

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И. П. Матвеев

ЭЛЕКТРОНИКА

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве пособия для студентов
учреждений высшего образования по специальности 1-74 06 05
«Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)»*

Минск
БГАТУ
2020

УДК 621.38(075)
ББК 32.87я7
МЗЗ

Рецензенты:

кафедра «Электротехника и электроника» Белорусского
национального технического университета (кандидат технических
наук, доцент, заведующий кафедрой *Ю. В. Бладыко*);
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры
«Вычислительные методы и программирование» учреждения
образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники» *В. В. Матвеевко*

Матвеевко, И. П.

МЗЗ Электроника : пособие / И. П. Матвеевко. – Минск : БГАТУ, 2020. –
288 с.
ISBN 978-985-25-0075-3.

Рассмотрена современная элементная база электроники. Приведены основные принципы построения и функционирования аналоговых электронных устройств: различных типов усилителей и генераторов, источников вторичного электропитания. Освещены вопросы цифровой схемотехники. Особое внимание уделено современным микропроцессорным устройствам: структуре и архитектуре микропроцессора, взаимосвязи его составных частей, системе программирования микропроцессора. Приведены основные положения проводной и радиосвязи.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям); направления специальности: 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика) и 1-74 06 05-02 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика).

**УДК 621.38(075)
ББК 32.87я7**

ISBN 978-985-25-0075-3

© БГАТУ, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Раздел 1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ	14
1.1. Полупроводниковые приборы	15
1.2. Полупроводниковые диоды	25
1.3. Биполярные транзисторы	40
1.4. Полевые транзисторы	51
1.5. Тиристоры	63
1.6. Интегральные микросхемы	71
1.7. Оптроны. Элементы индикации	78
1.8. Электровакуумные и электронно-лучевые приборы	92
Раздел 2. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ГЕНЕРАТОРЫ	109
2.1. Электронные усилители	109
2.2. Обратные связи в усилителях	115
2.3 Температурная стабилизация усилителей. Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления)	120
2.4. Усилители мощности	126
2.5 Усилители постоянного тока (УПТ)	133
2.6. Избирательные усилители	149
2.7. Генераторы гармонических колебаний	154
Раздел 3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	163
3.1. Выпрямители переменного тока	163
3.2. Стабилизаторы напряжения и тока	174
3.3. Управляемые выпрямители одно- и трехфазного тока	179
3.4. Инверторы. Импульсные источники питания	185
Раздел 4. ИМПУЛЬСНАЯ И ЦИФРОВАЯ ТЕХНИКА. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ	191
4.1. Представление информации в импульсной форме. Генераторы импульсов	191

4.2. Логические элементы	205
4.3. Триггеры	212
4.4. Цифровые логические схемы	221
4.5. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи	237
4.6. Арифметические и логические основы микропроцессорной техники	243
4.7. Архитектура и структура микропроцессора (МП)	257
4.8. Проводная связь и радиосвязь	266
4.9. Радиопередающие устройства (РПДУ) и радиоприемные устройства (РПУ)	277
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	284

ВВЕДЕНИЕ

Важной особенностью развития человеческого общества в настоящее время является все возрастающая роль электроники во всех сферах жизни и деятельности людей. Достижения в области электроники в значительной мере способствуют успешному решению сложных научно-технических проблем, созданию новых видов машин и оборудования, разработке эффективных технологий и систем управления, совершенствованию процессов сбора и обработки информации.

Промышленная электроника, охватывая широкий круг научных, технических и производственных проблем, является базой дальнейшего прогресса, в частности, основой автоматизации многих областей промышленности, сельского хозяйства, транспорта и энергетики. Кроме того, будущие инженеры-электрики (инженеры-теплоэнергетики) наряду с подготовкой по основам электротехнологии и энергетики должны получать глубокие знания в областях современной микроэлектроники, аналоговой, цифровой и микропроцессорной техники, применения компьютеров для автоматизации различных промышленных устройств, включая энергообеспечение, транспорт, связь. Поэтому дисциплина «Электроника» играет важную роль в подготовке специалистов по электрификации и автоматизации сельского хозяйства.

Дисциплина «Электроника» является общеинженерной дисциплиной и играет важную роль в подготовке специалистов по электрификации и автоматизации сельского хозяйства. Системы автоматизированного управления производственными и технологическими процессами в сельском хозяйстве основываются на применении средств электронной и микропроцессорной техники, например, в растениеводстве – для измерения температуры и кислотности почвы, определения ее теплопроводности, предсказания заморозков, измерения влажности, предпосевной обработки семян и т. п.; в животноводстве и птицеводстве – для определения жирности молока, измерения температуры у животных, дистанционного контроля и регулирования температуры и влажности воздуха в инкубаторах; при хранении сельскохозяйственных продуктов – для дистанционного измерения температуры и влажности зерна в зернохранилищах, овощей, фруктов и трав при их сушке в сушилках,

контроля и регулирования температуры и влажности воздуха и почвы в теплицах; при эксплуатации машинно-тракторного парка – для диагностики технического состояния двигателей внутреннего сгорания, контролирования процесса впрыскивания топлива в цилиндры дизелей и момента зажигания горючей смеси в цилиндрах карбюраторных двигателей, измерения работы, совершаемой тракторами и сельскохозяйственными машинами; в ремонтных мастерских – для электроконтактной сварки металлов, высокочастотной закалки деталей, упрочнения режущих кромок инструментов; в энергетике – для защиты токоприемников от ненормальных режимов работы, регулирования электрического освещения, обеспечения электробезопасности и т. д.

Изложение материала построено таким образом, чтобы от общего представления о физических основах полупроводниковой электроники перейти к дискретным полупроводниковым элементам, а потом к более сложным аналоговым и цифровым устройствам. Особое внимание уделяется основам микропроцессорной техники, без которой невозможно представить современное автоматизированное производство.

Материал учебного пособия разбит на четыре раздела в соответствии с учебной программой учреждения высшего образования по учебной дисциплине для специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)»; направления специальности: 1-74 06 05-01 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика)» и 1-74 06 05-02 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика)».

Первый раздел посвящен изучению элементной базы электроники, второй раздел – изучению электронных усилителей и генераторов, третий раздел – изучению устройств электропитания, четвертый раздел – изучению цифровых устройств и микропроцессорных систем.

Целью учебной дисциплины «Электроника» является изучение элементной базы и основ схемотехники электронных аналоговых и цифровых устройств, которые используются в современной промышленной электронике, а также принципов построения микропроцессоров, МП систем и технических средств связи. Таким образом, дисциплина формирует у студентов базу знаний в области электроники, дает основы для дальнейшего изучения и применения микропроцессорной техники и техники связи, а также формирует практические навыки работы инженера-электрика.

Задачи учебной дисциплины:

- ознакомление с современным состоянием, тенденциями развития и областями применения электронных приборов, микропроцессорной техники и средств связи;
- изучение методик исследования, расчета, анализа, моделирования, сравнения, оценки устройств аналоговой, цифровой и микропроцессорной техники и средств связи;
- формирование умения самостоятельно получать, перерабатывать и использовать теоретические знания для решения задач различного уровня сложности в области электроники.

Подготовка специалиста в рамках учебной дисциплины «Электроника» должна обеспечить формирование компетенции БПК-5: быть способным использовать основные законы электротехники и владеть методами их применения, выбирать соответствующие средства измерительной техники, организовывать их поверку, применять электронные приборы и микропроцессорные средства в электрических установках.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать назначение электронных (аналоговых и цифровых) приборов; основные характеристики и параметры, принципы построения и работы различных электронных устройств.

уметь читать структурные и принципиальные электрические схемы, построенные на полупроводниковой и интегральной элементной базе; применять интегральные схемы, полупроводниковые приборы и микропроцессоры в современных устройствах и средствах автоматизации.

