Явление диффузии носителей в полупроводниках аналогично диффузии в других веществах.

В зависимости от характера движения носителей различают *дрейфовый* и *диффузионный* токи [1, 7]

Вывод. В зависимости от характера движения носителей различают дрейфовый и диффузионный токи.

Принцип действия *p-n*-перехода

1) *p-n*-переход при отсутствии внешнего напряжения

Электронно-дырочным или *p-n*-переходом называют область, возникающую на границе двух полупроводников с различными типами электропроводности.

Главной особенностью этого контакта является его ярко выраженная нелинейность — проводимость при одной полярности внешнего напряжения (прямое смещение) намного больше, чем при другой полярности (об-

ратное смещение). И хотя p - n -переход может использоваться для разных целей, главное его применение — как элемента с преимущественно односторонней проводимостью (вентильного, выпрямительного элемента) [1, 7, 8].

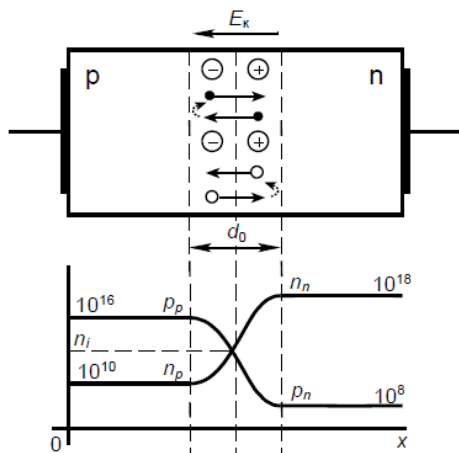


Рисунок 3.9 — Диффузия носителей через p - n переход

При соприкосновении p - и n -полупроводников происходит диффузия носителей через контакт-переход:

- электроны из n -области (основные носители) диффундируют в p -область (неосновные носители), где их концентрация меньше;
- дырки из p -области (основные носители) диффундируют в n -область (неосновные носители), где их концентрация меньше [7, 8].

По обе стороны перехода создаются объемные разноименные заряды:

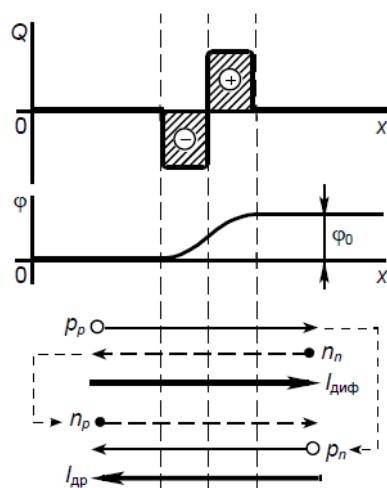


Рисунок 3.10 — Потенциальный барьер p - n перехода

- в n -области — нескомпенсированный положительный заряд, создаваемый ионами донорной примеси;
- в p -области — нескомпенсированный отрицательный заряд, создаваемый ионами акцепторной примеси.

Между объемными зарядами возникает электрическое поле (с вектором E_K) и контактная разность потенциалов $U_K = \phi_0$ (за нулевой принят потенциал p -области).

Контактная разность потенциалов создает потенциальный барьер (энергетический барьер) ϕ_0 . Высота потенциального барьера ϕ_0 зависит от концентрации носителей [7, 8].

Контактная разность потенциалов создает потенциальный барьер (энергетический барьер) ϕ_0 . Высота потенциального барьера ϕ_0 зависит от концентрации носителей [7, 8].

Потенциальный барьер препятствует диффузионному движению носителей через переход. Лишь малое число основных носителей имеет достаточно энергии, чтобы его преодолеть. Носители, преодолевающие этот барьер создают диффузионный ток $I_{диф}$.

Под действием поля контактной разности потенциалов эти же носители перемещаются обратно, т.е. из n -области дырки возвращаются в p -область, а электроны из p -области — в n -область. Эти носители создают дрейфовый ток $I_{др}$ [7, 8].

Таким образом, основные носители создают *диффузионный* ток, а неосновные — *дрейфовый* ток.

$$I_{\partial p} = I_{\partial \text{иф}}.$$

Полный ток через переход

$$I_{\partial \text{иф}} - I_{\partial p} = 0.$$

Высота потенциального барьера устанавливается такой, чтобы наступило равновесие, т.е. чтобы диффузионный и дрейфовые токи компенсировали друг друга [7, 8].

2) *p-n*-переход при прямом напряжении

Внешнее напряжение, подключаемое к *p-n*-переходу называют напряжением смещения, которое приводит к изменению условий переноса заряда через переход.

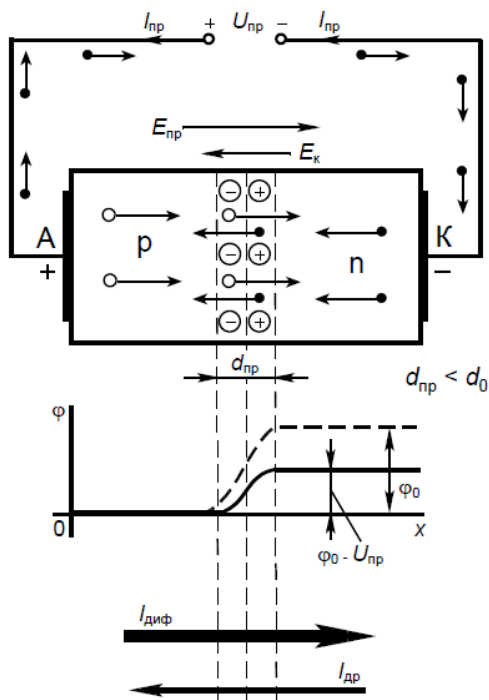


Рисунок 3.11 — *P-n*-переход при прямом напряжении

Если к «+» источника напряжения подключить к *p*-области, а «-» источника напряжения — к *n*-области, то такое напряжение называется прямым, т. к. его полярность совпадает с полярностью основных носителей в полупроводнике, и через переход протекает прямой ток $I_{пр}$. В этом случае говорят, что переход смещен в прямом направлении [7, 8].

Прямое напряжение создает в переходе электрическое поле встречно полю контактной разности потенциалов. Следовательно, результирующее поле становится слабее. В следствие чего контактная разность потенциалов уменьшается, т. е. высота потенциального барьера понижается:

$$U_K = \varphi_0 - U_{пр}.$$

Значит возрастает диффузионный ток $I_{\partial \text{иф}}$, ток дрейфа $I_{\partial p} = \text{const}$.

При прямом напряжении $I_{\partial \text{иф}} > I_{\partial p}$, поэтому

$$I_{пр} = I_{\partial \text{иф}} - I_{\partial p} > 0.$$

Если $I_{\partial \text{иф}} > I_{\partial p}$, то $I_{пр} > I_{\partial \text{иф}}$.

Процесс введения основных носителей через пониженный потенциальный барьер в область, где эти носители являются неосновными называется *инжекцией носителей заряда*.

Область полупроводникового прибора, из которой инжектируются носители называется *эмиттером*, а область, в которую инжектируются неосновные для этой области носители заряда называется *базой*. В данном образце $n_n \gg p_p$, следовательно, полупроводник n -типа — эмиттер, а полупроводник p -типа — база.

Помимо снижения потенциального барьера уменьшается толщина p - n -перехода ($d_{np} < d_0$) и его сопротивление (единицы–десятки Ом) за счет заполнения перехода основными носителями заряда. При некоторой величине U_{np} потенциальный барьер исчезает, сопротивление перехода ≈ 0 и им можно пренебречь. В этом случае величина I_{np} будет определяться только сопротивлением p - и n -областей [7, 8].

Процессы, протекающих в разных частях цепи

Электроны из n -области движутся в p -область, а дырки из p -области движутся в n -область, т. е. через переход протекает два тока — электронный и дырочный: $I_{np} = I_n + I_p = \text{const}$, после прохождения перехода электроны рекомбинируют с дырками.

Во внешних проводниках движутся только электроны. От «–» источника — в n -область, где компенсируют убыль электронов, диффундирующих в p -область. Из p -области электроны движутся к «+» источника, и тогда в этой области образуются новые дырки. Такой процесс происходит непрерывно, и, следовательно, непрерывно протекает прямой ток I_{np} [6–8].

3) P - n -переход при обратном напряжении

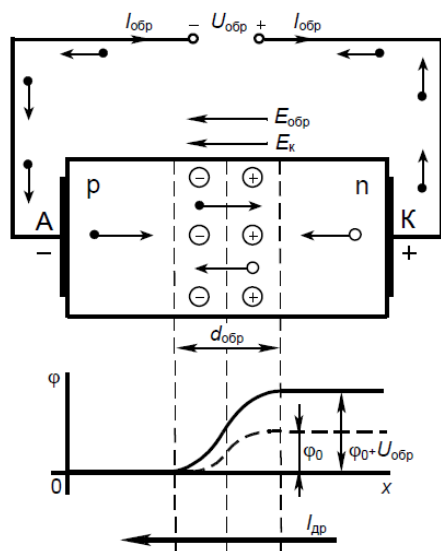


Рисунок 3.12 — P - n -переход при обратном напряжении

Пусть источник внешнего напряжения подключен: «+» к n -области, а «–» к p -области. Такое напряжение для p - n -перехода называется *обратным*, т. к. его полярность противоположна полярности основных носителей в полупроводнике.

Через обратно смещенный переход протекает небольшой обратный ток $I_{обр}$. Поскольку электрическое поле, создаваемое $U_{обр}$ складывается с полем контактной разности потенциалов E_k (на рисунке 3.12 векторы напряженности E_k и $E_{обр}$ сонаправлены), то результирующее поле усиливается, и высота потенциального барьера увеличивается и составляет

$$U_k = \varphi_0 + U_{обр}.$$

Следовательно, при небольшом повышении потенциального барьера диффузионное перемещение основных носителей через переход прекращается (собственных тепловых скоростей недостаточно для преодоления барьера), поэтому

$$I_{\text{диф}} = 0.$$

Ток дрейфа остается неизменным, т. к. он определяется, главным образом, числом неосновных носителей, попадающих на переход из n - и p -областей. В этом случае

$$I_{\text{диф}} < I_{\text{др}},$$

поэтому

$$I_{\text{обр}} < I_{\text{др}}.$$

Выведение неосновных носителей через p - n -переход ускоряющим электрическим полем, созданным обратным напряжением, называют *экстракцией носителей заряда* [6-8].

Таким образом, $I_{\text{обр}}$ — ток дрейфа, вызванный перемещением малого числа неосновных носителей, следовательно, величина $I_{\text{обр}}$ мала (сопротивление перехода весьма велико), т. к. количество неосновных носителей мало.

При повышении $U_{\text{обр}}$ поле в месте перехода становится сильнее и больше основных носителей выталкивается из пограничных слоев вглубь p - и n -областей. Поэтому увеличивается не только высота потенциального барьера, но и ширина самого перехода ($d_{\text{обр}} > d_0$).

P - n -переход, смещенный в обратном направлении, подобен заряженному конденсатору с диэлектриком, в котором имеется значительный ток утечки ($I_{\text{обр}}$). По обе стороны границы перехода возникают два разноименных объемных заряда (см. рисунок 3.12). Диэлектрик — граница перехода. Ток утечки конденсатора (в соответствии с законом Ома) пропорционален приложенному напряжению, а $I_{\text{обр}}$ сравнительно слабо зависит от напряжения.

Концентрация неосновных носителей является функцией температуры кристалла, поэтому $I_{\text{обр}}$ также экспоненциально зависит от температуры и его часто называют *тепловым* током.

Вывод. P - n -переход обладает ярко выраженными вентильными свойствами: хорошо пропускает ток в прямом направлении и не пропускает ток в обратном, т. е. обладает односторонней проводимостью [6-8].

3.5 Контрольные вопросы

1) Какие критерии положены в основу деления веществ на проводники, полупроводники, диэлектрики?

2) Объясните процесс прохождения тока в собственном и примесном полупроводнике.

3) Какой полупроводник называется примесным и чем объясняется его широкое применение?

4) Что такое дрейф и диффузия носителей в полупроводнике?

5) Дайте определение p - n -перехода.

6) Какое основное свойство p - n -перехода определило его широкое использование?

4 Полупроводниковые диоды

4.1 Основные понятия

4.1.1 Назначение и классификация

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним электрическим *p-n*-переходом и двумя выводами (см. рисунок 4.1) [1, 5].

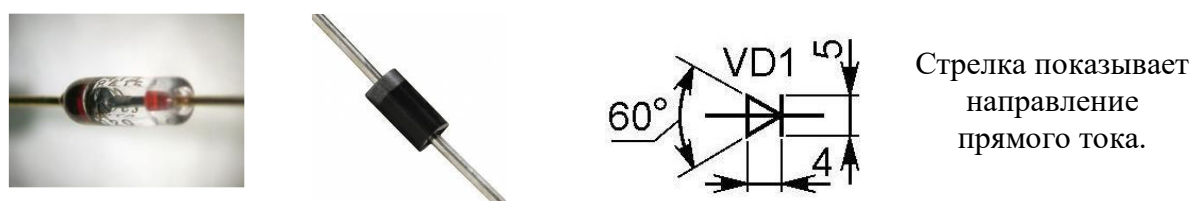


Рисунок 4.1 — Внешний вид диодов различного назначения и условное графическое обозначение диода

В зависимости от технологических процессов, использованных при их изготовлении, различают точечные диоды, сплавные и микросплавные, с диффузионной базой, эпитаксиальные и др. (см. рисунок 4.2) [1, 6].

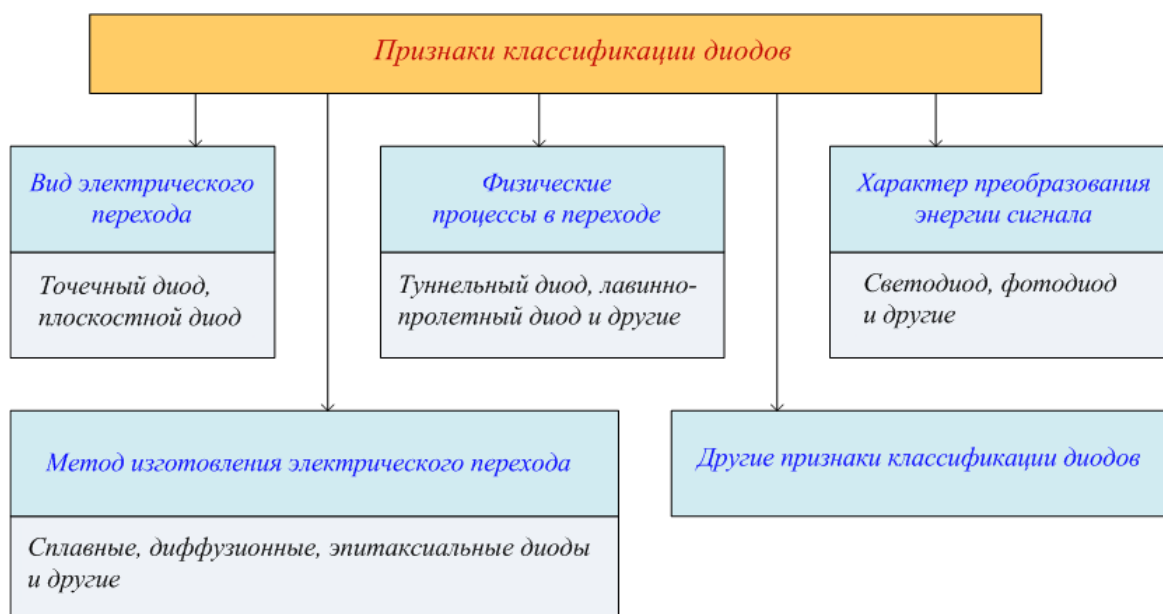


Рисунок 4.2 — Классификация диодов

По функциональному назначению диоды делят на выпрямительные, универсальные, импульсные, смесительные, детекторные, модуляторные, переключающие, умножительные, стабилитроны (опорные), туннельные, параметрические, фотодиоды, светодиоды, магнитодиоды, диоды Ганна и т. д. [6, 7].

Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе несимметричных p - n -переходов. Низкоомную область диодов называют эмиттером, а высокоомную — базой. Для создания переходов с вентиляльными свойствами используют p - n -, p - i -, n - i -переходы, а также переходы металл–полупроводник.

4.1.2 Вольт-амперная характеристика диода

Вольт-амперная характеристика диода имеет прямую и обратную ветви (см. рисунок 4.3). Ток и напряжение диода однозначно связаны вольт-амперной характеристикой [6, 7].

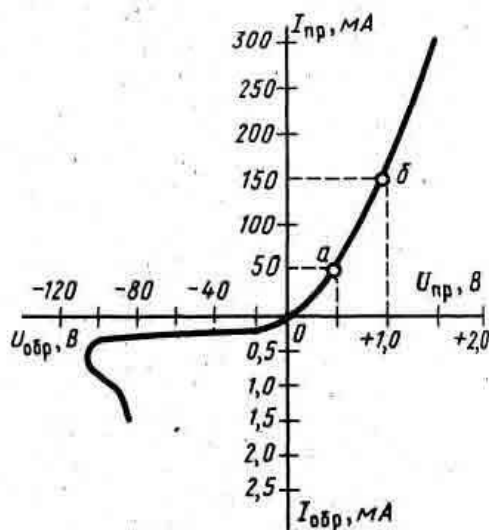


Рисунок 4.3 — Вольт-амперная характеристика диода

Нелинейность в начале прямой ветви обусловлена уменьшением сопротивления запирающего слоя с ростом $U_{пр}$. Начиная с некоторого значения $U_{пр}$, характеристика становится почти линейной, т. к. запирающий слой исчезает. На линейном участке сопротивление диода обусловлено почти постоянным сопротивлением p - и n -областей. Небольшая нелинейность возникает из-за изменения сопротивления этих областей вследствие нагрева.

Обратную ветвь ВАХ показывают в другом масштабе, поэтому наблюдается излом характеристики в начале координат. При увеличении $U_{обр}$ обратный ток быстро возрастает, что связано со снижением диффузионного тока при повышении потенциального барьера.

4.1.3 Пробой p - n -перехода

Увеличение обратного напряжения до некоторого критического значения вызывает явление лавинообразного нарастания обратного тока, которое, если не принять мер по его ограничению, вызовет разрушение p - n -перехода. Это явление называется пробоем. Физический механизм пробоя достаточно сложен, и его условно можно разделить на два типа: *тепловой* (необратимый) и *электрический* (обратимый).

Тепловой пробой можно упрощенно представить следующей схемой: при протекании обратного тока на p - n -переходе выделяется мощность $P=U_0I_0$, что приводит к нагреву объема полупроводника. Возникает положительная тепловая связь, которая, если не обеспечить температурного равновесия (за счет эффективного отвода тепла), приведет к тепловому разрушению p - n -перехода. Предотвращение теплового пробоя является серьезной инженерной задачей и достигается за счет ограничения величины обратного напряжения и обеспечения хорошего отвода тепла от p - n -перехода (установка p - n -перехода на теплоотводящие пластины-радиаторы, активное вентилирование).

Электрический пробой возникает за счет лавинообразной генерации свободных носителей непосредственно в области p - n -перехода при воздействии большой напряженности в результате многократной ударной ионизации атомов [6, 7].

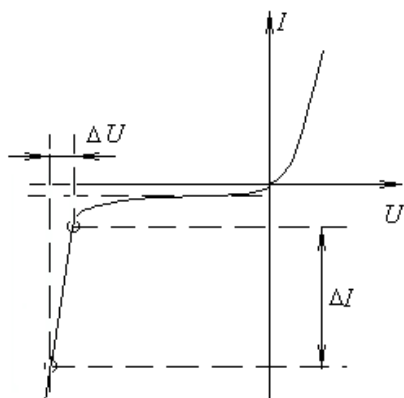


Рисунок 4.4 — Характеристика электрического пробоя

Особенностью электрического пробоя является наличие на вольт-амперной характеристике участка с малым дифференциальным сопротивлением (рисунок 4.4). Это значит, что в режиме пробоя (при контролируемом ограничении тока) p - n -переход ведет себя как источник практически постоянного напряжения ($\Delta U \rightarrow 0$). На основе этого явления разрабатываются специальные элементы — стабилитроны.

Отметим, что при узком переходе и высокой напряженности электрического поля возникает и туннельный пробой (см. рисунок 4.5).

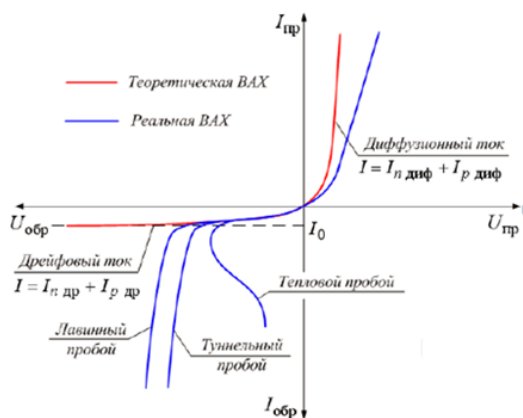


Рисунок 4.5 —Пробои p-n-перехода

Различают два вида пробоя:

- электрический;
- тепловой.

Существует два вида электрического пробоя:

- лавинный;
- туннельный.

Лавинный пробой обусловлен лавинным размножением носителей заряда. Напряжение лавинного пробоя составляет десятки — сотни вольт.

Туннельный пробой объясняется явлением туннельного эффекта, который заключается в переходе электронов через потенциальный барьер с уровнем энергии меньше высоты потенциального барьера, при этом электроны своей энергии не теряют. Напряжение туннельного пробоя составляет не более единиц вольт.

При высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки, выбивают из них новые электроны, которые также разгоняются электрическим полем и также выбивают из атома электроны. С повышением $U_{обр}$ данный процесс усиливается.

4.1.4 Математическое описание ВАХ диода

1) Теоретическая ВАХ диода

Математически теоретическая ВАХ диода описывается выражением [1]:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{U_D}{m \cdot \varphi_T}} - 1 \right), \quad \varphi_T = \frac{k \cdot T}{e} = \frac{T}{11600},$$

где m — коэффициент, зависящий от материала полупроводника ($m = 1$ для Ge, $m = 2$ для Si);

I_0 — тепловой ток (ток насыщения);

I_D — ток диода;

U_D — напряжение на диоде с соответствующим знаком;

φ_T — температурный потенциал при комнатной температуре ($t = 20^\circ\text{C}$,

$\varphi_T \approx 25$ мВ; $t = 27$ °С, $\varphi_T \approx 26$ мВ;
 $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура.

2) Параметры реальной ВАХ диода

В реальных диодах прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики отличаются от идеализированной (см. рисунок 4.6). Это обусловлено тем, что тепловой ток I_T при обратном включении составляет лишь часть обратного тока диода. При прямом включении существенное влияние на ход вольт-амперной характеристики оказывает падение напряжения на сопротивлении базы диода, которое начинает проявляться уже при токах, превышающих 2–10 мА [1].

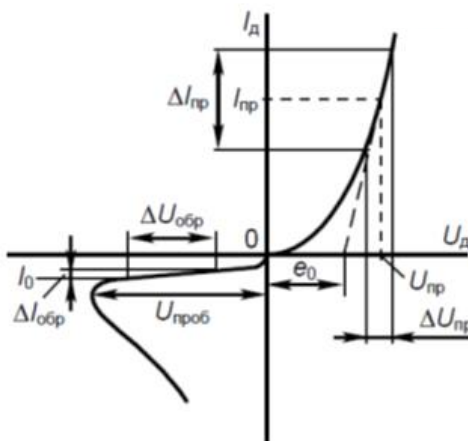


Рисунок 4.6 — Реальная ВАХ диода

При анализе электронных цепей с диодами используются следующие параметры [1]:

e_0 — напряжение отсечки («пятка ВАХ»);

I_0 — тепловой ток, протекающий через запертый p - n -переход;

$U_{проб}$ — напряжение пробоя — обратное напряжение, при котором происходит электрический пробой p - n -перехода;

$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}$ — прямое статическое сопротивление p - n -перехода (сопротивление постоянному току);

$r_{пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}}$ — дифференциальное (динамическое) сопротивление p - n -перехода (сопротивление переменному току);

$R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}}$ — обратное статическое сопротивление p - n -перехода;

$r_{обр} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}}$ — обратное дифференциальное (динамическое) сопротивление p - n -перехода.

Типовые значения параметров диода

	Si	Ge
U_{np} , В	0,7	0,35
r_{np} , Ом	десятки-сотни	10–50
e_0 , В	0,4–0,6	0,2–0,3
I_0 , мкА	десятки – сотни	$\approx I_{0\text{ Si}}$
$R_{обр}$, МОм	сотни	единицы

4.2 Выпрямительные диоды

Выпрямительными диодами называются диоды (см. рисунок 4.7), предназначенные для преобразования переменного тока в постоянный. Для этих диодов характерно отсутствие специальных требований к быстродействию, емкости p - n -перехода и стабильности параметров [3].



Рисунок 4.7 — Внешний вид выпрямительных диодов

В качестве выпрямительных диодов используют сплавные, эпитаксиальные и диффузионные диоды, выполненные на основе несимметричных p - n -переходов.

Эпитаксиальные диоды обычно имеют малое падение напряжения в открытом состоянии и высокое пробивное напряжение.

Для выпрямительных диодов характерно, что они имеют малые сопротивления в проводящем состоянии и позволяют пропускать большие токи. Барьерная емкость их из-за большой площади p - n -переходов велика и достигает значений десятков пикофард.

Германиевые выпрямительные диоды могут быть использованы при температурах, не превышающих 70–80 °С, кремниевые — до 120–150 °С, арсенид-галлиевые — до 150 °С. В настоящее время, благодаря успехам технологии, температурный диапазон существенно расширен [3].

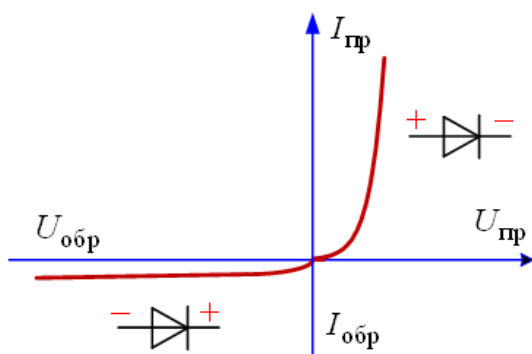


Рисунок 4.8 — ВАХ выпрямительного диода

Для инженерных расчетов обратного тока в зависимости от температуры окружающей среды используют выражение:

$$I_{обр}(T) \approx I_{обр}(T_0) \cdot 2^{\Delta T/T^*},$$

где $I_{обр}(T_0)$ — обратный ток при температуре T_0 ;

T^* — приращение температуры, при котором обратный ток $I_{обр}(T_0)$ удваивается (для кремния эта температура составляет 8–10 °C) [3].

Выпрямительные диоды обычно работают на частоте сети переменного тока 50–60 Гц. Для выпрямления высоких напряжений (единицы–десятки кВ) используются специальные высоковольтные диоды — кремниевые (выпрямительные) столбы, состоящие из нескольких включенных последовательно диодов.

Мощные выпрямительные диоды имеют массивный корпус для отвода тепла от перехода (см. рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 — Мощный выпрямительный диод

Основные параметры выпрямительных диодов и их значения у маломощных диодов [3]:

1) максимально допустимое обратное напряжение диода $U_{обр\ max}$ — значение напряжения, приложенного в обратном направлении, которое диод может выдержать в течение длительного времени без нарушения его работоспособности (десятки — тысячи вольт);

2) средний выпрямленный ток диода $I_{вн\ ср}$ — среднее за период значение выпрямленного постоянного тока, протекающего через диод (сотни миллиампер — десятки ампер);

3) импульсный прямой ток диода $I_{пр и}$ — пиковое значение импульса тока при заданной максимальной длительности, скважности и формы импульса;

4) средний обратный ток диода $I_{обр ср}$ — среднее за период значение обратного тока (доли микроампер — несколько миллиампер);

5) среднее прямое напряжение диода при заданном среднем значении прямого тока $U_{пр ср}$ (доли вольт);

6) средняя рассеиваемая мощность диода $P_{ср д}$ — средняя за период мощность, рассеиваемая диодом, при протекании тока в прямом и обратном направлениях (сотни милливатт — десятки и более ватт).

7) дифференциальное сопротивление диода $r_{диф}$ — отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока (единицы — сотни ом).

Основное назначение выпрямительных диодов — это построение выпрямителей вторичных источников питания.

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. В состав выпрямителя могут входить [1, 2]:

- силовой трансформатор;
- выпрямительное устройство;
- фильтр;
- стабилизатор напряжения.

Трансформатор выполняет следующие функции:

- преобразует величину напряжения сети;
- обеспечивает гальваническую изоляцию нагрузки от силовой сети;
- преобразует количество фаз силовой сети.

В импульсных источниках питания трансформатор обычно отсутствует, так как его функции выполняет высокочастотный инвертор.

Выпрямитель выполняет функцию сохранения направления тока в нагрузке при изменении полярности приложенного напряжения.

Для подавления пульсаций выпрямленного напряжения и тока применяют различные фильтры. Очень часто такой фильтр — это просто один конденсатор, подключенный параллельно нагрузке. Для подавления пульсаций тока нагрузки последовательно с ней включают катушку индуктивности. Этот способ применяется реже. Бывают также сложные LC-фильтры, полученные соединением нескольких катушек и конденсаторов. Фильтры не только подавляют пульсации напряжения и тока нагрузки, но также увеличивают действующее и среднее значение напряжения и тока нагрузки.

Стабилизатор напряжения предназначен для уменьшения влияния внешних воздействий на выходное напряжение выпрямителя. Это могут

быть изменения напряжения питающей сети, температуры окружающей среды, изменения нагрузки и т. д.

Простейшая схема для выпрямления переменного тока показана на рисунке 4.10, а. В ней последовательно соединен источник переменного напряжения — трансформатор, диод VD и нагрузочный резистор R_n . Эта схема называется *однополупериодной* [2, 3].

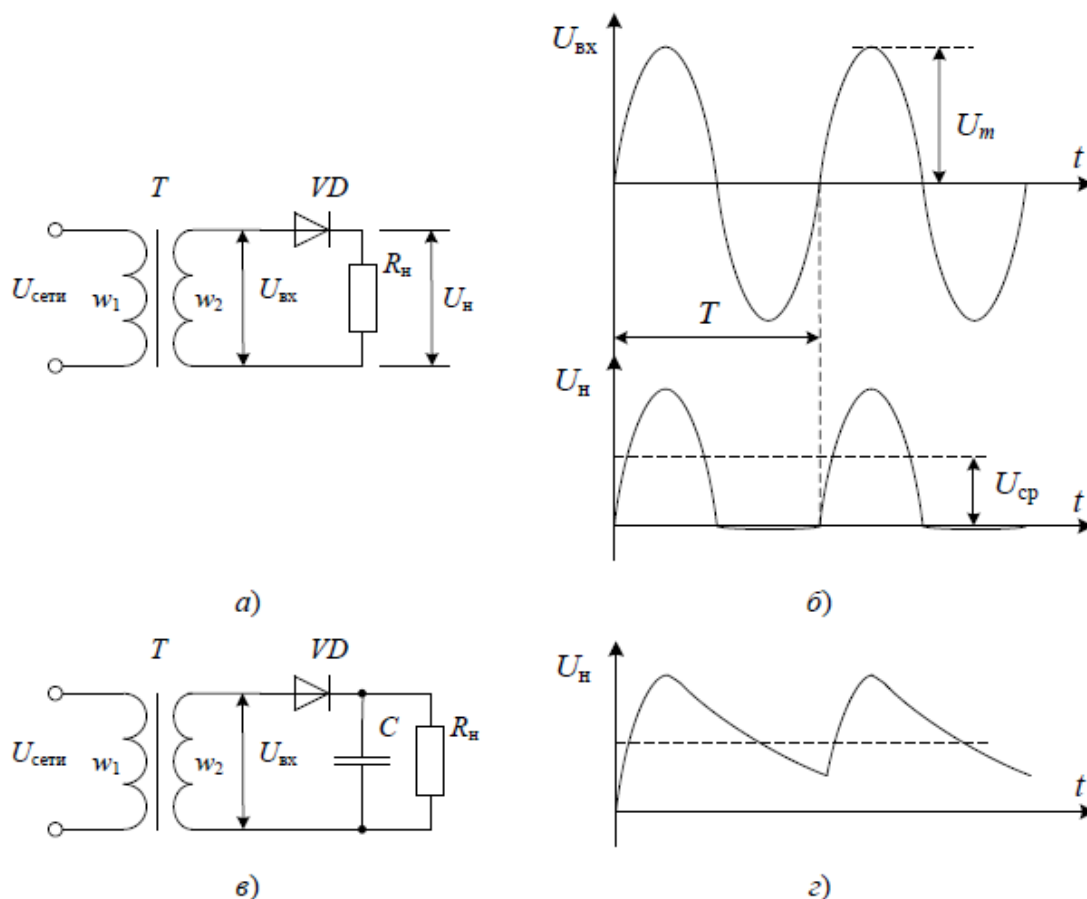


Рисунок 4.10 — Однополупериодный выпрямитель

Работа простейшего выпрямителя происходит следующим образом. В течение одного полупериода напряжение для диода является прямым и проходит ток, создающий на резисторе R_n падение напряжения U_n . Амплитуда положительных полуволн на диоде очень мала.

Для обычных полупроводниковых диодов прямое напряжение не более 1–2 В. В течение следующего полупериода напряжение является обратным, тока практически нет и U_n близко к нулю. Все напряжение источника приложено к диоду и является для него обратным напряжением. Таким образом, максимальное значение обратного напряжения равно амплитуде $U_{\text{вх}}$.

Таким образом, через диод, нагрузочный резистор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полупериода. Этот ток называют

выпрямленным током. Он создает на резисторе R_n выпрямленное напряжение (рисунок 4.10, б).