владеть методами исследования и выбора электронных устройств, методиками расчета основных параметров, навыками работы с электронными приборами.

Электроника – это область науки и техники, занимающаяся созданием и практическим использованием различных устройств и приборов, работа которых основана на изменении концентрации и перемещении заряженных частиц (электронов) в вакууме, газе или твердых кристаллических телах.

Электроника относится к числу быстро развивающихся отраслей науки, техники, народного хозяйства. Происходит непрерывная замена одних приборов другими, более совершенными. Раньше возможности электронных ламп казались совершенными, но появились

полупроводниковые приборы с еще большими возможностями. То, что было недоступно электронным лампам (высокая механическая прочность, малогабаритность, долговечность) стало доступно полупроводниковым приборам. Электроракуумные приборы, в свою очередь, тоже совершенствовались и благодаря своим особенностям (работа в широком частотном диапазоне, более высокая мощность сигнала, малое влияние температуры и других внешних факторов на электрический сигнал) находят применение в радиоэлектронной аппаратуре для космической связи, навигации, радиолокации и специального назначения.

Электроника находит все более широкое применение почти во всех областях науки и техники, что обусловлено высокими чувствительностью и быстродействием, универсальностью и небольшими габаритами электронных приборов.

Быстродействие определяется самой природой электрических колебаний. Этот параметр неуклонно повышается в связи с микроминиатюризацией элементов и устройств в целом.

Универсальность обусловлена возможностью преобразования всех видов энергии (механической, тепловой, световой, звуковой, химической) в электрическую энергию, на изменении и преобразовании которой основано действие всех электронных схем.

Область электроники, занимающаяся применением в промышленности и сельском хозяйстве различных электронных устройств, позволяющих осуществлять контроль, регулирование и управление производственными процессами, называется промышленной электроникой.

В промышленную электронику входят:

1. Информационная электроника, к которой относятся электронные системы и устройства, связанные с измерением, контролем и управлением промышленными объектами и технологическими процессами.

2. Энергетическая электроника (преобразовательная техника), связанная с преобразованием вида электрического тока для целей электропривода, сварки, электрической тяги, электротермии и т. д.

3. Электронная технология – воздействие на вещество электронными лучами, плазмой.

В основе радиоэлектроники лежит величайшее открытие электромагнитного поля, связанное с именами выдающихся ученых:

М. Фарадея, открывшего закон электромагнитной индукции (1831), Дж. Максвелла, создавшего теорию электромагнитного поля (1865), Г. Герца, впервые экспериментально получившего электромагнитные волны (1887).

В зависимости от применяемой элементной базы можно выделить четыре основных поколения развития промышленной электроники и электронных устройств:

I поколение (1904–1950) – основную элементную базу электронных устройств составляли электровакуумные приборы.

II поколение (1950 – начало 60-х годов) – применение в качестве основной элементной базы дискретных полупроводниковых приборов.

III поколение электронных устройств (1960–1980) связано с развитием микроэлектроники. Основой элементной базы электронных устройств стали интегральные микросхемы и микросборки.

IV поколение (с 1980 по настоящее время) характеризуется дальнейшей микроминиатюризацией электронных устройств на основе применения БИС (больших интегральных схем) и СБИС (сверхбольших интегральных схем).

Основные направления развития электроники связаны с тремя основными областями исследований: вакуумной, твердотельной и квантовой электроникой. Каждое из этих направлений занимается разработкой и созданием определенного типа приборов:

1. Вакуумная электроника: СВЧ приборы (магнетроны, клистроны, лампы бегущей и обратной волны); релятивистские приборы (гиротроны, убитроны); рентгеновские трубки; электронно-оптические преобразователи и кинескопы и др.

В настоящее время разрабатываются электровакуумные приборы (ЭВП) нового поколения на базе микроэлектронной технологии, которые обладают всеми преимуществами вакуумных приборов (широкий диапазон рабочих температур, радиационная стойкость и т. д.) и не уступают полупроводниковым приборам по компактности и габаритам.

2. Твердотельная электроника: полупроводниковые и оптоэлектронные приборы, интегральные микросхемы (ИМС) различной степени интеграции. Продолжается работа в области создания нанoeлектронных приборов.

3. Квантовая электроника: оптические квантовые генераторы (лазеры), квантовые усилители, молекулярные генераторы.

Профессиональная деятельность инженера-электрика немыслима без применения современной электронной аппаратуры и, в первую очередь, аппаратуры автоматики и контроля, включающей информационно-измерительную и вычислительную электронную аппаратуру, которая в настоящее время широко внедряется во всех областях сельского хозяйства. Поэтому современному инженеру необходимы глубокие знания в области прикладной электроники, микроэлектроники, информационно-измерительной и вычислительной техники.

Словарь основных терминов

Анод – один из электродов электровакуумного или полупроводникового прибора, соединенный с положительным полюсом источника электрического тока.

Акцепторные примеси – примесные атомы в полупроводнике, способные захватывать электрон из валентной зоны, что эквивалентно появлению в ней дырки.

Алгоритм – заданная последовательность действий, выполнение которых приводит к получению результата.

Бит – единица измерения информации («0» или «1»).

Байт – единица измерения информации, равная восьми битам.

Блокинг-генераторы – электронные устройства, предназначенные для формирования импульсов тока или напряжения прямоугольной формы преимущественно малой длительности.

Булевы переменные – переменные, отображающие истинную или ложную информацию и принимающие два фиксированных значения: да или нет.

Вакуумная электроника – область электроники, включающая исследования взаимодействия потоков свободных электронов с электрическими и магнитными полями в вакууме, а также методы создания приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется.

Выпрямление – процесс преобразования энергии переменного тока (напряжения) в энергию постоянного тока (напряжения).

Внешний фотоэффект – испускание электронов из одной среды в другую под воздействием квантов электромагнитного излучения (фотонов).

Внутренний фотоэффект – увеличение концентрации носителей заряда в полупроводнике под воздействием квантов электромагнитного излучения (фотонов).

Гетеродин – маломощный генератор.

Дрейф носителей заряда – движение электронов и дырок под воздействием электрического поля.

Диффузия носителей заряда – движение электронов и дырок при их неравномерной концентрации (наличие градиента концентрации) и при отсутствии внешнего электрического поля.

Донорные примеси – примесные атомы в полупроводнике, способные отдавать электрон в зону проводимости.

Дизъюнкция – операция логического сложения.

Дешифратор (декодер) – устройство, предназначенное для распознавания различных кодовых комбинаций.

Девияция частоты – максимальное значение отклонения частоты от ее среднего значения.

Детектор (демодулятор) – устройство для такого преобразования электрических колебаний, когда из них выделяются составляющие низкой частоты.

ИМС (интегральная микросхема) – микроэлектронное устройство, выполняющее функции целой электрической схемы и выполненное как единое целое.

Инвертирование – процесс преобразования энергии постоянно-го тока в энергию переменного тока.

Интерфейс – это совокупность правил, устанавливающих единые принципы взаимодействия узлов и блоков МП системы.

Инжекция электронов – введение (вбрасывание) избыточных электронов в полупроводник под воздействием электрического поля.

Каскад – схема одноступенчатого усилителя, построенная на одном усилительном элементе (лампа, биполярный или полевой транзистор).

Конъюнкция – операция логического умножения.

Катод – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с отрицательным полюсом источника электрического тока.

Квантовая электроника – область электроники, связанная с разработкой методов и средств усиления и генерации электромагнитных колебаний.

Коллекторный переход – электронно-дырочный переход (р/п переход) в транзисторе между базой и коллектором.

Микроминиатюризация – направление в конструировании и создании интегральных микросхем, содержащих элементы с субмикронными размерами.

Микрофон – устройство для преобразования энергии колебаний воздушной среды в энергию электрических колебаний.

Мультивибраторы – электронные устройства, предназначенные для генерирования периодической последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы.