Основные параметры выпрямителя:

- действующее значение входного напряжения

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 U_m, \text{ где } U_m \text{ — амплитуда входного напряжения;}$$

- среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi} \approx 0.318 U_m, \quad \text{или}$$

$$U_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{\text{вх}} \approx 0.45 U_{\text{вх}};$$

- среднее значение выпрямленного тока $I_{\text{ср}} = \frac{0.45 U_{\text{вх}}}{R_n}$;

- действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора $I_2 \approx 1.57 I_{\text{ср}}$;

- коэффициент пульсаций, равный отношению амплитуды основной гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения

$$p = \frac{U_{m1}}{U_{\text{ср}}} = \frac{\pi}{2} \approx 1.57.$$

К достоинствам схемы можно отнести простоту конструкции.

Недостатки:

- большие пульсации;
- малые значения выпрямленного тока и напряжения;
- низкий КПД.

Применяется такая схема для питания низкоомных нагрузок, не критичных к высоким пульсациям.

Для подавления пульсаций выпрямленного напряжения и тока в схеме параллельно нагрузке подключают конденсатор фильтра C (рисунок 4.10, в).

Во время нарастания напряжения источник питает нагрузку и заряжает конденсатор. Снижение напряжения происходит по экспоненте. В это время диоды закрыты, и конденсатор разряжается на сопротивление нагрузки (рисунок 4.10, г).

Более широкое применение нашли двухполупериодные выпрямители.

Схема выпрямления с выводом от средней точки трансформатора показана на рисунке 4.11 [2, 3].

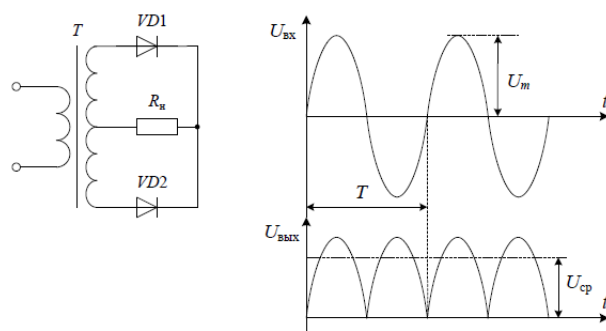


Рисунок 4.11 — Двухполупериодный выпрямитель с выводом от средней точки

Во время первого полупериода первый диод открыт и на нагрузке создается падение напряжения. Во время второго полупериода первый диод закрывается, поскольку оказывается включенным в обратном направлении, а второй, наоборот, открывается и на нагрузке снова выделяется положительная полуволна. Частота пульсаций двухполупериодного выпрямителя вдвое больше, что является его достоинством. Для такой схемы характерны следующие параметры:

$$U_{cp} = 0.9U_{вх};$$

$$U_{вх} = 1.11U_{cp};$$

$$I_{cp} = 0.9 U_{вх}/R_{н};$$

$$I_2 = 0.78I_{cp};$$

$$p = 0.67;$$

Достоинства:

- удвоенные значения U_{cp} и I_{cp} ;
- вдвое меньший коэффициент пульсаций по сравнению с однополупериодной схемой.

Недостатки:

- наличие трансформатора с двумя симметричными обмотками (что увеличивает его массогабаритные показатели);
- удвоенное обратное напряжение на диодах.

Применение фильтров позволяет снизить коэффициент пульсаций.

Мостовая схема показана на рисунке 4.12.

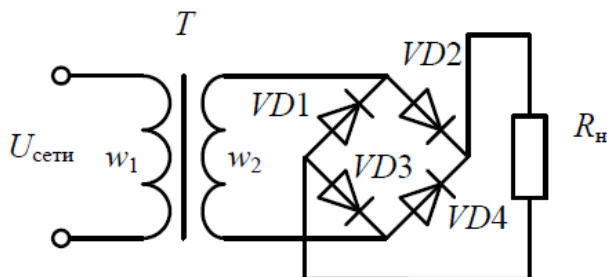


Рисунок 4.12 — Мостовая схема выпрямителя

Параметры такие же, как и двухполупериодной схемы со средним выводом, кроме обратного напряжения (оно в два раза меньше).

Положительная полуволна (с верхнего по схеме вывода трансформатора) проходит через диод $VD2$, затем через нагрузку, затем через $VD3$ ко второму выводу трансформатора. При смене направления тока работают диоды $VD4$, $VD1$. Недостатком схемы считается удвоенное число диодов.

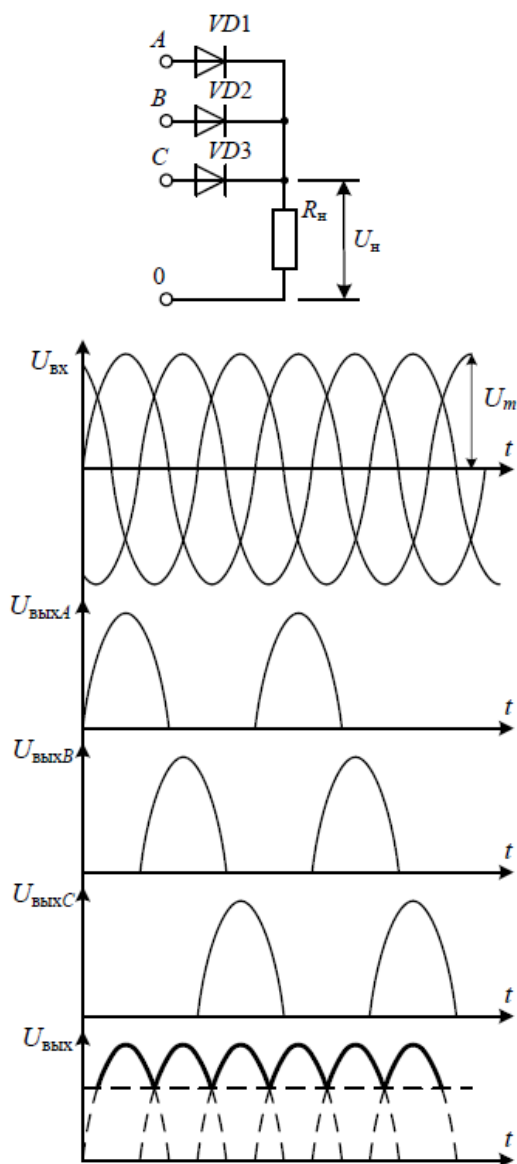


Рисунок 4.13 — Трехфазный выпрямитель

Трехфазные схемы выпрямления часто применяются для получения напряжения большой мощности. Наиболее распространены следующие схемы [2, 8]:

1) Трехфазная однополупериодная схема выпрямления с нулевым выводом (схема Миткевича, рисунок 4.13).

Каждая фаза смещена относительно другой на угол 120° . На нагрузке работает та фаза, у которой больше значение положительной полуволны в

данный момент времени. В схеме диоды используются в течение $1/3$ периода. При этом необходимо наличие средней точки.

Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{cp} = 1.17U_{вх}$, обратное напряжение $U_{обр.мах} = 2.1U_{cp}$, коэффициент пульсаций 0.25.

2) Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления (схема Ларионова, рисунок 4.14).

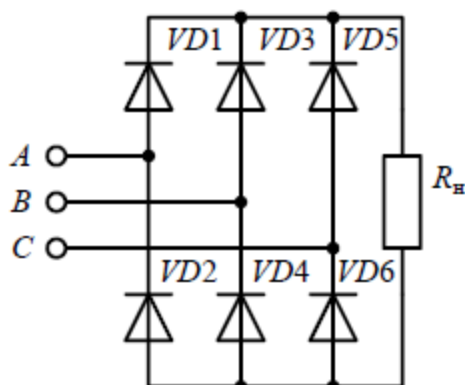


Рисунок 4.14 — Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления

По принципу действия такая схема аналогична однофазной двухполупериодной (мостовой). Для нее характерно:

$$U_{cp} = 2.34U_{вх},$$

$$U_{обр.мах} = 1.05U_{cp},$$

$$p = 0.057.$$

Схема находит применение при различных величинах входного напряжения и токах нагрузки в сотни ампер. Схема экономична, имеет низкие пульсации. Однако в реальных схемах коэффициент пульсаций составляет 8-10 % из-за несимметричности фазных питающих напряжений.

На рисунке 4.15 показаны схемы Г — образного и П — образного LC-фильтров. Они могут применяться в сочетании с любыми выпрямителями. Они подавляют пульсации выпрямленного напряжения лучше, чем один конденсатор, но катушки индуктивности довольно тяжелы и громоздки, поэтому такие фильтры применяются только при необходимости [2, 8].

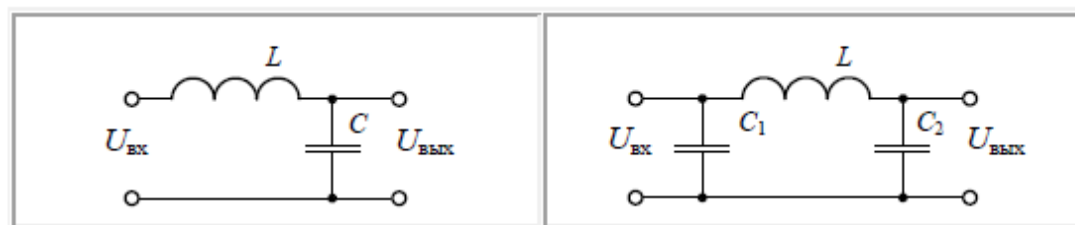


Рисунок 4.15 — LC-фильтры

4.3 Импульсные диоды

Импульсный полупроводниковый диод — это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы [7].

Импульсные диоды предназначены для работы в высокочастотных и импульсных схемах.

От выпрямительных диодов они отличаются малыми емкостями p - n -перехода (доли пикофарад) и рядом параметров, определяющих переходные характеристики диода. Уменьшение емкостей достигается за счет уменьшения площади p - n -перехода (см. рисунок 4.16), поэтому допустимые мощности рассеяния у них невелики (30–40 мВт). Условия работы импульсных диодов обычно соответствуют высокому уровню инжекции.

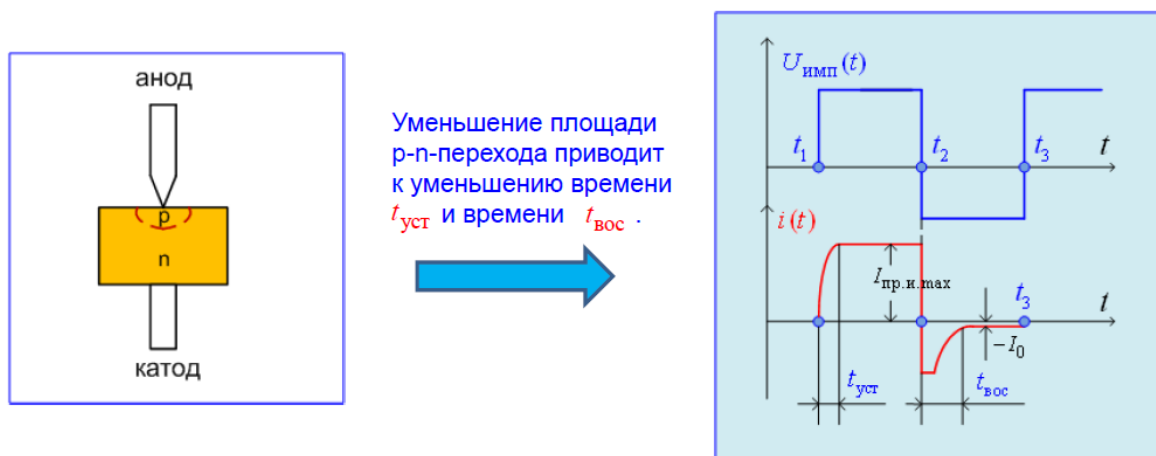


Рисунок 4.16 — Процессы в импульсных диодах

При $U_{вх} > 0$ диод открывает и через него протекает прямой ток (см. рисунок 4.17):

$$I_{пр} = \frac{U_m}{R_m},$$

где U_m — амплитуда входного напряжения.

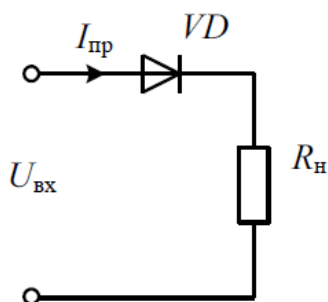


Рисунок 4.17 — Схема включения диода

После подачи запирающего напряжения диод остается в проводящем состоянии и через него протекает обратный ток, величина которого определяется внешней цепью:

$$I_{м\text{ обр}} = -\frac{U_m}{R_н}.$$

Через короткое время (время рассасывания t_{pac}) переход начинает запирается и в течение времени спада t_{cn} обратный ток экспоненциально спадает до установившегося значения $I_{обр\ уст}$.

Таким образом, при изменении полярности входного напряжения на противоположную ($U_{вх} < 0$), обратную для диода, последний запирается, но не мгновенно, а в течение некоторого времени — времени восстановления $t_{вос} = t_{pac} + t_{cn}$ (см. рисунок 4.18).

Переходный процесс, в течение которого обратное сопротивление полупроводникового диода $R_{обр}$ восстанавливается до постоянного значения после быстрого переключения с прямого направления на обратное, называют временем восстановлением $t_{вос}$ обратного сопротивления диода.

Главная причина возникновения обратного импульса — разряд диффузионной емкости. Накопленный заряд мгновенно исчезнуть не может, на это требуется время — время на рассасывание зарядов, образованных подвижными носителями. Это время называется t_{pac} — время рассасывания.

Работу импульсных диодов характеризуют также:

- $U_{пр\ и}$ — импульсное прямое напряжение;
- $I_{пр\ и}$ — импульсный прямой ток.

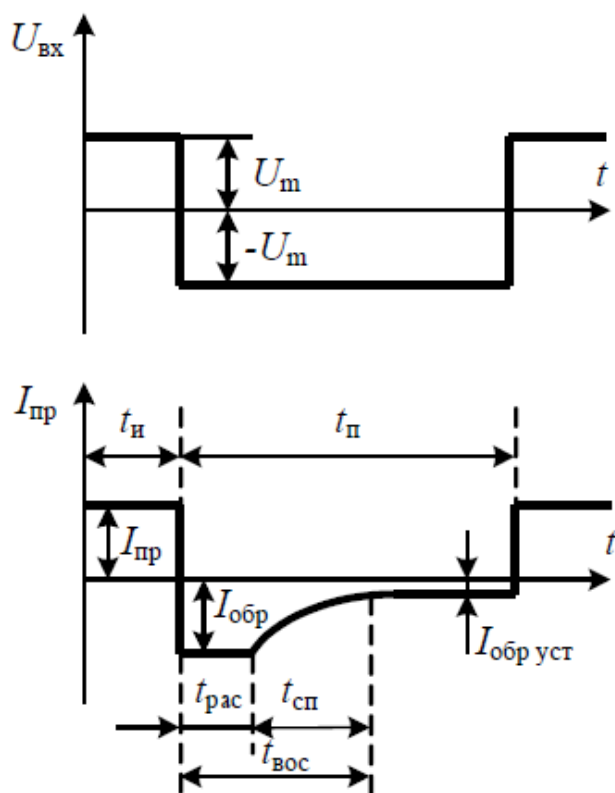


Рисунок 4.18 — Временная диаграмма

Следовательно, одним из основных параметров импульсного диода является время восстановления $t_{вос}$ обратного сопротивления, равное интервалу времени от момента прохождения тока через нуль после переключения диода с заданного прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного низкого значения.

Время восстановления определяет максимальную рабочую частоту диода. По значению этого параметра все импульсные диоды подразделяют на шесть групп, характеризующихся временем восстановления более 500 нс, 150–500, 30–150, 5–30, 1–5 и менее 1 нс.

Основные параметры импульсных диодов

1) Общая емкость диода C_d (от долей до нескольких пикофарад).

2) Максимальное импульсное прямое напряжение $U_{пр и max}$.

3) Максимально допустимый импульсный ток $I_{пр и max}$.

4) Время установления прямого напряжения диода $t_{уст}$ — интервал времени от момента подачи импульса прямого тока на диод до достижения заданного значения прямого напряжения на нем — зависит от скорости движения внутрь базы инжектированных через переход неосновных носителей заряда, в результате которого наблюдается уменьшение ее сопротивления (доли наносекунд — доли микросекунд).

5) Время восстановления обратного сопротивления диода $t_{вос}$ — интервал времени, прошедший с момента прохождения тока через нуль (после изменения полярности приложенного напряжения) до момента, когда обратный ток достигнет заданного малого значения (порядка $0,1I$, где I — ток при прямом напряжении); $t_{вос}$ — доли наносекунд–доли микросекунд.

Наличие времени восстановления обусловлено зарядом, накопленным в базе диода при инжекции. Для запираания диода этот заряд должен быть «ликвидирован». Это происходит за счет рекомбинации и обратного перехода неосновных носителей заряда в эмиттер [3].

Производство современных импульсных диодов основано на методах формирования p - n -переходов с использованием планарной технологии, эпитаксиального наращивания, а также ионно-лучевой технологии. Основным исходным полупроводниковым материалом при этом служит кремний, а иногда и арсенид галлия. Для ускорения переходных процессов и уменьшения времени восстановления обратного сопротивления кремниевых импульсных диодов применяют легирование кремния золотом. Планарная технология дает возможность сформировать на одном кристалле много диодных структур. Таким образом делают наборы (сборки) импульсных диодов, то есть совокупность импульсных диодов, собранных в единую конструкцию, не соединенных электрически или соединенных по одноименным выводам.

4.4 Стабилитроны и стабисторы

Полупроводниковый стабилитрон — это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока и который используется для стабилизации напряжения.

В полупроводниковых стабилитронах используется свойство незначительного изменения обратного напряжения на p - n переходе при электрическом (лавинном или туннельном) пробое. Это связано с тем, что небольшое увеличение напряжения на p - n переходе в режиме электрического

пробоя вызывает более интенсивную генерацию носителей заряда и значительное увеличение обратного тока [1, 2].

Низковольтные стабилитроны изготавливают на основе сильнолегированного (низкоомного) материала. В этом случае образуется узкий плоскостный переход, в котором при сравнительно низких обратных напряжениях (менее 6 В) возникает туннельный электрический пробой. Высоковольтные стабилитроны изготавливают на основе слаболегированного (высокоомного) материала. Поэтому их принцип действия связан с лавинным электрическим пробоем.

Основные параметры стабилитронов:

- напряжение стабилизации $U_{ст}$ — значение напряжения на стабилитроне при прохождении заданного тока стабилизации ($U_{ст} = 1\text{--}1000\text{ В}$);
- $\Delta U_{ст}$ — изменение напряжения стабилизации;
- минимальный $I_{ст\ min}$ и максимальный $I_{ст\ max}$ токи стабилизации ($I_{ст\ min} = 1,0\text{--}10\text{ мА}$, $I_{ст\ max} = 0,05\text{--}2,0\text{ А}$);
- $I_{ном\ ст}$ — номинальный ток стабилизации, определяемый в соответствии с выражением $I_{ст\ ном} = (I_{ст\ max} + I_{ст\ min}) / 2$;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность P_{max} ;
- дифференциальное сопротивление на участке стабилизации $R_{д} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$, ($R_{д} = 0,5\text{--}200\text{ Ом}$);
- температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации $TKU = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta T U_{ст}} \cdot 100\text{ \%}$.

TKU стабилитрона показывает на сколько процентов изменится стабилизирующее напряжение при изменении температуры полупроводника на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($TKU = (-0,5\text{--}+0,2)\%/^{\circ}\text{C}$).

Стабилитроны используют для стабилизации напряжений источников питания, а также для фиксации уровней напряжений в различных схемах. Для стабилизации напряжения больше трех вольт используют обратную ветвь вольтамперной характеристики.

Вольтамперная характеристика (обратная ветвь) стабилитрона изображена на рисунке 4.19 [1, 2].

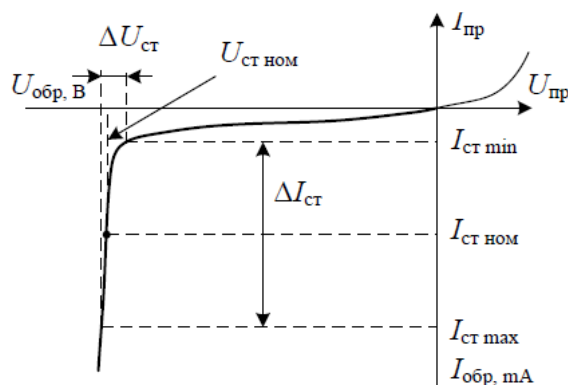


Рисунок 4.19 — Вольтамперная характеристика стабилитрона

Стабилитроны обеспечивают диапазон напряжений стабилизации от 3 до 200 В. Их прямое напряжение составляет $\approx 0,6$ В. Обратное сопротивление диода при малых обратных напряжениях ($U_{обр} < U_{ст}$) велико, а, следовательно, обратный ток имеет малое значение. При достижении напряжения стабилизации обратный ток резко возрастает. Эффект стабилизации основан на том, что большое изменение обратного тока вызывает малое изменение напряжения. Стабилизация тем лучше, чем круче идет кривая и соответственно чем меньше дифференциальное внутреннее сопротивление.

Стабилизацию низковольтного напряжения в пределах 0,3–1 В можно получить при использовании прямой ветви ВАХ кремниевых диодов. Диод, в котором для стабилизации напряжения используется прямая ветвь ВАХ, называют стабистором. Существуют также двухсторонние (симметричные) стабилитроны, имеющие симметричную ВАХ относительно начала координат. С их помощью можно стабилизировать переменное напряжение. Условное графическое обозначение стабилитронов показано на рисунке 4.20 [5].

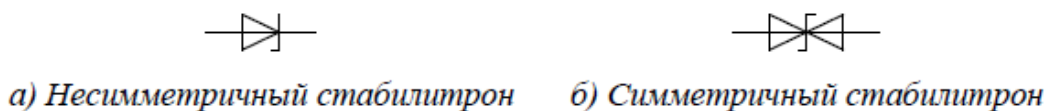


Рисунок 4.20 — Условное графическое обозначение стабилитронов

Стабилитроны допускают последовательное включение, при этом результирующее стабилизирующее напряжение равно сумме напряжений стабилизации стабилитронов: $U_{ст} = U_{ст1} + U_{ст2} + \dots$

Параллельное соединение стабилитронов недопустимо, т. к. из-за разброса характеристик и параметров из всех параллельно соединенных стабилитронов ток будет возникать только в одном, имеющем наименьшее стабилизирующее напряжение $U_{ст}$, что вызовет перегрев стабилитрона.

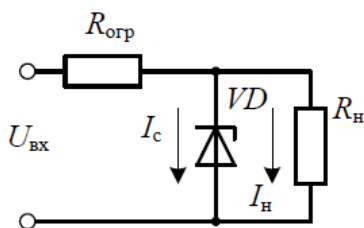


Рисунок 4.21 — Стабилизатор напряжения

При построении стабилизаторов напряжения стабилитрон включается в обратной полярности параллельно нагрузке, последовательно с ним включается ограничительный резистор $R_{огр}$ (рисунок. 4.21) [1.2].

Уменьшение сопротивления $R_{огр}$ увеличивает напряжение на нагрузке, но ухудшает стабилизацию.

Параметры схемы выбирают так, чтобы при изменении нагрузки и напряжения источника питания выполнялись неравенства:

$$I_{\text{ст min}} \leq \frac{U_{\text{BX min}} - U_{\text{ст}}}{R_{\text{огр}}} - I_{\text{н max}}; \quad I_{\text{ст max}} \geq \frac{U_{\text{BX max}} - U_{\text{ст}}}{R_{\text{огр}}} - I_{\text{н min}}.$$

4.5 Туннельные и обращенные диоды

Туннельный диод — это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольтамперной характеристике при прямом напряжении участка отрицательного дифференциального сопротивления (рисунок 4.22) [3].

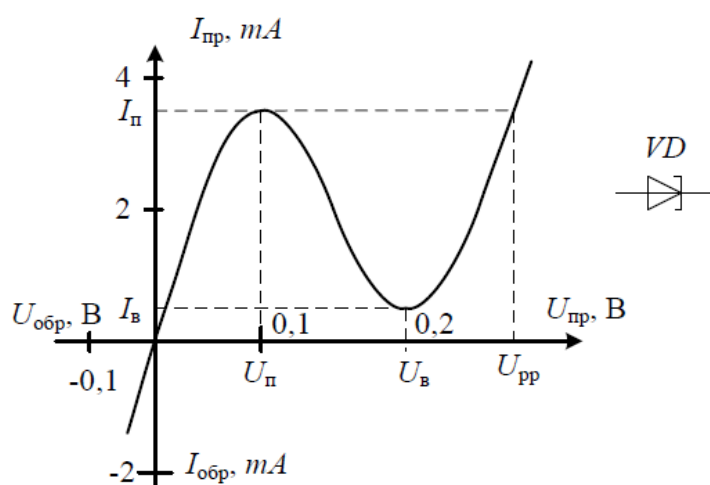


Рисунок 4.22 — Вольтамперная характеристика и УГО туннельного диода

Туннельный эффект заключается в переходе через потенциальный барьер электронов с уровнем энергии меньше высоты потенциального барьера, при этом электроны своей энергии не теряют.

Туннельный эффект был открыт в 1920-х годах Олегом Лосевым. Дальнейшее развитие получил в 1958 в работах Лео Эсаки [8].

В зависимости от назначения туннельные диоды разделяют на:

- усилительные;
- генераторные;
- переключательные [6].

Туннельный диод изготавливается из германия или арсенида галлия с очень большой концентрацией примесей, т. е. с очень малым удельным сопротивлением. Такие полупроводники с малым сопротивлением называют вырожденными. Это позволяет получить очень узкий p - n переход. В таких переходах возникают условия для относительно свободного туннельного прохождения электронов через потенциальный барьер (туннельный эффект). Туннельный эффект состоит в том, что при достаточно малой высо-

те потенциального барьера возможно проникновение электронов через барьер без изменения их энергии.

Основные параметры туннельных диодов:

- пиковый ток I_n — прямой ток в точке максимума ВАХ;
- ток впадины I_g — прямой ток в точке минимума ВАХ;
- отношение токов туннельного диода I_n / I_g ;
- напряжение пика U_n — прямое напряжение, соответствующее пиковому току;
- напряжение впадины U_g — прямое напряжение, соответствующее току впадины;
- напряжение раствора U_{pp} .

Туннельные диоды обладают малой емкостью перехода (доли—единицы пФ) и используются для генерации и усиления электромагнитных колебаний, а также в быстродействующих переключающих и импульсных схемах на частотах 1–100 ГГц.

Обращенный диод — диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

Принцип действия обращенного диода основан на использовании туннельного эффекта. Но в обращенных диодах концентрацию примесей делают меньше, чем в обычных туннельных. Поэтому контактная разность потенциалов у обращенных диодов меньше, а толщина p - n перехода больше. Это приводит к тому, что под действием прямого напряжения прямой туннельный ток не создается. Прямой ток в обращенных диодах создается инжекцией неосновных носителей зарядов через p - n переход, т.е. прямой ток является диффузионным. При обратном напряжении через переход протекает значительный туннельный ток, создаваемый перемещением электронов сквозь потенциальный барьер из p -области в n -область. Рабочим участком ВАХ (рисунок 4.23) обращенного диода является обратная ветвь.

Таким образом, обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) — прямому включению [6].

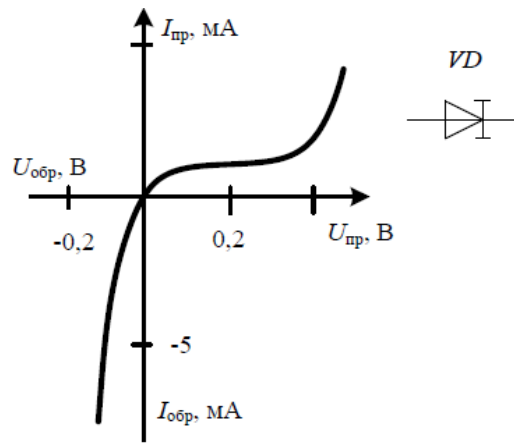


Рисунок 4.23 — Вольтамперная характеристика обращенного диода

Обращенные диоды применяют в импульсных устройствах, а также в качестве преобразователей сигналов (смесителей и детекторов) в радиотехнических устройствах.

4.6 Варикапы

Варикап — это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости от величины обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью [2, 3].

Вольтфарадная характеристика варикапа приведена на рисунке 4.24.

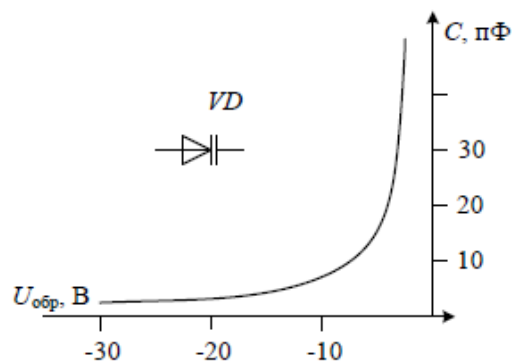


Рисунок 4.24 — Вольтфарадная характеристика и УГО варикапа

Основные параметры варикапов:

- номинальная емкость C_e — емкость при заданном обратном напряжении ($C_e = 10\text{--}500$ пФ);
- коэффициент перекрытия по емкости $K_c = \frac{C_{max}}{C_{min}}$, ($K_c=5\text{--}20$);
- отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений.

Варикапы широко применяются в различных схемах для автоматической подстройки частоты, в параметрических усилителях.

Варикап представляет собой электрически управляемую емкость.

Варикапы изготавливают на основе кремния и арсенида галлия. Емкость варикапов меняется в широких пределах, а ее зависимость от обратного напряжения различна для варикапов, изготовленных методом диффузии или методом сплавления примесей [6].

Варикап со структурой p^+-n-n^+ — это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость барьерной ёмкости $p-n$ -перехода от обратного напряжения. Такая структура позволяет получить более резкую зависимость ёмкости от обратного напряжения по сравнению с некоторыми другими типами варикапов.

Составная $n-n^+$ -база. Обеспечивает глубокое проникновение электрического поля p^+-n -перехода в базу, резкое изменение толщины перехода при обратном напряжении, высокое значение пробивного напряжения (из-за увеличения толщины перехода при возрастании обратного напряжения) и добротности варикапа. Наличие n -области базы с высокой концентрацией примесей снижает сопротивление структуры.

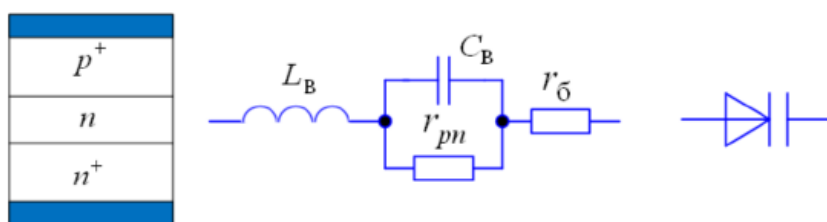


Рисунок 4.25— Варикап со структурой p^+-n-n^+ , эквивалентная схема и УГО

Практическое применение

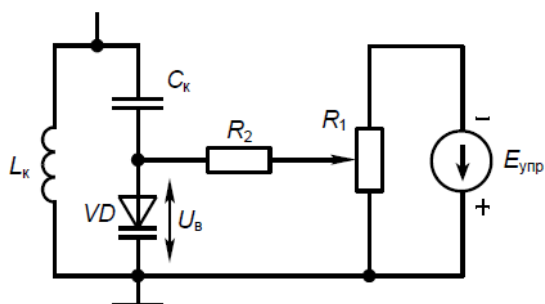


Рисунок 4.26 — Резонансный колебательный контур

Резонансный (параллельный) колебательный контур перестраивается при изменении напряжения на варикапе $U_в$.

Резистор R_2 выбирается достаточно большим, чтобы цепь управления не оказывала влияние на добротность контура.

4.7 Диоды Шоттки

Диоды с барьером Шоттки построены на переходе металл–полупроводник (см. рисунок 4.27) [8].

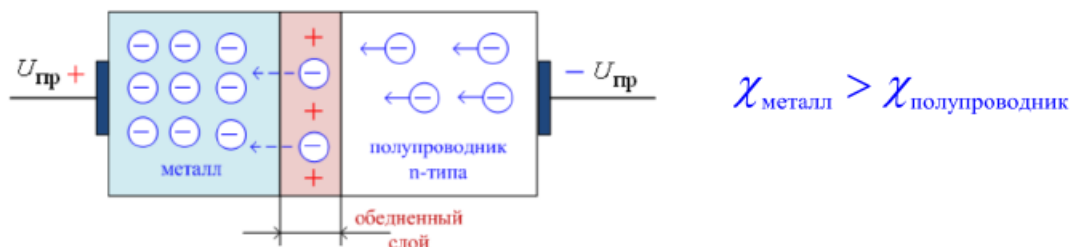


Рисунок 4.27 — Переход металл–полупроводник

Если работа выхода из металла больше, чем из полупроводника, то при образовании контакта металл-полупроводник *n*-типа свободные электроны из полупроводника начнут под действием больших сил притяжения переходить в металл, заряжая его отрицательно. В полупроводнике около контакта создается слой, обедненный основными носителями заряда и имеющий в результате этого большое удельное сопротивление. В этом слое выступят нескомпенсированные положительные заряды ионов доноров. Между отрицательным зарядом металла и положительным зарядом доноров на границе создается внутреннее поле и образуется потенциальный барьер (барьер *Schottki*). Этот барьер препятствует дальнейшему переходу электронов из полупроводника *n*-типа в металл.



Рисунок 4.28 — Классификация диодов Шоттки

Характерной особенностью диодов Шоттки является отсутствие инжекции, а следовательно, накопления и относительно медленного рассасывания неосновных носителей заряда в базе [5].

Классификация диодов Шоттки представлена на рисунке 4.28.

На основе выпрямляющего перехода Шоттки могут быть созданы выпрямительные, импульсные и сверхвысокочастотные полупроводниковые диоды, которые обладают лучшими частотными свойствами, чем диоды на основе p - n -переходов.