Мультиплексор – логическое устройство, которое используется, когда требуется последовательно опросить логические состояния многих устройств и передать их на один выход.

Модулятор – устройство для изменения одного из параметров несущего колебания ВЧ по закону изменения передаваемого НЧ сигнала.

Оптрон – полупроводниковый прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, имеющие между собой оптическую связь.

Плотность упаковки – характеризует количество элементов ИМС в единице объема.

Рекомбинация - процесс заполнения незаполненной валентной связи электроном.

Регистры – устройства, предназначенные для приема, хранения, передачи и преобразования информации в виде двоичного числа или другой кодовой информации.

Смеситель – преобразователь частоты.

Схемы детектирования – схемы преобразования электрических колебаний для выделения составляющих низкой частоты.

Схема принципиальная электрическая (полная) – схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дающая детальное представление о принципах работы изделия (установки).

Схема функциональная – схема, разъясняющая определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия (установки) или в изделии (установке) в целом.

Схема структурная – схема, определяющая основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи.

Тетрада – единица измерения информации, равная четырем битам.

Трансляция – перевод программ в машинные коды.

Триггер – устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями, способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала.

Твердотельная электроника – область электроники, охватывающая исследование электронных процессов в твердых телах и использование этих процессов для преобразования электромагнитной энергии в широком диапазоне частот.

Флаг – определяет состояние полученного в результате вычислений двоичного числа посредством булевых переменных.

Шина – это совокупность проводников, каждый из которых предназначен для передачи соответствующего бита информации.

Эмиттерный переход – электронно-дырочный переход (р/п переход) в транзисторе между эмиттером и базой.

Раздел 1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ

Электронными называют приборы, в которых ток создается движением электронов в вакууме, газе или полупроводнике. Поэтому все приборы можно разделить на две группы: электровакуумные, которые в свою очередь подразделяются на электронные и газоразрядные (ионные) и полупроводниковые.

К электровакуумным приборам относятся:

1. Электровакуумные лампы.

Их используют в генераторах переменного тока различной частоты, усилителях постоянного и переменного тока, усилителях мощности, выпрямителях переменного тока, стабилизаторах напряжения, преобразователях частоты, формирователях импульсов специальной формы и других устройствах.

2. Электронно-лучевые приборы. В этих приборах используется энергия светового потока, сфокусированного в узкий луч. Их используют в телевидении (кинескопы, суперортиконы), в измерительных приборах (осциллографы), дисплеях ЭВМ, радиолокаторах и индикаторах.

3. Ионные (газоразрядные) приборы используют свойства электрического разряда в газах. Носителями зарядов в газоразрядных приборах являются электроны и ионы, образующиеся в результате ударной ионизации атомов газа.

4. Фотоэлектронные приборы, которые преобразуют световые сигналы в электрические (фотоэлементы с внешним фотоэффектом и фотоэлектронные умножители).

Существуют и другие типы электронных приборов: электронно-оптические преобразователи, рентгеновские трубки.

К полупроводниковым приборам относятся полупроводниковые резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, тиристоры, интегральные микросхемы.

Элементная база – это отдельные детали или модули, представляющие собой предварительно собранные из отдельных деталей схемы неразъемных соединений. Элементную базу делят на три группы компонентов:

- пассивные;
- активные;
- преобразующие.

К пассивным компонентам относятся резисторы, конденсаторы, индуктивности, трансформаторы, дроссели, переключатели и другие, которые обеспечивают заданные режимы работы электронных схем.

Отдельную группу электронных компонентов составляют интегральные схемы, в состав которых входят как активные, так и пассивные компоненты.

К активным относятся электровакуумные лампы, полупроводниковые транзисторы и другие, которые усиливают, преобразуют, генерируют электрические сигналы.

К преобразующим можно отнести электронно-лучевые трубки.

1.1. Полупроводниковые приборы

1.1.1. Основы теории электропроводности

В теории электропроводности твердых тел указывается, что энергия каждого электрона может принимать лишь определенные значения, которые называются *энергетическими уровнями*. Электроны, расположенные ближе к ядру атома, обладают меньшими энергиями, т. е. находятся на более низких энергетических уровнях, а удаленные от ядра электроны находятся на более высоких энергетических уровнях, т. е. обладают большей энергией.

Когда электрон переходит с более высокого энергетического уровня на более низкий, выделяется количество энергии (квант энергии или фотон), которую теряет атом. Если атом поглощает квант энергии, то электрон переходит с более низкого энергетического уровня на более высокий уровень. Такие электроны начинают свободно перемещаться в объеме и называются *свободными носителями зарядов*.

Свободная зона, на уровнях которой при возбуждении могут находиться электроны, называется *зоной проводимости*. Зона, ближайшая к зоне проводимости, называется *валентной*. При изменении температуры происходит обмен носителями зарядов между валентной зоной и зоной проводимости (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Зонная диаграмма металла, полупроводника и диэлектрика

С возрастанием температуры электроны, получившие дополнительную тепловую энергию, разрывают такие ковалентные связи и становятся свободными носителями заряда. Таким образом, для перевода электронов в свободное состояние необходимо сообщить ему дополнительное количество энергии, которое обозначается E_g .

В диэлектриках величина дополнительной энергии E_g , необходимой для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, значительно больше, чем у полупроводников.

Уход электрона из валентной зоны приводит к образованию в ней незаполненного энергетического уровня. Такое вакантное энергетическое место носит название «дырка» и оно равносильно наличию в данном месте положительного заряда. В технической литературе дырки обозначают буквой p , а электроны – буквой n .

1.1.2. Электропроводность полупроводников

Появление электронов в зоне проводимости означает, что полупроводник становится электропроводящим. Эта электропроводность является следствием нарушения валентных связей и называется *собственной электропроводностью*.

На электропроводность полупроводника существенное влияние оказывает наличие в нем атомов примесей. Электропроводность, обусловленную движением свободных электронов, называют электронной, а электропроводность, обусловленную движением дырок – дырочной.

Примесная электропроводность полупроводников

В зависимости от рода введенной примеси в полупроводниках преобладает либо электронная электропроводность (n -типа, от латинского negative – отрицательный) либо дырочная электропроводность (p -типа, от латинского positive – положительный). Примеси могут быть донорного и акцепторного типов.

Примесный атом, отдающий электрон, называют донорным. Донорные примеси образуются при введении в кристаллическую решетку полупроводника (обычно кремния Si или германия Ge, которые являются четырехвалентными) атомов фосфора P, мышьяка As или других веществ, которые имеют на внешней электронной оболочке пять валентных электронов. Он замещает один из атомов Ge (Si) в кристаллической решетке, образуя двухвалентные связи с четырьмя атомами (рис. 1.2, б).

Пятый валентный электрон атома фосфора, оказывающийся «лишним», образует электрон проводимости. При увеличении содержания атомов примеси возрастает число электронов в зоне проводимости, а число дырок не меняется. Ток переносится в основном электронами. В этом случае электроны являются основными носителями заряда, а дырки – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником *n*-типа.

Акцепторные примеси образуются введением в кристаллическую решетку полупроводника, например, атомов бора B, индия In, галлия Ga или других трехвалентных элементов. Атом акцептора также занимает место в кристаллической решетке, но обменивается с соседними четырьмя атомами только тремя электронами (рис. 1.2, в).

На образование связи с одним из соседних атомов Si у атомов индия не хватает одного электрона, т. е. между этими двумя атомами возникает незаполненная валентная связь или дырка. При увеличении акцепторной примеси возрастает концентрация дырок, и они становятся основными носителями, а электроны – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником *p*-типа.

Кристаллические структуры таких полупроводников показаны на рисунке 1.2.