По сравнению с диодами на основе p - n -переходов диоды Шоттки, помимо лучших частотных свойств, имеют ряд дополнительных преимуществ:

- меньшее прямое напряжение из-за меньшей высоты потенциального барьера для основных носителей заряда полупроводника;
- большая максимально допустимая плотность прямого тока и способность выдерживать большие перегрузки по току из-за меньшего прямого напряжения и хорошего теплоотвода от выпрямляющего перехода Шоттки.

Диоды Шоттки имеют малое падение напряжения, практическое отсутствие заряда восстановления и ток через переход обусловлен одним типом носителей, поэтому это быстродействующие приборы (до 20 ГГц).

Прямая ветвь ВАХ диодов Шоттки представляет собой идеальную экспоненту (см. рисунок 4.29), поэтому их используют в качестве логарифмирующих диодов [6].

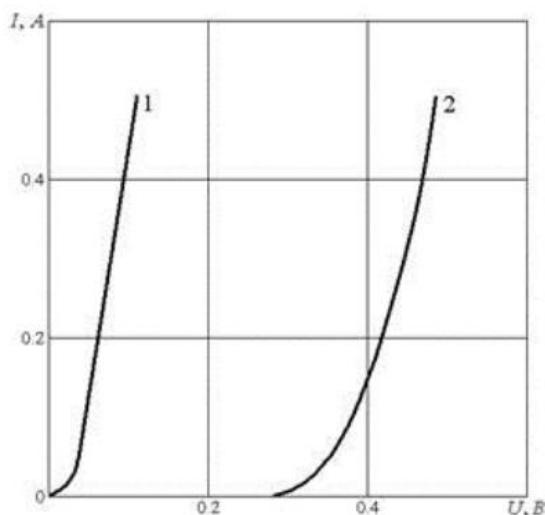


Рисунок 4.29 — ВАХ диода Шоттки (1), ВАХ p - n -перехода (2)

Диоды Шоттки применяют в выпрямителях больших токов (десятки—сотни А) при частотах выпрямления до 300 МГц. Диоды имеют малое прямое напряжение $\approx 0,25$ – $0,5$ В.

Недостатки:

- сравнительно небольшое обратное напряжение ($U_{обр} < 250 \text{ В}$);
- большие обратные токи.

Используются также для создания высокоскоростных логических элементов и в импульсных источниках питания.

4.8 Тиристоры

Тиристором называется полупроводниковый прибор многослойной структуры с тремя и более р-п переходами, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Может переключаться из закрытого состояния в открытое или наоборот.

Важнейшее свойство тиристоров — два устойчивых состояния его работы. Первое состояние характеризуется малым прямым током, протекающим через структуру, и большим падением напряжения на ней. Второе состояние соответствует большому прямому току и малому падению напряжения между выходными электродами [2, 3].

По устройству и принципу действия тиристоры подразделяются на:

- диодные тиристоры (динисторы);
- триодные тиристоры (тринисторы);
- симметричные тиристоры (симисторы).

Максимально допустимые токи в открытом состоянии для различных тиристоров имеют значения от 40 мА до 1000 А. При этом напряжение в открытом состоянии обычно не превосходит 2 В.

Общим признаком для всех тиристоров является нелинейная вольт-амперная характеристика с участком отрицательного сопротивления, что обуславливает регенеративный процесс в приборе при переходе его из закрытого в открытое состояние. Предпочтительным материалом для изготовления тиристоров считается кремний.

Диодные тиристоры (динисторы)

Структура диодного тиристора и его условное обозначение показаны на рисунке 4.30. Диодный тиристор — это тиристор, имеющий два вывода, через которые проходит как основной ток, так и ток управления.

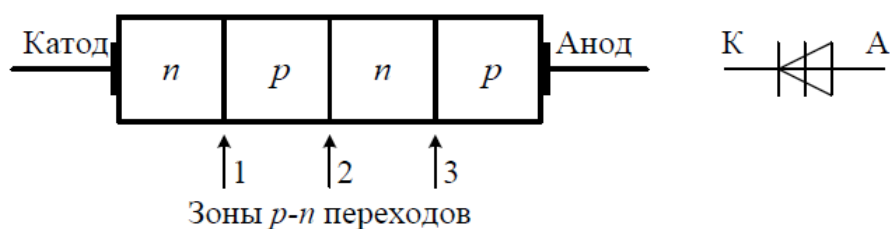


Рисунок 4.30 — Диодный тиристор

Структура диодного тиристора состоит из четырех областей полупроводника с чередующимся типом электропроводности. Кроме трех выпрямляющих p - n переходов диодный тиристор имеет два омических перехода. Один из омических переходов расположен между крайней n -областью и металлическим электродом, который называют катодом. Другой омический переход расположен между крайней p -областью и металлическим электродом, который называют анодом.

В таком приборе существуют две эмиттерные области — крайние (n - и p -эмиттеры) и две базовые области, примыкающие к среднему переходу (p - и n -базы).

Структуру тиристора можно представить в виде схемы замещения (рисунок 4.31), состоящей из транзисторов $VT1$ и $VT2$ типа n - p - n и p - n - p .

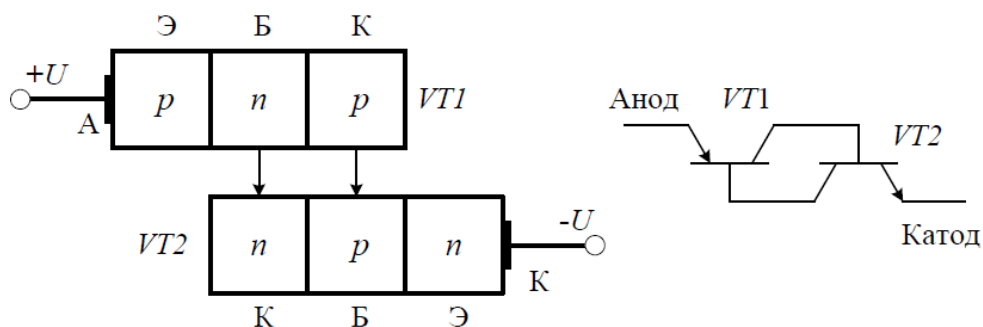


Рисунок 4.31 — Схема замещения диодного тиристора

На рисунке 4.32 изображена вольтамперная характеристика динистора. Характеристика динистора содержит основные характерные участки.

Участок 1–2. Напряжение на аноде положительно, ток незначителен, то есть тиристор закрыт. Этот участок тиристора аналогичен обратной ветви ВАХ p - n перехода.

Участок 2–3. Это участок характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением тиристора. Координаты точек 2 и 3 определяют параметры тиристора:

$U_{вкл}$ — напряжение включения;

$I_{вкл}$ — ток включения;

$I_{уд}$ ($I_{выкл}$) — ток удержания (ток выключения);

$U_{уд}$ ($U_{выкл}$) — напряжение удержания (напряжение выключения).

Удерживающий ток тиристора — это минимальный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии.

Участок 3-4. На этом участке тиристор открыт, и ток через него ограничен сопротивлением внешней цепи. Участок соответствует режиму прямой проводимости.

Участок 1-5. На этом участке напряжение на аноде отрицательно. Ток мал. Тиристор закрыт. Участок соответствует режиму обратного запираения.

Участок 5-6. На этом участке наблюдается резкое увеличение тока тиристора при увеличении отрицательного напряжения на аноде, соответствует режиму обратного пробоя.

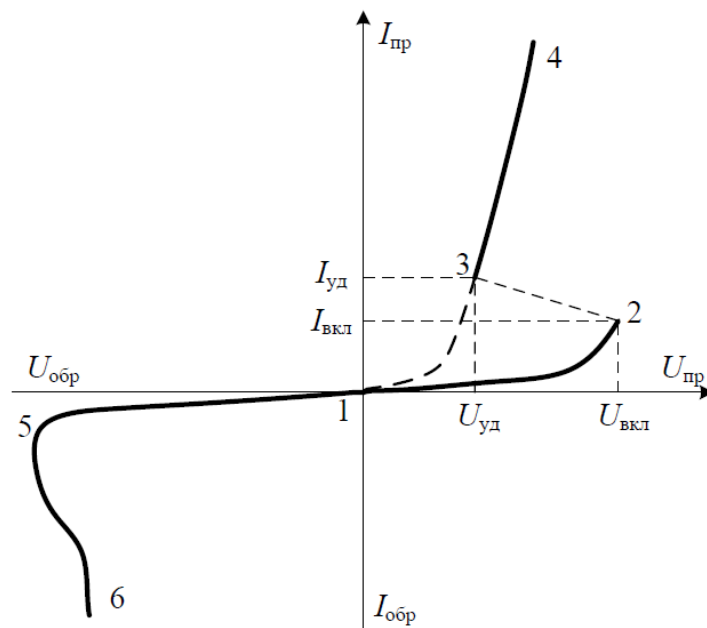


Рисунок 4.32 — Вольтамперная характеристика динистора

Для включения динистора необходимо увеличивать напряжение на нем до величины $U = U_{вкл}$. С ростом напряжения один из транзисторов будет переходить в режим насыщения. Коллекторный ток этого транзистора, протекая в цепи базы второго транзистора, откроет его, а последний в свою очередь увеличит ток базы первого. В результате коллекторные токи транзисторов будут лавинообразно нарастать, пока оба транзистора не перейдут в режим насыщения. После включения транзисторов динистор открывается, и ток будет ограничен только сопротивлением внешней цепи.

Для выключения тиристора при его использовании в качестве токового ключа необходимо каким-либо способом уменьшить ток через тиристор до значения, меньшего тока удержания, или поменять полярность напряжения на аноде [2, 3].

Триодные тиристоры (тринисторы)

Триодный тиристор — это тиристор, имеющий два основных и один управляющий вывод.

Управляющий вывод, называемый управляющим электродом (УЭ), соединен с базой одного из эквивалентных транзисторов. Если подать на управляющий электрод ток управления, то соответствующий транзистор открывается, что приводит к резкому возрастанию тока коллектора, который в свою очередь открывает второй транзистор. Таким образом, происходит включение тиристора.

В зависимости от расположения управляющего электрода тиристоры делятся на тиристоры с катодным управлением и тиристоры с анодным управлением. Структура тиристоров и их условное обозначение приведены на рисунке 4.33.

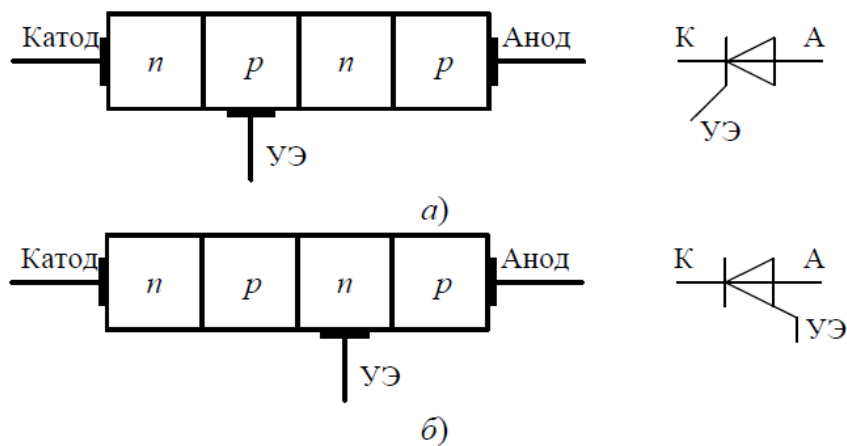


Рисунок 4.33 — Структура триодных тиристоров:

а) с катодным управлением и его УГО;

б) с анодным управлением и его УГО

Вольтамперная характеристика тиристора приведена на рисунке 4.34. Она отличается от характеристики динистора тем, что напряжение включения регулируется изменением тока в цепи управляющего электрода. При увеличении тока управления снижается напряжение включения. Поэтому триодный тиристор можно включить, т.е. переключить из закрытого состояния в открытое в необходимый момент времени даже при небольшом анодном напряжении.

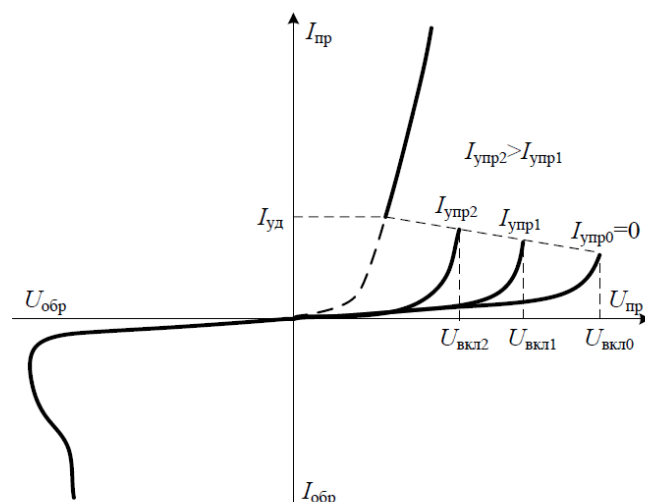
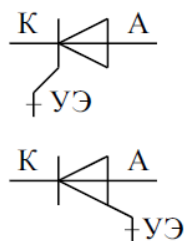


Рисунок 4.34 — Вольтамперная характеристика тиристора

После включения тиристора управляющий электрод теряет управляющие свойства, и, следовательно, с него можно снять напряжение управления. Таким образом, для включения тиристора на управляющий электрод достаточно подать один короткий импульс, обеспечивающий заданный ток управления.

Выключить тиристор с помощью управляющего электрода нельзя. Для выключения тиристора используются такие же способы, как и для диода.



Однако существуют тиристоры, которые могут быть выключены по управляющему электроду импульсом тока обратного знака. Такие тиристоры называют запираемыми по управляющему электроду (см. рисунок 4.35).

Рисунок 4.35 — УГО запираемых тиристоров

Симметричные тиристоры (симисторы)

Симисторы предназначены для коммутации в цепях переменного тока.

Симметричный диодный тиристор (диак) — это диодный тиристор, способный переключаться как в прямом, так и в обратном направлениях.

Симметричный триодный тиристор (триак) — это триодный тиристор, который при подаче сигнала на его управляющий электрод включается как в прямом, так и в обратном направлениях.

Структура симметричного диодного тиристора состоит из пяти областей с чередующимся типом электропроводности, которые образуют четыре p - n перехода (рисунок 4.36). Крайние переходы зашунтированы объемными сопротивлениями прилегающих областей с электропроводностью p -типа.

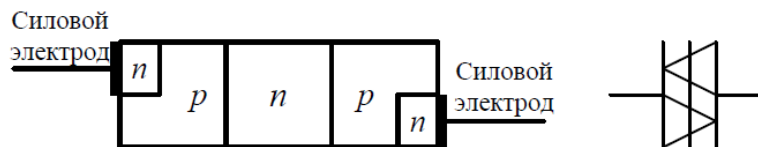


Рисунок 4.36 — Структура симметричного диодного тиристора

Таким образом, симметричный диодный тиристор можно представить в виде двух диодных тириستоров, включенных встречно и шунтирующих друг друга при разных полярностях приложенного напряжения. Вольтамперная характеристика такого тиристора получается одинаковой при разных полярностях приложенного напряжения (рисунок 4.37).

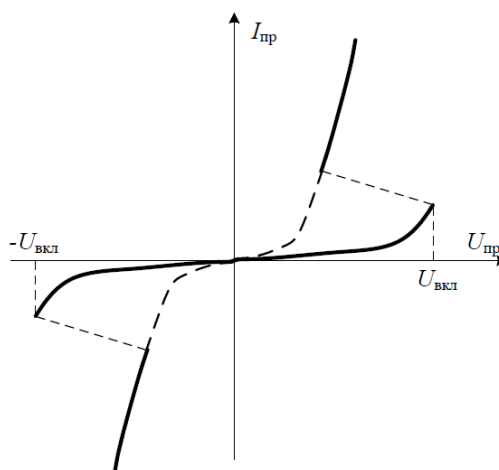


Рисунок 4.37 — ВАХ симметричного диодного тиристора

Симисторы способны переключаться из закрытого в открытое состояние при протекании тока через управляющий электрод, точно также, как в триодном тиристоре. Отличие состоит в том, что в открытом симисторе ток может протекать как в прямом, так и в обратном направлении.

В структуру симметричного триодного тиристора добавлен управляющий электрод, соединенный с базой одного из эквивалентных транзисторов (рисунок 4.38).

Вольтамперная характеристика такого тиристора получается одинаковой при разных полярностях приложенного напряжения.

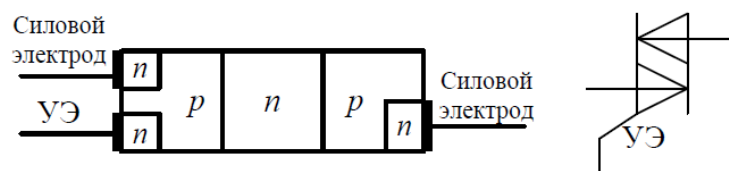


Рисунок 4.38 — Структура симметричного триодного тиристора

Тиристоры используются для коммутации больших токов. В устройствах связи и автоматики используются тиристоры, имеющие напряжение включения десятки и сотни вольт, остаточное напряжение на включенном приборе 1–2 В, постоянный анодный ток более 10 А при этом ток управления может составлять десятки микроампер.

Мощные высоковольтные тиристоры, используемые в энергетических установках, могут коммутировать токи до 1000 А при напряжениях до 100 кВ. Единственная область, в которой тиристоры продемонстрировали высокую конкурентоспособность — это мощные токовые ключи различного назначения, в качестве которых они сейчас успешно и широко используются.

Способы управления тиристорами

Включение тириستоров

- 1) Включение тиристора путем медленного увеличения напряжения между основными электродами до напряжения включения $U_{вкл.}$.
- 2) Включение тиристора с помощью тока управления.
- 3) Включение тиристора путем быстрого увеличения напряжения между основными электродами.
- 4) Включение тиристора путем освещения кристалла с тиристорной структурой (оптронные тиристоры).

Выключение тиристоров

- 1) Выключение тиристора путем уменьшения тока в цепи основных электродов до значения, меньшего удерживающего тока, или путем разрыва цепи основных электродов. Второй способ выключения применяется, когда время выключения тиристора не влияет на работу той или иной схемы.
- 2) Выключение тиристора путем изменения полярности анодного напряжения.
- 3) Выключение тиристора с помощью тока управляющего электрода (только для запираемых тиристоров).

При маркировке тиристоров второй знак — это буква «Н», обозначающая динисторы и неуправляемые тиристоры, например, КНП02, и буква «У», обозначающая тринисторы и управляемые тиристоры.

4.9 Оптоэлектронные компоненты

4.9.1 Общие сведения

Оптоэлектронные приборы (ОЭП) и устройства строятся на основе эффекта взаимодействия электромагнитных волн оптического диапазона частотой $3 \cdot 10^{11}$ – $3 \cdot 10^{17}$ Гц, (длина волны 1 мм– $1 \cdot 10^{-3}$ мкм) с электронами [3].

Длина волны излучения определяется соотношением $\lambda = C/f$, где C — скорость света в вакууме. $C = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Время возникновения идей оптоэлектроники — 50-е годы XX века. Как самостоятельный раздел науки и техники оптоэлектроника начала формироваться в 60-е годы. С 1970-х годов возникла интегральная оптика [8].

Большинство современных ОЭП и устройств работает в диапазоне волн 0,5–1,5 мкм. Электрическая нейтральность фотонов обеспечивает:

- невосприимчивость оптических каналов связи к воздействиям электромагнитных полей, т. е. обеспечивает высокую помехозащищенность;
- полную гальваническую развязку входных и выходных цепей;
- двойную (пространственную и временную) модуляцию потока оптического излучения.

Основными оптоэлектронными элементами являются:

а) источники когерентного (связанного, при сложении усиливающегося) излучения (полупроводниковые лазеры) и некогерентного излучения (излучающие диоды — инфракрасные, ультрафиолетовые и светодиоды);

б) приемники оптического излучения (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры);

в) различные оптические элементы (линзы, призмы, зеркала, поляризаторы, волоконно-оптические элементы).

Широкое применение находят в электронно-вычислительных средствах излучающие диоды, оптоэлектронные пары, оптоэлектронные переключатели, оптроны, различные классы индикаторов [2, 6].

4.9.2 Излучающие диоды

Излучающий диод — это диод, содержащий полупроводниковый p – n переход, в котором при прохождении электрического тока генерируется оптическое излучение в инфракрасной (ИК), видимой или ультрафиолетовой (УФ) области спектра [6, 8].

Распространены инфракрасные и излучающие в видимой части спектра диоды (светодиоды). Прохождение тока через p – n переход в прямом направлении в светодиодах сопровождается рекомбинацией инжектированных носителей заряда. В определенных материалах ($GaAs$, $GaSb$, $InAs$, $InSb$ и т. д.) процесс рекомбинации сопровождается выделением кванта света — фотона, при этом возникает некогерентное свечение люминесценции.

Цвет свечения зависит от материала примеси полупроводника:

- ZnO — красный цвет;
- N — зеленый;
- $(ZnO + N)$ — желтый, оранжевый.

Сочетание света синего, зелёного и красного светодиодов даёт белый свет с высокой энергетической эффективностью, что позволило в дальнейшем создать, среди прочего, светодиодные светильники и экраны со светодиодной подсветкой.

Характеристика яркости светодиода показана на рисунке 4.39, а.

Условное графическое обозначение светодиода показано на рисунке 4.39, б.

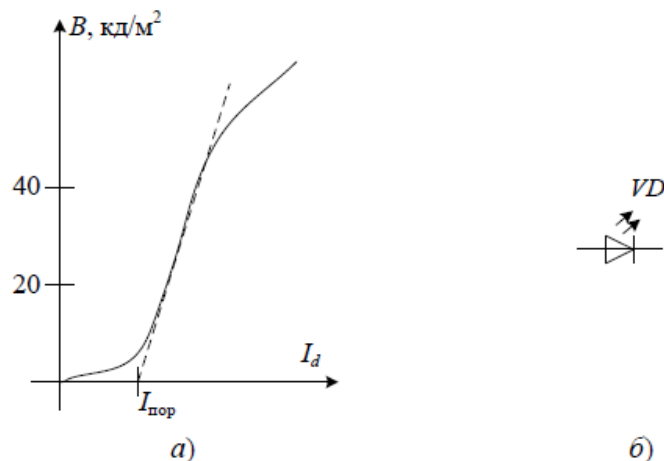


Рисунок 4.39 — Характеристика яркости и УГО светодиода

Характеристика яркости имеет нелинейный начальный участок, на котором яркость мала, и линейный участок, в пределах которого яркость изменяется в десятки раз. Именно этот участок чаще всего используется. На этом участке яркость свечения:

$$B = B_0(I_d - I_{\text{пор}}),$$

где B_0 — чувствительность по яркости;

I_d — ток светодиода;

$I_{пор}$ — пороговый ток — ток, при котором возможна линеаризация характеристики, $I_{пор} \approx (0,1-2,5)$ мА.

Материалы для светодиодов — арсенид галлия $GaAs$, фосфид галлия GaP и другие [6, 8].

Виды и характеристики светодиодов

Светоизлучающие диоды различают по конструкции корпуса (см. таблица 4.1).

Таблица 4.1 — Конструкции корпуса светоизлучающих диодов

Внешний вид	Характеристика
	<i>DIP</i> – маломощные индикаторные цилиндрические элементы. Используются для подсветок экранов, индикации, световых гирлянд.
	«Пиранья» — четырехконтактный <i>DIP</i> . Они крепче держатся на своем месте и меньше греются. Используются в автомобильной промышленности для подсветок.
	<i>SMD</i> — внешне выглядит, как параллелепипед. За счет своей надежности и универсальности востребованы во многих отраслях светотехнической промышленности.
	<i>PCB Star</i> светодиоды. Разновидность <i>SMD</i> .
	<i>COB</i> – плоский <i>SMD</i> .

Независимо от исполнения корпуса светодиода бывают:

- двухцветные. Они излучают одновременно два цвета. Обладают тремя контактами, один из которых общий;

- полноцветные *RGB* (красный-зеленый-синий). Изготавливаются из трех полупроводниковых кристаллов под общей линзой, обладают четырьмя электродами. По одному выводу для каждого полупроводникового элемента и один общий вывод. В *SMD* у прибора будет шесть выводов.

Пропорциональное смешение цветов дает всевозможные оттенки света. Например, при включении на 100 % красного и зеленого получится желтый.

Сверхмощные (сверхяркие) светодиоды — элементы мощностью выше 1 Вт с силой тока от 300 мА. (Мощность обычных светодиодов измеряется чаще всего в милливаттах). Такие устройства светят очень ярким светом. Используются в фонариках, фарах, прожекторах и т. п. [8].

Также светодиоды подразделяются на:

- индикаторные — маломощные;
- осветительные — приборы большой мощности;
- инфракрасные — излучают невидимый человеческому глазу инфракрасный спектр.

Инфракрасные диоды. Благодаря специально подобранным материалам проводников они испускают невидимые глазу инфракрасные лучи. Они безвредны для живых существ, но заметны для электронных систем регистрации. Востребованы во многих технических устройствах и станках во всевозможных отраслях промышленности.

Индикаторные светодиоды выступают в роли индикаторов для техники, подсветок дисплеев и т.п.

Независимо от вида светодиода характеризуются некоторыми параметрами.

Основные параметры светодиодов:

- 1) Сила света (яркость) – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении. Она пропорциональна силе тока, текущей сквозь элемент.

Единица измерения — Вт/ср (ватт/стерадиан) или мКд (милликанделла), яркость измеряется в Кд/м². Для светодиодов сила света составляет (0,1–10) мКд.

Среди светодиодов, которые светят белым светом, выделяют яркие (20–25 милликандел) и сверхяркие (свыше 20 тысяч милликандел).

- 2) Цвет свечения (длина волны излучения).

Цвет свечения обусловлен химическим составом полупроводников. Некоторые вещества и соответствующие им цвета обозначены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Цвет свечения светодиодов

Цвет	Длина волны (нм)	Прямое напряжение (В)	Полупроводниковый материал
Инфракрасный	$\lambda > 760$	$\Delta U < 1,9$	Арсенид галлия (GaAs) Алюминия галлия арсенид (AlGaAs).
Красный	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta U < 2,03$	Алюминия-галлия арсенид (AlGaAs) Галлия арсенид- фосфид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP).
Оранжевый	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta U < 2,10$	Галлия фосфид-арсенид (GaAsP). Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP). Галлия(III) фосфид (GaP).
Жёлтый	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta U < 2,18$	Галлия арсенид-фосфид (GaAsP). Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP). Галлия(III) фосфид (GaP)
Зелёный	$500 < \lambda < 570$	$1,9 < \Delta U < 4,0$	Индия-галлия нитрид (InGaN) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Алюминия-галлия фосфид (AlGaP)
Синий	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Селенид цинка (ZnSe) Индия-галлия нитрид (InGaN) Карбид кремния (SiC) в качестве подложки Кремний (Si) в качестве подложки — (в разработке)
Фиолетовый	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta U < 4,0$	Индия-галлия нитрид (InGaN)
Пурпурный	Смесь нескольких спектральных диапазонов	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Двойной: синий/красный диод, синий с красным люминофором, белый с пурпурным пластиком
Ультрафиолетовый	$\lambda < 400$	$3,1 < \Delta U < 4,4$	Алмаз (235 нм) Нитрид бора (215 нм) Нитрид алюминия (AlN) (210 нм)

Цвет	Длина волны (нм)	Прямое напряжение (В)	Полупроводниковый материал
			Нитрид алюминия-галлия (AlGaIn) — Нитрид алюминия-галлия-индия (AlGaInN) — (менее 210 нм)
Белый	Широкий спектральный диапазон	$\Delta U \approx 3,5$	Сочетание трех светодиодов основных цветов (красный, синий, зелёный), либо люминофор, излучающий белый цвет под воздействием светодиода со спектром от синего до ультрафиолетового.

3) Постоянное прямое напряжение — падение напряжения при заданном токе, равное (2–4) В. Превышение прямого напряжения приведет к перегоранию светодиода.

4) Сила тока. Светодиоды весьма чувствительны к силе тока. При превышении ее значения выше номинального светодиод может перегореть. Поэтому не рекомендуется превышать максимальный прямой ток элемента. Точные значения для конкретного светодиода приводятся в техническом описании.

5) Угол излучения — плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины ее максимального значения. Угол излучения определяется формой линзы, конструкцией кристалла и зависит от используемых для изготовления кристалла веществ. Может меняться от 15 до 180 градусов [6, 8].

По сравнению с другими электрическими источниками света светодиоды имеют следующие отличия:

- высокая световая отдача. Современные светодиоды сравнялись по этому параметру с натриевыми газоразрядными лампами и металлогалогенными лампами, достигнув 146 люмен на ватт;
- высокая механическая прочность, вибростойкость (отсутствие нити накала и иных чувствительных составляющих);
- длительный срок службы (при достаточном охлаждении) — от 30000 до 100000 часов (при работе 8 часов в день — 34 года). Но и он не бесконечен, т. к. при длительной работе происходит «деградация» кристалла из-за диффузии и миграции легирующих примесей и постепенное падение яркости;

- количество циклов включения-выключения не оказывают существенного влияния на срок службы светодиодов (в отличие от традиционных источников света — ламп накаливания, газоразрядных ламп).

- цветовая температура современных белых светодиодов может быть различной — от тёплого белого ~ 2700 К до холодного белого ~ 6500 К;

- спектральная чистота, достигаемая не фильтрами, а принципом действия прибора;

- отсутствие инерционности — включаются сразу на полную яркость, в то время как у ртутно-люминофорных (люминесцентных — экономичных) ламп время включения от 1 с до 1 мин, а яркость увеличивается от 30 до 100 % за 3–10 минут, в зависимости от температуры окружающей среды;

- различный угол излучения — от 15 до 180 угловых градусов;

- низкая стоимость индикаторных светодиодов;

- безопасность — не требуются высокие напряжения, при должном охлаждении низкая температура светодиода, обычно не превышающая 60°C ;

- нечувствительность к низким и очень низким температурам. Однако, высокие температуры противопоказаны светодиоду, как и любым полупроводниковым приборам;

- экологичность — отсутствие ртути, фосфора и ультрафиолетового излучения в отличие от люминесцентных ламп [6, 8].

4.9.3 Фотодиоды

Фотодиод (ФД) — полупроводниковый диод, обладающий свойством односторонней проводимости, возникающей при воздействии на него оптического излучения. ФД используется для преобразования оптического сигнала в электрический. Наиболее распространены $p-i-n$ диоды, в которых толщина высокоомной i -области выбирается так, чтобы обеспечить наилучшие свойства (чувствительность и быстродействие) прибора (рисунок 4.40). $P-i-n$ структура образуется, если области p и n разделены высокоомным слоем с собственной (i) проводимостью для снижения напряженности поля в переходе [6, 8].

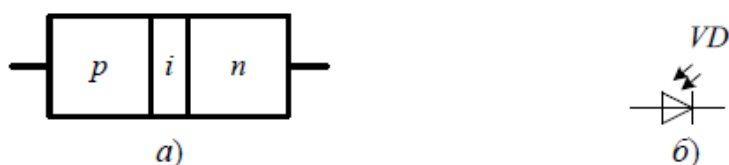


Рисунок 4.40— Структура и УГО фотодиода

Действие фотодиода основано на поглощении света вблизи области p - n перехода, в результате чего генерируются новые носители заряда (электронно-дырочные пары).

Различают два режима работы ФД:

а) фотодиодный, когда имеется источник питания, создающий обратное смещение;

б) вентильный (фотогенераторный), когда такой источник отсутствует.

В фотодиодном режиме возникающие в результате фотогенерации носители зарядов приводят к возрастанию обратного тока, который зависит от интенсивности падающего излучения и практически не зависит от величины обратного напряжения (рисунок 4.41).

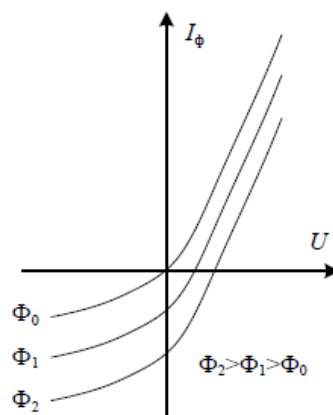


Рисунок 4.41 — Вольтамперная характеристика ФД в фотодиодном режиме

В вентильном (фотогенераторном) режиме ФД используется как фотогенератор (источник фотоЭДС, фотоэлемент). ФотоЭДС зависит от светового потока и свойств полупроводника.

Основные характеристики и параметры фотодиода

1) Энергетические характеристики $I_\phi = f(\Phi)$ — зависимости фототока от светового потока. При работе в генераторном режиме $I_\phi = f(\Phi)$, если $R_n=0$. С ростом R_n характеристики искривляются.

2) Спектральные характеристики фотодиода отражают чувствительность ФД от частоты (длины волны) и зависят от материала, из которого они изготовлены.

Относительная чувствительность $S(\lambda)$ имеют чётко выраженный максимум, соответствующий определённой длине волны облучения для каждого материала (рисунок 4.42) [6, 8].

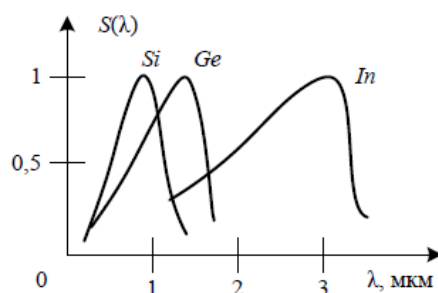


Рисунок 4.42 — Вид спектральных характеристик фотодиода

Спектральные характеристики фотодиода аналогичны характеристикам фоторезистора.

3) Граничная частота — частота, при которой интегральная чувствительность уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со статическим значением $f_{гр} \approx 10$ МГц.