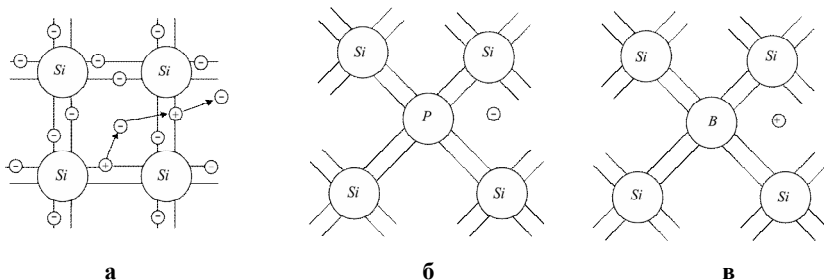


Рис. 1.2. Кристаллические структуры чистого полупроводника (а), полупроводника с донорной (б) и акцепторной (в) примесью

Процесс перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости является обратимым, то есть электрон из зоны проводимости может перейти в валентную зону, теряя при этом энергию. При таком переходе электрон заполняет свободный уровень в валентной зоне. Этот процесс, обратный генерации, называется рекомбинацией.

Дрейфовые и диффузионные токи в полупроводниках

При приложении внешнего электрического поля в полупроводнике происходит дрейфовое движение электронов. В этом случае электроны и дырки начнут перемещаться вдоль электрического поля, то есть создают электрический ток. Плотности электронной и дырочной составляющих равны соответственно:

$$jn_{\text{др}} = qn\mu_n E, \quad (1.1)$$

$$jp_{\text{др}} = qp\mu_p E, \quad (1.2)$$

где μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок, которые определяют скорости перемещения носителей под действием электрического поля, при этом: $\mu_n = v_n/E$; $\mu_p = v_p/E$, где v_n и v_p – скорости перемещения электрона и дырки под действием электрического поля;

E – напряженность электрического поля;

n , p – концентрация электронов и дырок;

q – заряд.

Общая плотность дрейфовой составляющей тока будет равна

$$j_{\text{др}} = jn_{\text{др}} + jp_{\text{др}} = q(n\mu_n + p\mu_p)E. \quad (1.3)$$

Удельная проводимость будет определяться как:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p). \quad (1.4)$$

Наряду с дрейфовой возникает диффузионная составляющая тока, которая является следствием теплового движения электронов. При неравномерной концентрации электронов и дырок и при отсутствии внешнего поля они перемещаются по законам диффузии, переходя из области больших концентраций в область меньших концентраций. Это направленное перемещение электронов в результате хаотического теплового движения называется диффузией и образует диффузионную составляющую тока. В результате диффузии носители зарядов смещаются в направлении уменьшения их концентрации (градиент концентрации).

Градиент концентрации определяется как отношение изменения концентрации к расстоянию, на котором это изменение происходит:

$$\text{grad } n = \Delta n / \Delta x. \quad (1.5)$$

Плотность электронного диффузионного тока пропорциональна градиенту концентрации:

$j_{nD} = qD_n(dn/dx)$, где D_n – коэффициент диффузии электронов; dn/dx – градиент концентрации электронов.

Плотность дырочного диффузионного тока определяется из аналогичного выражения:

$j_{pD} = -qD_p(dp/dx)$, где D_p – коэффициент диффузии дырок; dp/dx – градиент концентрации дырок.

Полупроводниковые материалы

К полупроводникам относятся кремний, германий, селен, теллур, большинство оксидов металлов и всё разнообразие руд и минералов, встречающихся в природе. Полупроводники по величине электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и изоляторами.

Основными материалами для изготовления полупроводниковых приборов являются кремний (Si) и германий (Ge). Большая механическая прочность и химическая устойчивость этих материалов обеспечивают надежность работы изготавливаемых полупроводниковых приборов, а также достаточно большой срок их службы.

1.1.3. Полупроводниковые резисторы

Полупроводниковыми резисторами называют полупроводниковые приборы, принцип действия которых основан на свойствах полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры, электромагнитного излучения, приложенного напряжения и других факторов.

Терморезистор – полупроводниковый прибор, сопротивление которого изменяется при изменении температуры (у *термистора* сопротивление уменьшается с ростом температуры, а у *позистора* – возрастает).

Температурная характеристика термистора $R = f(t^\circ)$ показана на рисунке 1.3.

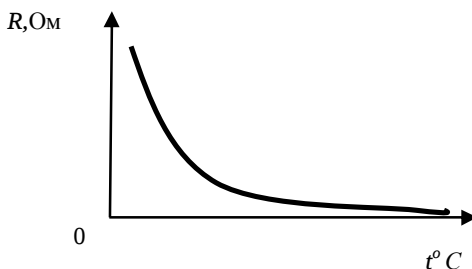


Рис. 1.3. Температурная характеристика термистора

Параметры терморезистора:

- 1) холодное сопротивление (при $t = 20^{\circ} \text{C}$);
- 2) температурный коэффициент сопротивления (ТКР), %;
- 3) рабочая температура (t_{max});
- 4) максимальная рассеиваемая мощность P_{max} рас.

Применяют термисторы для измерения и регулирования температуры, а также термокомпенсации.

Позисторы – полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом (титанат бария с примесями), у которых сопротивление увеличивается при увеличении температуры t . Основная характеристика – температурная (рис. 1.4). Параметры аналогичны параметрам термистора.

Применяют позисторы для автоматического регулирования температуры, термокомпенсации, в схемах ограничителей и стабилизаторов тока, для предохранительных приборов и устройств защиты от перегрева, в качестве бесконтактных переключающих элементов.

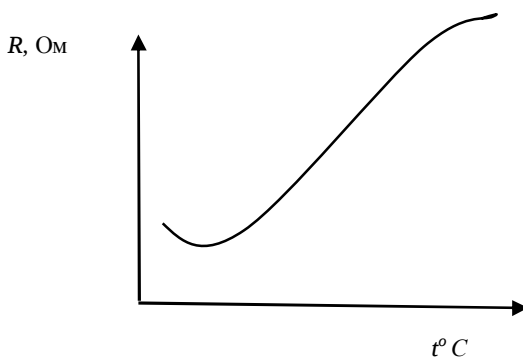


Рис. 1.4. Температурная характеристика позистора

Маркировка терморезисторов состоит из трех элементов:

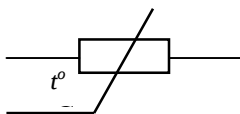
– первый элемент маркировки обозначает назначение (СТ – резисторы термочувствительные, Т и ТШ – резисторы измерительные, ТП – стабилизирующие, ТКП – регулируемые бесконтактные);

– второй элемент обозначает тип полупроводника (1 – кобальт-марганец, 2 – медно-марганцевые, 3 – медно-кобальт-марганцевые, 4 – кобальт-никель-марганец);

– третий элемент обозначает номер конструкции.

Примеры: СТ2 – 26, СТ4 – 5, ММТ – 6, ТШ – 2, ТКП – 450.

Условное графическое изображение терморезисторов:



Варисторы – полупроводниковые резисторы (на основе карбида Si) сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.

Основная характеристика варистора – это вольтамперная характеристика (ВАХ) $I = f(U)$ (рис. 1.5).

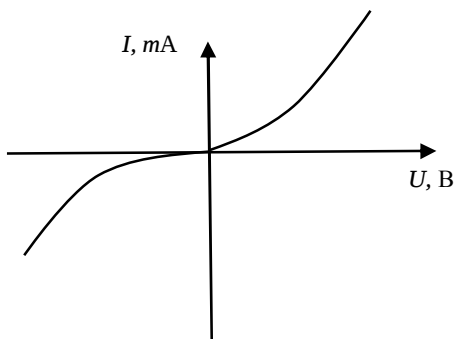


Рис. 1.5. ВАХ варистора

Параметры варистора:

- 1) статическое сопротивление при постоянных значениях тока и напряжения $R_{ст} = U/I$;
- 2) динамическое сопротивление переменному току $R_{д} = \Delta U / \Delta I$;
- 3) коэффициент нелинейности $\beta = R_{ст} / R_{д}$;
- 4) максимальная рассеиваемая мощность P_{max} рас.

Применяют варисторы для регулирования электрических величин, стабилизации токов и напряжений, для защиты элементов от перенапряжений.

Маркировка прибора состоит из 4 элементов:

- первый элемент обозначает назначение (СН – сопротивление нелинейное);

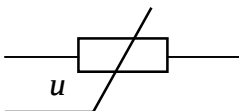
- второй элемент обозначает тип полупроводника;

- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;

- четвертый элемент обозначает длину токоведущего элемента.

Примеры: СН1-1, СН-3.

Условное графическое изображение варистора:



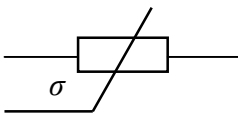
Тензорезисторы – полупроводниковые резисторы, сопротивление которых зависит от величины механической деформации.

Для характеристики изменения сопротивления при деформации используется коэффициент тензочувствительности k , который представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации в данном направлении:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}.$$

К параметрам тензорезистора относят также номинальное сопротивление $R_{\text{ном}}$.

Условное графическое изображение тензорезистора:



Применяют тензорезисторы в датчиках давлений, усилий, датчиках малых перемещений и крутящего момента, в преобразователях давления или механических напряжений в электрический сигнал.

Фоторезисторы – полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых изменяется под действием светового потока.

Основой фоторезистора является светочувствительный элемент – прямоугольная или круглая таблетка, спрессованная из полупроводникового материала или тонкая пленка на стеклянной подложке с электродами с малым переходным сопротивлением (рис 1.6).

Принцип действия фоторезистора основан на использовании явления внутреннего фотоэффекта: при увеличении светового потока часть электронов проводимости сталкивается с атомами, ионизирует их и создает дополнительный поток электронов (возникает фототок проводимости).

При отсутствии тока через фоторезистор течет темновой ток:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_H},$$

где R_T – темновое сопротивление фоторезистора.

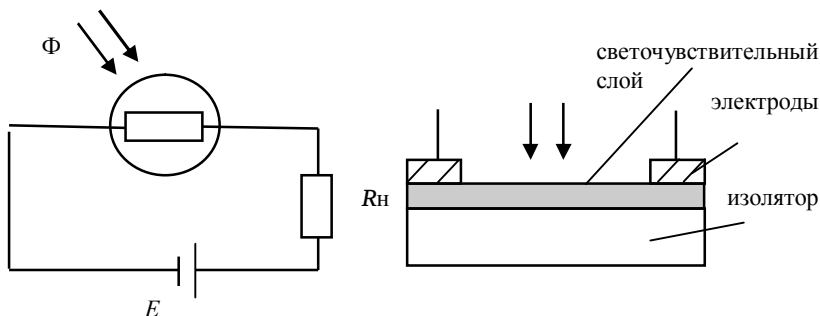


Рис. 1.6. Конструкция фоторезистора

При освещении фоторезистора через него протекает световой ток:

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H}.$$

Основные характеристики фоторезистора (рис. 1.7):

1) вольтамперная характеристика – зависимость фототока (или темнового тока) от приложенного напряжения при постоянном световом потоке:

$I_\Phi = f(U_\Phi)$ при $\Phi = \text{const}$ (рис. 1.7, а);

2) световая (энергетическая) – зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава $I_\phi = f(\Phi)$ при $U = \text{const}$ (рис. 1.7, б);

3) спектральная – зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны светового излучения (рис. 1.7, в).

Основные параметры фоторезистора:

1) темновое сопротивление R_t ;

2) темновой и фототоки (I_t , I_ϕ);

3) удельная чувствительность $S = \frac{I_\phi}{\Phi \times U}$;

4) рабочее напряжение;

5) максимальная рассеиваемая мощность P_{max} рас.

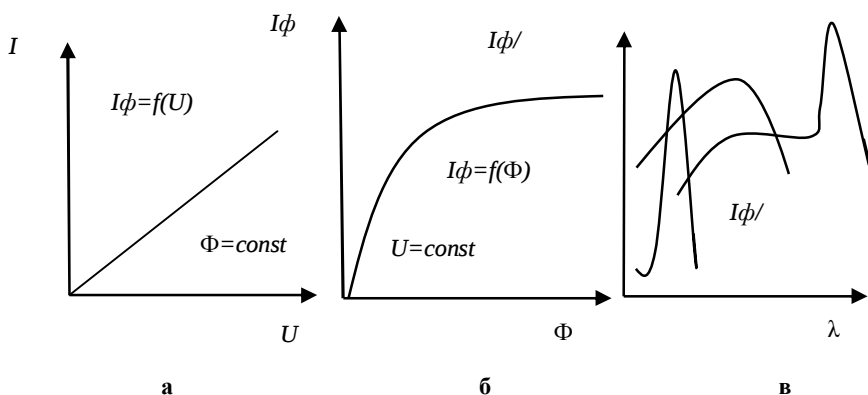


Рис. 1.7. Характеристики фоторезистора

Маркировка фоторезистора состоит из трех элементов:

– первый элемент обозначает назначение (ФС – фотосопротивление);

– второй элемент обозначает тип полупроводника (К – кремний);

– третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения.

Примеры: ФСК -1, ФСК – 2, ФСА – 6.

Применение фоторезисторов: в промышленной электронике, телевидении, фототелеграфии, сигнализации и связи (в диапазоне инфракрасных волн), а также в схемах электронной автоматики.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие носители заряда являются основными для полупроводников n -типа и p -типа?

2. Какие носители заряда являются неосновными для полупроводников n -типа и p -типа?

3. Какие типы примесных полупроводников вы знаете, и как они создаются?

4. Чем отличаются термисторы от позисторов?

5. На каком принципе основана работа тензорезистора?

6. На каком принципе основана работа фоторезистора?

7. На каком принципе основана работа варистора?

1.2. Полупроводниковые диоды

1.2.1. Образование p - n -перехода

Область на границе двух полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным или p - n -переходом. При соприкосновении двух полупроводников в пограничном слое происходит рекомбинация электронов и дырок. Свободные электроны из зоны полупроводника n -типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника p -типа. В результате, вблизи границы двух полупроводников образуется запирающий слой, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением, который называют p - n -переходом (ширина запирающего слоя или p - n -перехода равна d).

Кроме того, в n -области в приграничном слое образуется положительный объемный заряд, который создан положительно заряженными атомами донорной примеси (т. к. электроны ушли в полупроводник p -типа), а в p -области образуется отрицательный объемный заряд, который создан отрицательно заряженными атомами акцепторной примеси (т. к. дырки были заполнены электронами из полупроводника n -типа).

Между образовавшимися объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов $U_k = \varphi_n - \varphi_p$. На диаграмме (рис. 1.8) показано распределение потенциала вдоль оси x , перпендикулярной границе раздела полупроводников, за нулевой потенциал условно принят потенциал граничного слоя.

Возникшая разность потенциалов U_k создает в запирающем слое электрическое поле E_k , препятствующее дальнейшему переходу

электронов из n -области в p -область и дырок из p -области в n -область, т. е. возникает потенциальный барьер.

При движении через p - n -переход неосновных носителей заряда возникает дрейфовый ток $I_{др}$. Движение небольшого количества основных носителей приводит к появлению диффузионного тока $I_{диф}$ (ситуация рассмотрена при отсутствии внешнего напряжения).