Сейчас разработаны ФД на основе $p-i-n$ -структур, барьеров Шоттки, лавинные ФД, предназначенные в основном для повышения быстродействия и увеличения чувствительности [8].

4.9.4 Оптроны

Оптроны — это полупроводниковые приборы, состоящие из излучателя света и фотоприемника, взаимодействующих друг с другом и помещенных в общий корпус. Оптоны используют для оптической связи отдельных частей радиоэлектронных устройств. С помощью оптронов обеспечивается электрическая развязка между частями устройства (гальваническое разделение цепей) [6, 8].

В оптронах между источником излучения и фотоприемником имеется среда, выполняющая функции световода. Эта среда должна иметь большой коэффициент преломления для согласования с большим коэффициентом преломления материалов, служащих источниками света. Среда с большим коэффициентом преломления называется иммерсионными. Это свинцовые и селеновые стёкла с коэффициентами преломления соответственно 1,7–1,9 и 2,4–2,6.

Оптроны широко применяются в самых различных устройствах автоматики и электронной техники. Конструкции и параметры оптронов постоянно совершенствуются с целью уменьшения потребления энергии источниками излучения и расширения функциональных возможностей фотоприёмной части.

Примеры обозначений оптронов показаны на рисунке 4.43.

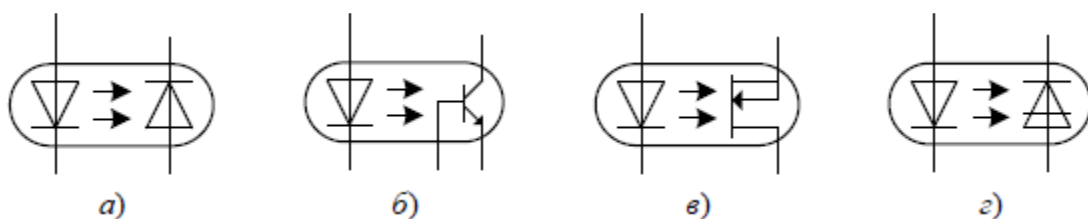


Рисунок 4.43 — УГО оптронов разных типов
а) диодный оптрон; б) транзисторный оптрон;
в) транзисторный МОП оптрон; г) тиристорный оптрон;

Сопротивление между входной и выходной цепями оптронов составляет (10^{13} – 10^{15}) Ом. Диодные, транзисторные и тиристорные оптроны используют в основном в ключевых режимах. Резисторный оптрон чаще всего применяют в усилительных устройствах.

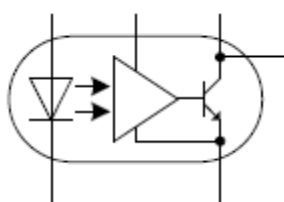


Рисунок 4.44 — Пример УГО оптрона с усилительным элементом на выходе

Сейчас разработаны оптроны, в которых совмещаются функции простейших оптронов и электронных преобразователей (усилителей), выполняемых на одной подложке. Условное графическое изображение такого оптрона показано на рисунке 4.44 [6].

Промышленностью серийно выпускаются оптоэлектронные коммутаторы сигналов, состоящие из арсенид-галлиевого излучателя, кремниевого фотодиода и интегрального усилителя, обеспечивающего выходные уровни напряжения, достаточные для управления логическими элементами ТТЛ-серий (серии К249ЛП1, К262КП1 и др.). Входной ток оптоэлектронных коммутаторов не превышает 20 мА, ёмкость между входом и выходом — не более 5 пФ.

4.10 Контрольные вопросы

- 1) Какие типы диодов Вы знаете? Приведите их условные обозначения.
- 2) Какие основные параметры выпрямительных диодов?
- 3) Как изменится положение вольтамперной характеристики диода при повышении температуры?
- 4) Какие виды пробоя p - n перехода существуют и в чем их отличие?
- 5). Каково соотношение между прямым R_{np} и обратным сопротивлением $R_{обр}$ полупроводникового диода?
- 6) С какой целью мощные диоды изготавливают в массивных металлических корпусах?

- 7) Какое преимущество германиевых выпрямительных диодов перед кремниевыми?
- 8) Какие существуют особенности диодов Шоттки?
- 9) Диоды Шоттки по сравнению с кремниевыми полупроводниковыми диодами на основе p - n -перехода характеризуются:
- а) более высоким быстродействием;
 - б) большими прямыми падениями напряжения;
 - в) более высокими пробивными напряжениями;
 - г) большими обратными токами.
- 10) Какое назначение фильтра, применяемого в выпрямителях?
- 11) Приведите основное отличие импульсных диодов.
- 12) Какие параметры используются для оценки инерционных свойств импульсных диодов?
- 13) Приведите основные специфические параметры импульсных диодов.
- 14) Из какого материала изготавливают стабилитроны?
- 15) Какая величина наименьшего напряжения стабилизации стабилитронов?
- 16) Какая величина максимального напряжения стабилизации стабилитронов?
- 17) В чем отличие стабилитрона от стабистора?
- 18) Что определяет отношение I_n / I_g туннельного диода?
- 19) Приведите основное отличие варикапа.
- 20) Какая максимальная рабочая температура для германиевых полупроводниковых приборов?
- 21) Какова величина сопротивления тиристора в закрытом состоянии?
- 22) В чем отличие работы тринистора от динистора?
- 23) На каком принципе работают оптоэлектронные приборы?
- 24) Чем определяется цвет свечения светодиодов?
- 25) Как получается белый цвет свечения у светодиодов?
- 26) Назовите основные параметры светодиодов.
- 27) Назовите достоинства светодиодов перед другими электрическими источниками света.
- 28) Какие режимы работы существуют у фотодиодов?
- 29) Чем определяется чувствительность фотодиода?
- 30) Какое основное назначение оптронов?

5 Моделирование в среде *SimInTech* силовой преобразовательной техники

Исследование однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя

Цель работы: приобретение навыков работы в среде динамического моделирования *SimInTech* на примере моделирования однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя и исследование его электромагнитных свойств и временных характеристик.

Краткие теоретические сведения

Однофазный однополупериодный неуправляемый выпрямитель является простейшей схемой выпрямителя и позволяет получить выпрямленные значения тока лишь в положительные полупериоды питающего напряжения.

Структурно его электрическая схема состоит из последовательно включенных в цепь источника напряжения, силового полупроводникового неуправляемого ключа — диода и нагрузки, которая может быть как активной (R -нагрузка), так и активно-индуктивной (R - L -нагрузка). Для протекания тока через диод потенциал его анода должен быть выше потенциала катода.

Для моделирования силовых полупроводниковых преобразователей в среде *SimInTech* существует библиотека блоков «ЭЦ-Динамика», размещенная на верхней панели библиотек. Также библиотеку можно вызвать в меню по нажатию кнопки «Библиотека блоков» на панели инструментов [9, 10].

Библиотека «ЭЦ-Динамика» применяется для решения задач, требующих моделирование электромагнитных процессов, длительность которых сопоставима с периодом питающей сети. При этом шаг интегрирования даже для сети промышленной частоты 50 Гц должен быть, как правило, не более 0,001 с.

При построении моделей с использованием элементов библиотеки «ЭЦ-Динамика» моделируются мгновенные значения токов и напряжений. При этом следует учитывать, что в свободно распространяемой версии *SimInTech* максимальное число блоков, используемых в модели, не должно превышать 250, включая линии связи и подсистемы [9, 10].

В данной работе предлагается исследовать электромагнитные свойства однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя, работающего на активную и активно-индуктивную нагрузки при питании от однофазной сети переменного тока.

Исходные данные для моделирования

Исходные данные для моделирования однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Исходные данные

Вариант	1	2	3	4	5
$\sim U_1$, В	230	230	230	230	230
$R_{\text{нагр}}$, Ом	5	30	25	20	15
$L_{\text{нагр}}$, Гн	0,02	0,04	0,06	0,05	0,02

Порядок настройки модели

1) На основе принципиальной схемы однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя из числа блоков библиотеки «ЭЦ-Динамика» SimInTech составить имитационную модель, изображенную на рисунке 5.1, при работе выпрямителя на активную нагрузку.

Модель состоит из последовательного включенных в цепь блоков библиотеки «ЭЦ-Динамика»:

- «Источник напряжения» (раздел «Источники»);
- «Полупроводниковый безынерционный элемент» (раздел «Силовая электроника»);
- «Амперметр идеальный» (раздел «Измерители»);
- «RLC-цепь» (раздел «Электротехнические элементы»).

Для измерения тока, протекающего через диод, и тока нагрузки последовательно в цепь включены блоки «Амперметр идеальный», а для измерения напряжения, протекающего через ключ, и напряжения нагрузки и источника, используется параллельно включенный блок «Вольтметр идеальный» (раздел «Измерители»). Сигналы с измерительных приборов подключаются к блоку «Временной график» из библиотеки «Вывод данных», выполняющего роль осциллографа.

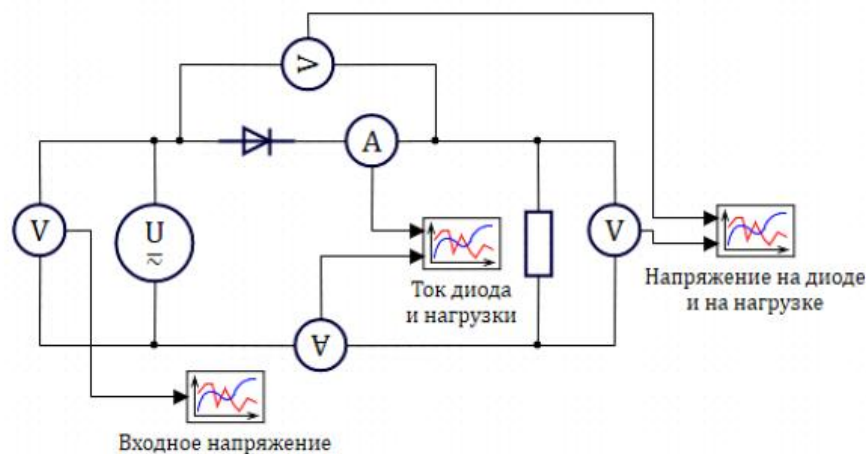


Рисунок 5.1 — Имитационная модель однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя

2) Задать значения параметров согласно исходным данным по варианту в блок «Источник напряжения»:

- «Амплитуда, В» установить в столбце «Значение» равным 230;
- «Постоянная составляющая, В» равной 0;
- «Частота, Гц» равной 50;
- «Фаза, эл. гр.» равной 0;
- «Активное сопротивление, Ом» равным 0,1 (рисунок 5.2).

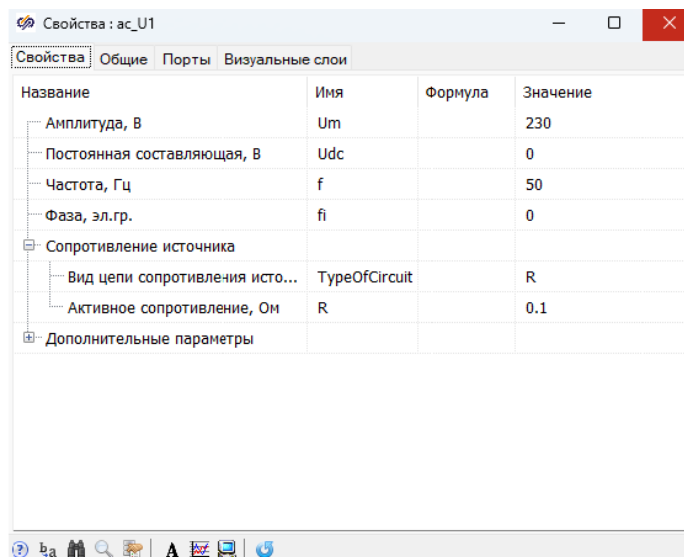


Рисунок 5.2 — Параметры настройки блока «Источник напряжения»

3) Задать значения согласно данным по варианту в блок «RLC-цепь»: в окне «Свойства» выбрать «Вид цепи» и в столбце «Значение» установить из раскрывающегося списка R, далее ввести «Сопротивление, Ом» по варианту (рисунок 5.3).

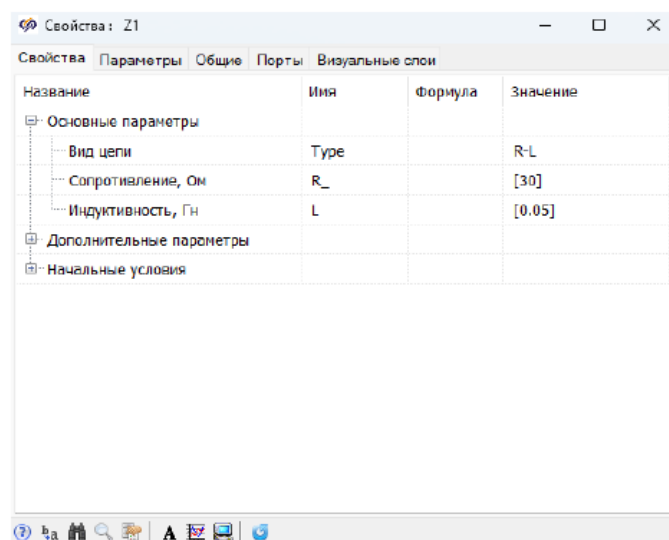


Рисунок 5.3 — Параметры настройки блока «RLC-цепь»

4) Дважды нажать блок «Полупроводниковый безынерционный элемент» и в раскрывшемся окне «Свойства» в строке «Вид ВАХ» в столбце «Значение» из раскрывающегося списка выбрать параметр «Диод». Также возможно изменить параметры сопротивления диода и сопротивления снаббера (рисунок 5.4).

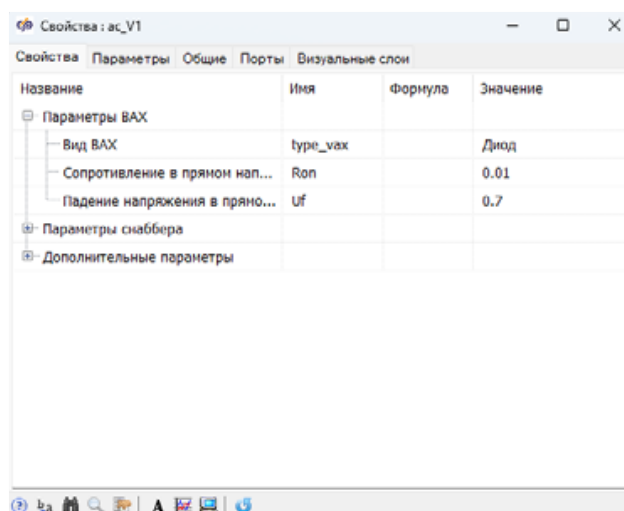


Рисунок 5.4 — Параметры настройки блока «Полупроводниковый безынерционный элемент»

5) Для того чтобы увеличить число входных портов блока «Временной график», необходимо нажать по нему правой кнопкой мыши и выбрать из списка раздел «Свойства объекта», где в графе «Количество входных портов» установить «Значение» равное 2.

6) Задать в окне «Параметры расчета» (значок на панели инструментов) минимальный и максимальный шаг моделирования 0,001, метод инте-

грирования Эйлера, конечное время расчета 0,1 с (время моделирования) и абсолютную ошибку 1E-6 (рисунок 5.5).

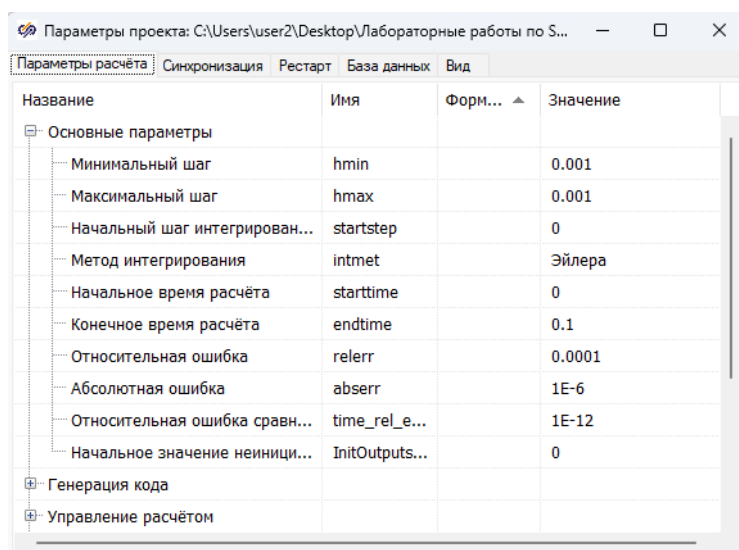


Рисунок 5.5 — Параметры настройки окна «Параметры расчета»

7) С моделировать графики временных диаграмм тока и напряжения выпрямителя при работе на активную нагрузку путем нажатия на кнопку «Пуск» (зеленая стрелка на панели инструментов или F9) и получить графики кривых тока $i_H = f(t)$ и напряжения $u_H = f(t)$ нагрузки, кривые напряжения сети $u_1 = f(t)$, напряжения $u_{VD} = f(t)$ и тока $i_{VD} = f(t)$ на диоде путем двойного нажатия левой кнопкой мыши по соответствующим блокам «Временной график» (рисунок 5.6).

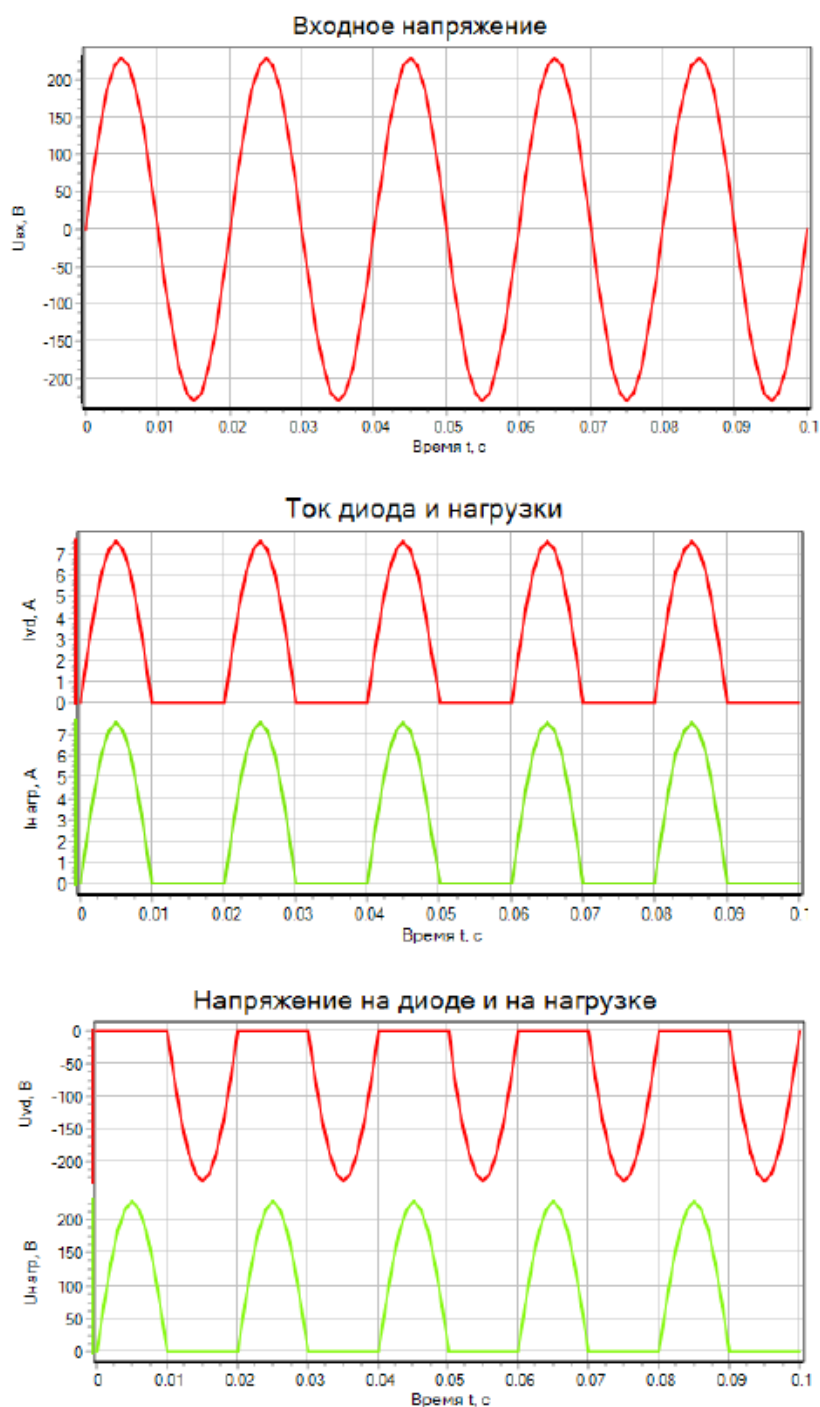


Рисунок 5.6 — Временные диаграммы работы однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя при работе на активную нагрузку

8) Далее смоделировать все полученные ранее характеристики при активно-индуктивной нагрузке, для этого в блоке «RLC-цепь»:

- в окне «Свойства» выбрать «Вид цепи»;
- в столбце «Значение» установить из раскрывающегося списка $R-L$, ввести «Индуктивность, Гн» согласно варианту из таблицы 5.1.

После чего повторить выполнение п. 7 и получить временные диаграммы работы выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку (рисунок 5.7).

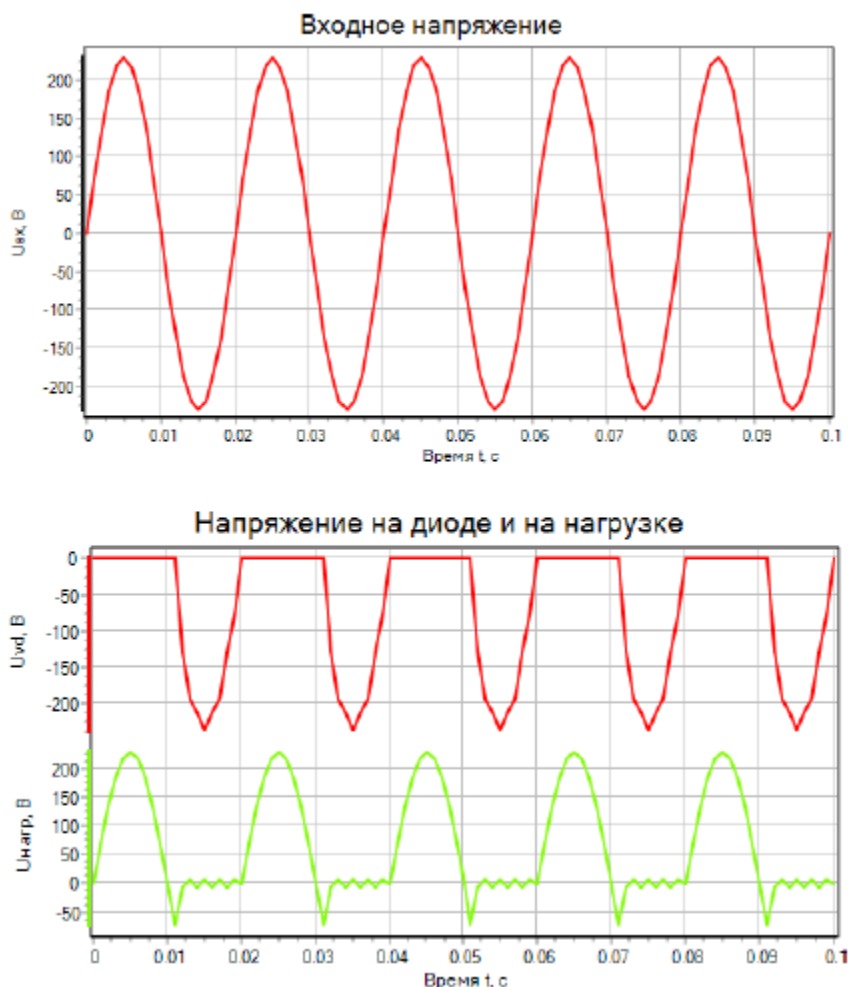


Рисунок 5.7 — Временные диаграммы работы однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя при работе на активно-индуктивную нагрузку

9) По результатам моделирования:

- сделать выводы о влиянии индуктивности L на форму кривых тока и напряжения нагрузки и диода;
- проанализировать форму тока на диоде, указав значения максимального, действующего и среднего значения тока при активной нагрузке, среднее значение — при активно-индуктивной нагрузке;
- проанализировать форму напряжения на диоде, указав значения напряжения на нем в открытом и закрытом состояниях.

Контрольные вопросы

1 Какие полупроводниковые приборы входят в состав однофазного однополупериодного выпрямителя?

- 2 Отличие управляемого выпрямителя от неуправляемого.
- 3 Какие условия необходимы для протекания тока через диод?
- 4 Недостатки однополупериодной схемы выпрямления.
- 5 Отличия в работе схемы на активную и активно-индуктивную нагрузки.
- 6 Влияние индуктивности на форму кривых тока нагрузки.
- 7 Как вычисляется значение средневывпрямленного тока выпрямителя?
- 8 Области применения однополупериодных схем выпрямления.

Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Исходные данные для моделирования по варианту из таблицы 4.1.
- 3 Скриншоты имитационной модели однофазного однополупериодного выпрямителя, собранной в среде *SimInTech* и скриншоты настроек блоков «Источник напряжения», «RLC-цепь» (отдельно при активной и активно-индуктивной нагрузке), «Полупроводниковый безынерционный элемент».
- 4 Временные диаграммы:
 - кривых тока $i_{НАГР} = f(t)$ и напряжения $u_{НАГР} = f(t)$ нагрузки,
 - кривые напряжения сети $u_{BX} = f(t)$, напряжения $u_{VD} = f(t)$ и тока $i_{VD} = f(t)$ на диоде для случаев работы выпрямителя на активную и активно-индуктивную нагрузку.
- 5 Выводы с анализом:
 - влияния индуктивности L на форму кривых тока и напряжения нагрузки и диода;
 - формы тока на диоде, с указанием значений максимального, действующего и среднего значений тока при активной нагрузке, среднего значения — при активно-индуктивной нагрузке;
 - формы напряжения на диоде, с указанием значения напряжения на нем в открытом и закрытом состояниях.

Рекомендуемая литература

Основная литература

1) Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина. — М.: Горячая линия — Телеком. 2002. — 768 с. ISBN 5-93517-002-7.

2) Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп.— Ростов-на-Дону: «Феникс». 2002. — 576 с.

3) Электроника и микропроцессорная техника: учебник/ В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. — 6-е изд., стер.— М.: КНОРУС. 2013.—800 с.— (Бакалавриат).

4) ГОСТ 2.728-74. Межгосударственный стандарт. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. Введен впервые с 01.07.1975 г. — Москва. Стандартинформ, 2010. — 13 с. — Текст непосредственный.

5) ГОСТ 2.730-73. Межгосударственный стандарт. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые. Введен впервые с 01.07.1974 г. — Москва. Стандартинформ, 2010. — 16 с. — Текст непосредственный.

Дополнительная литература

6) Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов — Москва: Альянс, 2013. — 496 с.

7) Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. — 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1989. — 352 с. ISBN 5-283-04448-3.

8) Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. — М.: Энергоатомиздат. 1985. — 744 с.

9) Преобразователи автономных источников электроэнергии (и их модели): SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Ю. Н. Калачев, А. Г. Александров. — М.: ДМК Пресс. 2021. —79 с.

10) Хабаров, С. П. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов / Хабаров С. П. Шилкина М. Л. ; Шилкина М. Л. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024 .— 120 с.

Приложение А

(обязательное)

Система обозначений полупроводниковых диодов

Система обозначений ПД установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.919-81, а силовых полупроводниковых приборов — ГОСТ 20859.1-89. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код [2].

Буквенно-цифровой код включает:

- первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал;
- второй (буква) — подкласс приборов;
- третий (цифра) — основные функциональные возможности прибора;
- четвертый — число, обозначающее порядковый номер разработки;
- пятый элемент — буква, условно определяющая классификацию (разбраковку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии.

Для обозначения исходного полупроводникового материала используются следующие символы:

- Г, или 1, — германий или его соединения;
- К, или 2, — кремний или его соединения;
- А, или 3, — соединения галлия;
- И, или 4, — соединения индия.

Для обозначения подклассов диодов используется одна из следующих букв:

- Д — диоды выпрямительные и импульсные;
- Ц — выпрямительные столбы и блоки;
- В — варикапы;
- И — туннельные диоды;
- А — сверхвысокочастотные диоды;
- С — стабилитроны;
- Г — генераторы шума;
- Л — излучающие оптоэлектронные приборы;
- О — оптопары.

Для обозначения наиболее характерных эксплуатационных признаков приборов (их функциональных возможностей) используются следующие цифры.

Диоды (подкласс Д):

- 1 — выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;
- 2 — выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока более 0,3 А, но не свыше 10 А;
- 4 — импульсные диоды с временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс;
- 5 — импульсные диоды с временем восстановления более 150 нс, но не свыше 500 нс;
- 6 — импульсные диоды с временем восстановления 30–150 нс;
- 7 — импульсные диоды с временем восстановления 5–30 нс;
- 8 — импульсные диоды с временем восстановления 1–5 нс;
- 9 — импульсные диоды с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс.

Выпрямительные столбы и блоки (подкласс Ц):

- 1 — столбы с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;
- 2 — столбы с постоянным или средним значением прямого тока 0,3–10 А;
- 3 — блоки с постоянным или средним значением тока не более 0,3 А;
- 4 — блоки с постоянным или средним значением прямого тока 0,3–10 А.

Варикапы (подкласс В):

- 1 — подстроечные варикапы;
- 2 — умножительные варикапы.

Туннельные диоды (подкласс И):

- 1 — усилительные туннельные диоды;
- 2 — генераторные туннельные диоды;
- 3 — переключательные туннельные диоды;
- 4 — обращенные диоды.

Сверхвысокочастотные диоды (подкласс А):

- 1 — смесительные диоды;
- 2 — детекторные диоды;
- 3 — усилительные диоды;
- 4 — параметрические диоды;
- 5 — переключательные и ограничительные диоды;
- 6 — умножительные и настроенные диоды;
- 7 — генераторные диоды;

- 8 — импульсные диоды.

Стабилитроны (подкласс С):

- 1 — стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 2 — стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации 10–100 В;
- 3 — стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;
- 4 — стабилитроны мощностью 0,3–5 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 5 — стабилитроны мощностью 0,3–5 Вт с номинальным напряжением стабилизации 10–100 В;
- 6 — стабилитроны мощностью 0,3–5 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;
- 7 — стабилитроны мощностью 5–10 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 8 — стабилитроны мощностью 5–10 Вт с номинальным напряжением стабилизации 10–100 В;
- 9 — стабилитроны мощностью 5–10 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В.

Генераторы шума (подкласс Г):

- 1 — низкочастотные генераторы шума;
- 2 — высокочастотные генераторы шума.

Для обозначения порядкового номера разработки используется двухзначное число от 01 до 99. Если порядковый номер разработки превышает число 99, то в дальнейшем применяется трехзначное число от 101 до 999.

В качестве квалификационной литеры используются буквы русского алфавита (за исключением букв З, О, Ч, Ы, Ш, Щ, Ю, Я, Ъ, Ь, Э).

В качестве дополнительных элементов обозначения применяются следующие символы:

- *цифры 1–9* — для обозначения модификаций прибора, приводящих к изменению его конструкции или электрических параметров;
- *буква С* — для обозначения сборок — наборов в общем корпусе однотипных приборов, не соединенных электрически или соединенных одноименными вы-водами;
- *цифры, написанные через дефис*, — для обозначения следующих модификаций конструктивного исполнения бескорпусных приборов:
 - 1 — с гибкими выводами без кристаллодержателя;
 - 2 — с гибкими выводами на кристаллодержателе (подложке);
 - 3 — с жесткими выводами без кристаллодержателя (подложки);
 - 4 — с жесткими выводами на кристаллодержателе (подложке);

5 — с контактными площадками без кристаллодержателя (подложки) и без выводов;

6 — с контактными площадками на кристаллодержателе без выводов, буква Р после последнего элемента обозначения — для приборов с парным подбором, буква Г — с подбором в четверки, буква К — с подбором в шестерки.

Примеры обозначения приборов:

2Д204В — кремниевый выпрямительный диод с постоянным и средним значением тока 0,3–10 А, номер разработки 04, группа В (см. рисунок А.1)

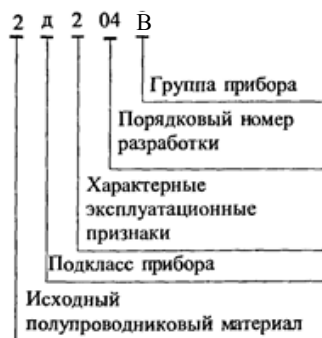


Рисунок А.1 — Обозначение диода *2Д204В*

КС620А — кремниевый стабилитрон мощностью 0,5–5 Вт, с номинальным напряжением стабилизации более 100 В, номер разработки 20, группа А.

ЗИ309Ж — арсенидогаллиевый переключательный туннельный диод, номер разработки 09, группа Ж.

До введения в 1982 г. ОСТ 11336.919-81 применялась иная система условных обозначений. Она включала в себя два или три элемента (ГОСТ 5461-59) [2, 8].

Первый элемент — буква Д, характеризующая весь класс полупроводниковых диодов.

Второй элемент — число (номер), определяющее область применения:

- | | |
|---------|---|
| 1–100 | — для точечных германиевых диодов; |
| 101–200 | — для точечных кремниевых диодов; |
| 201–300 | — для плоскостных кремниевых диодов; |
| 301–400 | — для плоскостных германиевых диодов; |
| 401–500 | — для смесительных СВЧ детекторов; |
| 501–600 | — для умножительных диодов; |
| 601–700 | — для видеодетекторов; |
| 701–749 | — для параметрических германиевых диодов; |
| 750–800 | — для параметрических кремниевых диодов. |