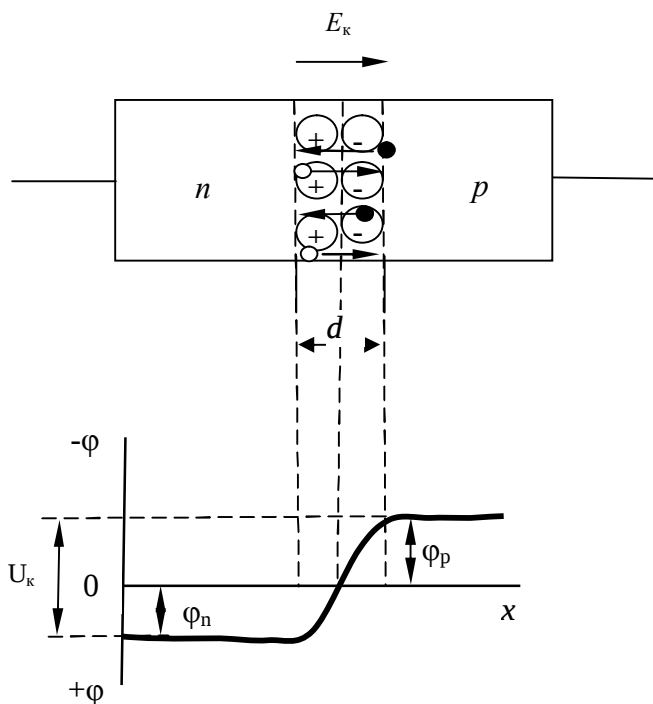


Рис. 1.8. Распределение потенциала вдоль оси x , перпендикулярной границе раздела при отсутствии внешнего источника напряжения

Если источник внешнего напряжения подключен положительным полюсом к полупроводнику p -типа и отрицательным полюсом к полупроводнику n -типа, то такое напряжение, у которого полярность совпадает с полярностью основных носителей, называется прямым (рис. 1.9).

В этом случае внешнее электрическое поле направлено навстречу полю контактной разности потенциалов. В результате чего высота

потенциального барьера понижается ($U_k - U_{пр}$), возрастает $I_{диф}$, который называют прямым током, сопротивление p - n -перехода резко снижается, уменьшается также ширина запирающего слоя. При $d=0$ потенциальный барьер в p - n -переходе исчезает, и сопротивление p - n -перехода определяется только сопротивлением полупроводника.

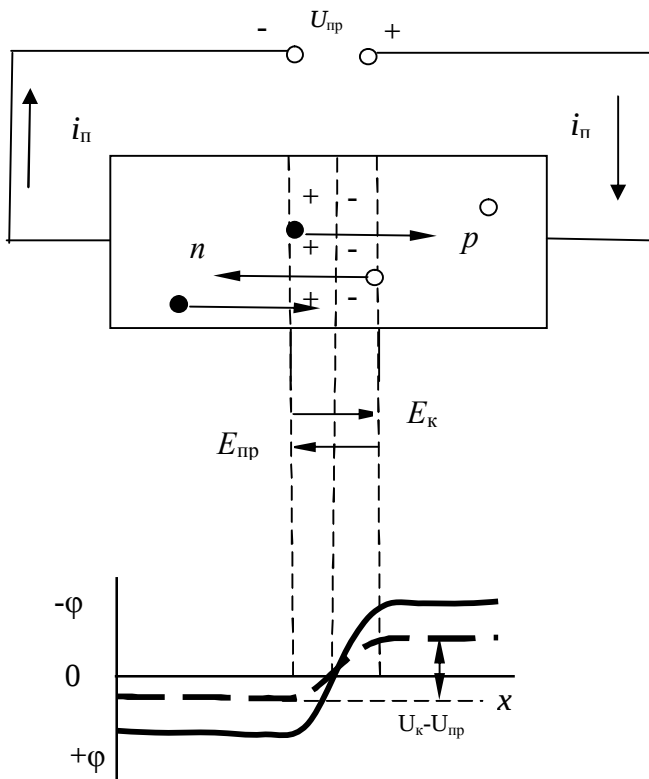


Рис. 1.9. Распределение потенциала при прямом включении источника

Пусть источник внешнего напряжения подключен положительным полюсом к n -области, а отрицательным полюсом к p -области. Такое включение называется обратным. Поле, создаваемое обратным напряжением $U_{обр}$, складывается с полем контактной разности потенциалов. Высота потенциального барьера увеличивается ($U_k + U_{обр}$) (рис. 1.10), а также расширяется толщина запирающего

слоя, так как с увеличением $U_{обр}$ основные носители заряда будут удаляться от p - n -перехода. При этом сопротивление p - n -перехода увеличивается, а ток через p - n -переход уменьшается.

Такой p - n -переход обладает электрической емкостью, которая зависит от его площади, ширины и диэлектрической проницаемости запирающего слоя. Такая емкость называется «барьерной»: $C = \epsilon_0 \epsilon_{II} S / d$, где S – площадь p - n -перехода, d – ширина p - n -перехода, $\epsilon_0 \epsilon_{II}$ – диэлектрические проницаемости.

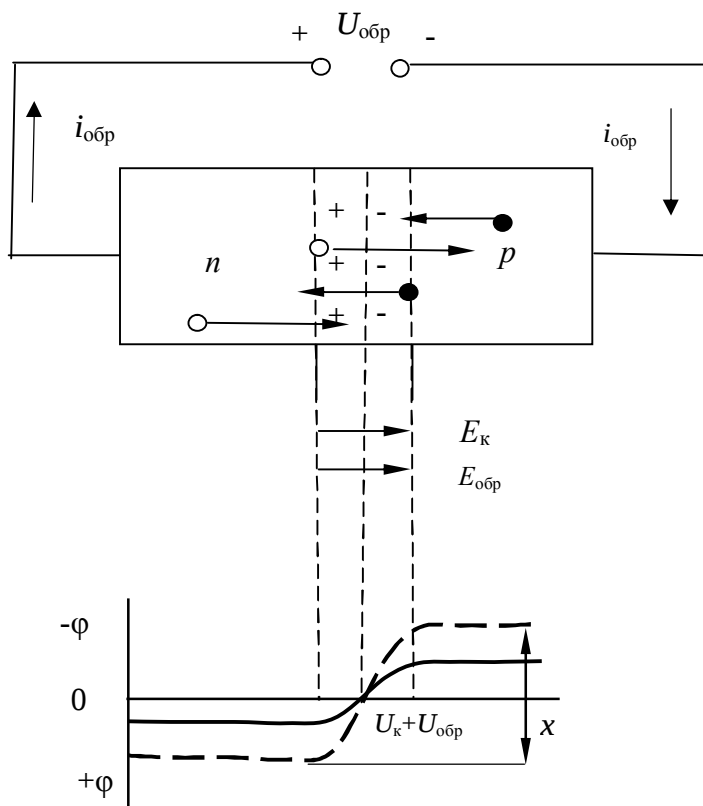


Рис. 1.10. Распределение потенциала при обратном включении источника

При увеличении $U_{обр}$ ширина p - n -перехода возрастает, а емкость $C_{бар}$ уменьшается.

Такая характеристика называется вольт-фарадной характеристикой (рис. 1.11).

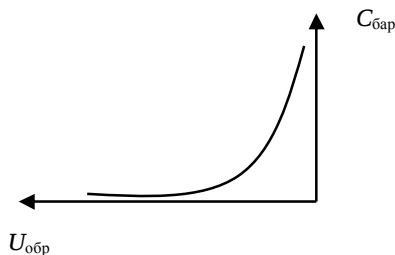


Рис. 1.11. Зависимость барьерной емкости $C_{\text{бар}}$ от напряжения $U_{\text{обр}}$

1.2.2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами и одним *p-n*-переходом.

Диоды различают по технологии изготовления, конструктивному исполнению, материалу, функциональному назначению, мощности и частоте.

В зависимости от технологии изготовления различают диоды:

- точечные;
- сплавные;
- микросплавные;
- эпитаксиальные и др.

По конструктивному исполнению:

- плоскостные (площадь *p-n*-перехода больше его толщины);
- точечные (площадь *p-n*-перехода значительно меньше его толщины).

По используемому материалу:

- кремниевые;
- германиевые;
- арсенид-галлиевые.

По функциональному назначению:

- выпрямительные;
- стабилитроны;
- варикапы;
- фотодиоды;
- светодиоды;
- туннельные и др.

По мощности:

- маломощные (до 0,3 А);
- средней мощности (до 10 А);
- мощные (более 10 А).

По частоте:

- низкочастотные (до 1 кГц);
- высокочастотные (до 300 МГц);
- сверхвысокочастотные (СВЧ, более 300 МГц).

Условные графические изображения диодов приведены на рис. 1.12.

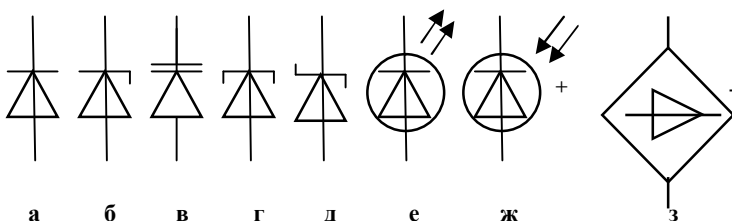


Рис. 1.12. Условные графические изображения диодов:

- а – выпрямительные, импульсные, СВЧ; б – стабилитроны; в – варикапы;
г – туннельные; д – диоды Шоттки; е – светодиоды; ж – фотодиоды;
з – выпрямительные блоки

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный. При этом используется главное свойство *p-n*-перехода: проводить ток в прямом направлении и практически не пропускать ток в обратном направлении. Основной характеристикой такого диода является вольт-амперная характеристика, которая соответствует ВАХ *p-n*-перехода (рис. 1.13).

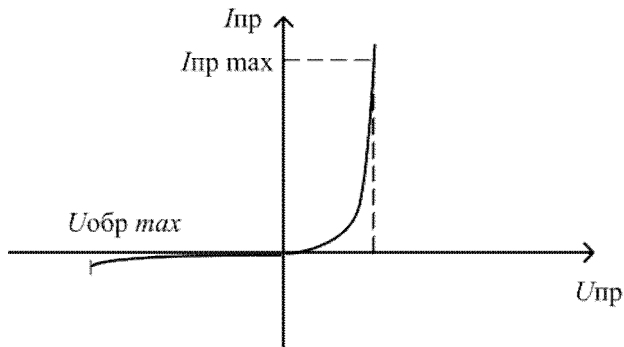


Рис. 1.13. ВАХ выпрямительного диода

Основные параметры выпрямительных диодов:

- прямое напряжение $U_{пр}$ и соответствующий ему прямой ток $I_{пр}$;
- обратное напряжение $U_{обр}$ и соответствующий ему обратный ток $I_{обр}$;

- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.max}$ и максимально допустимый прямой выпрямленный ток $I_{пр.max}$

- дифференциальное сопротивление $r_{диф} = \frac{DU_{пр}}{DI_{пр}}$;

- мощность рассеяния $P_{рас}$ – допустимое значение рассеиваемой мощности, при которой обеспечивается заданная надежность при длительной работе диода.

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя сохраняется с определенной точностью при изменении проходящего через него тока в заданном диапазоне. Рабочим участком на ВАХ стабилитрона является участок электрического пробоя. На этом участке обратной ветви ВАХ при изменении тока в широких пределах напряжение практически не меняется (рис. 1.14).

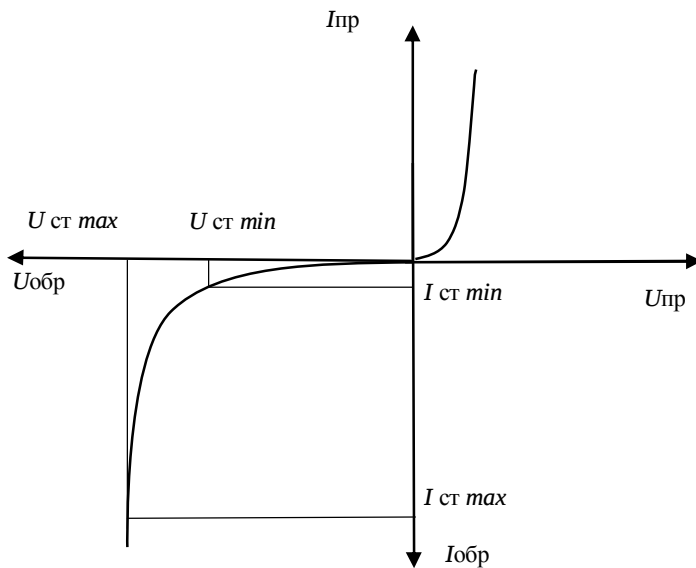


Рис. 1.14. ВАХ стабилитрона

Стабилитроны называют также опорными диодами, так как полученное от них стабильное напряжение иногда используется в качестве эталонного (например, в стабилизаторах напряжения). Простейшая схема включения стабилитрона показана на рис. 1.15.

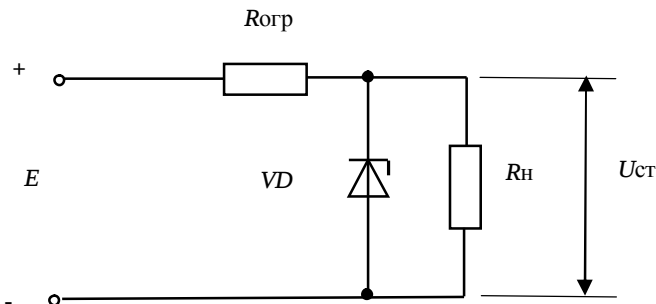


Рис. 1.15. Схема включения стабилитрона

Принцип стабилизации напряжения с использованием стабилитрона заключается в том, что при изменении входного напряжения $U_{вх}$ ток стабилитрона изменяется от $I_{ст\ min}$ до $I_{ст\ max}$, а напряжение на стабилитроне $U_{ст}$ и сопротивлении нагрузки $R_{н}$ почти не меняется.

Основные параметры стабилитронов:

- напряжение стабилизации $U_{ст}$;
- диапазон изменения тока стабилизации ($I_{ст\ max} - I_{ст\ min}$);
- P_{max} – максимально допустимая мощность рассеивания;
- дифференциальное сопротивление $r_{диф} = \frac{DU_{ст}}{DI_{ст}}$;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации $TK_{НС} = \Delta U_{ст} / (U_{ст} \Delta T)$.

Варикапы – это полупроводниковые диоды, действие которых основано на использовании зависимости барьерной емкости p - n -перехода от обратного напряжения. При подаче обратного напряжения p - n -переход представляет собой конденсатор, диэлектриком которого служит высокоомный запирающий слой с низкой концентрацией носителей заряда, а обкладками – полупроводниковый материал по обе стороны от него, сохраняющий высокую проводимость.

Основная характеристика варикапа – вольт-фарадная $U_{обр} = f(C_{бар})$ (рис. 1.11).

Основные параметры варикапов:

- минимальная емкость $C_{\min}$ при заданном минимальном обратном напряжении;
- минимальная емкость $C_{\min}$ при заданном максимальном обратном напряжении;
- коэффициент перекрытия по емкости $K = C_{\max}/C_{\min}$ (от 2 до 18);
- добротность $Q = X_c/R_{\text{пот}}$, где X_c – реактивное сопротивление варикапа, $R_{\text{пот}}$ – сопротивление потерь;
- температурный коэффициент емкости ТКЕ.

Применяются варикапы для генерации и усиления в СВЧ диапазоне, в качестве конденсаторов переменной емкости для электрической настройки колебательных контуров в радиоаппаратуре.

Фотодиоды – это полупроводниковые диоды, в которых используется явление внутреннего фотоэффекта.

При воздействии излучения в направлении, перпендикулярном плоскости p - n -перехода, в результате поглощения фотонов в n -области возникают электронно-дырочные пары. При диффузии электронов и дырок в глубь n -области основная их доля не успевает рекомбинировать и доходит до границы p - n -перехода. Здесь они разделяются электрическим полем p - n -перехода, причем дырки переходят в p -область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы p - n -перехода и n -области.

Таким образом, ток через p - n -переход обусловлен дрейфом основных носителей – дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется фототоком $I_{\text{ф}}$. Дырки заряжают p -область положительно относительно n -области, а электроны – n -область отрицательно по отношению к p -области. Возникающая разность потенциалов называется фото ЭДС ($E_{\text{ф}}$). Генерируемый ток в фотодиоде – обратный, он направлен от катода к аноду, причем его величина тем больше, чем больше освещенность.

Фотодиоды могут использоваться для получения электрической энергии. Солнечные батареи изготавливают на основе фотодиодов с большой площадью p - n -перехода.

Фотодиоды могут работать в режиме фотогенератора (без внешнего источника питания) и в режиме фотопреобразователя (с внешним источником питания, включенном в обратном направлении).

В режиме фотогенератора (рис. 1.16, а) при освещении n -области в ней образуется пары – электрон и дырка. Образовавшиеся заряды

диффундируют к переходу, полем которого дырки втягиваются в p -область. При разомкнутом ключе в p -области накапливается избыточный «+» заряд, а в n -области «-» заряд. На электродах фотодиода возникает разность потенциалов, понижающая потенциальный барьер. Это приводит к возникновению прямого тока ($I_{пр.}$) через p - n -переход.

Если электроды замкнуты накоротко, то разность потенциалов на них не возникает, и высота потенциального барьера при освещении не изменится. При включении сопротивления нагрузки R_H через неё протекает ток нагрузки $I_H = I_\Phi - I_{пр.}$.

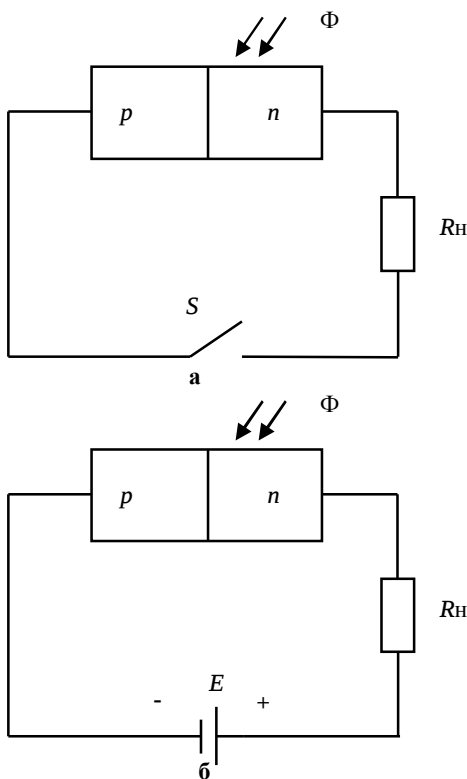


Рис. 1.16. Включение фотодиода в режиме фотогенератора (а) и в режиме фотопреобразователя (б)

В режиме фотопреобразователя (рис. 1.16, б) к диоду прикладывается обратное напряжение. Так как приложенное напряжение значительно больше фото ЭДС, то при освещении p - n -перехода

высота потенциального барьера практически не изменяется и все освобожденные светом и разделенные полем p - n -перехода заряды уходят во внешнюю цепь. Прямой ток через p - n -переход, который возникает при работе в режиме фотогенератора и уменьшает ток в нагрузочном сопротивлении, в данном случае равен нулю [1, 6].

При отсутствии света через p - n -переход и R_n протекает обратный ток p - n -перехода $I_{обр} = I_t$ (где I_t – темновой ток). При освещении фотодиода через R_n протекает ток $I_{общ} = I_\Phi - I_t$. Поскольку внутреннее сопротивление фотодиода в этом режиме велико, то ток не зависит от R_n .

Основные параметры фотодиодов:

- фототок I_Φ ;
- темновой ток I_t или I_0 (ток в диоде при отсутствии освещения);
- величина фотопотока Φ ;

– интегральная чувствительность. $S_n = \frac{I_\Phi}{\Phi}$.

Основными характеристиками фотодиодов являются вольт-амперная ($I = f(U)$), энергетическая ($I_\Phi = f(\Phi)$ – зависимость фототока I_Φ от величины светового потока Φ), спектральная ($I_\Phi = f(\lambda)$ – зависимость фототока I_Φ от длины волны светового потока λ).

Светодиоды – это полупроводниковые приборы с одним или несколькими электрическими переходами, преобразующие электрическую энергию в энергию светового излучения. Явление свечения в светодиоде называется инжекционной электролюминесценцией. Основой светодиода является p - n -переход, смещенный внешним источником напряжения в прямом направлении.

При прямом смещении потенциальный барьер p - n -перехода понижается и происходит инжекция электронов в p -область и дырок в n -область. В процессе рекомбинации неосновных носителей в p - n -переходе энергия выделяется в виде фотонов, то есть процесс рекомбинации сопровождается световым излучением.

Светодиоды изготавливаются не на основе германия или кремния, как большинство полупроводниковых приборов, а на основе арсенида галлия или фосфида галлия, которые имеют достаточную ширину запрещенной зоны.

Основные параметры светодиодов:

- сила света I_v – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении (мКд);

- яркость излучения равна отношению силы света к площади светящейся поверхности (Кд/см^2);
- постоянное прямое напряжение ($2 \dots 4 \text{ В}$);
- цвет свечения или длина волны, соответствующая максимальному световому потоку;
- максимально допустимый постоянный прямой ток (мА);
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение (В);
- быстродействие излучающего диода, определяемое временем переключения $t_{\text{пер}}$;
- диапазон температур окружающей среды ($t^\circ = -60 \dots +70^\circ \text{C}$);
- срок службы ($104 \dots 106 \text{ ч}$).

Основные характеристики представлены на рисунке 1.17.

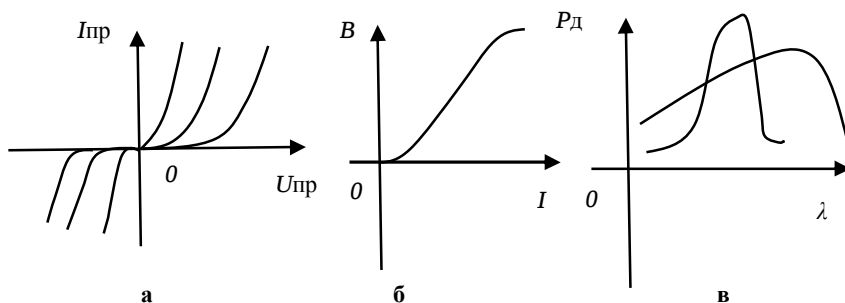


Рис. 1.17. Характеристики светодиодов:

а – вольт-амперные характеристики; б – яркостная характеристика;
в – спектральная характеристика

Применяются светодиоды в устройствах визуального отображения информации, в фотореле, различных датчиках, при создании оптронов, а также в качестве осветительных приборов.

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода. Полупроводниковые приборы, использующие такие пары «светодиод – фотодиод», называются оптронами. Они широко используются в электронной аппаратуре для гальванической развязки входных и выходных цепей.

Принцип действия **туннельных диодов** основан на туннельном эффекте. На прямой ветви ВАХ существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 1.18). Наличие такого

участка позволяет использовать туннельные диоды для усиления и генерации электрических колебаний, а также в переключающих схемах. Туннельные диоды работают в СВЧ-диапазоне.

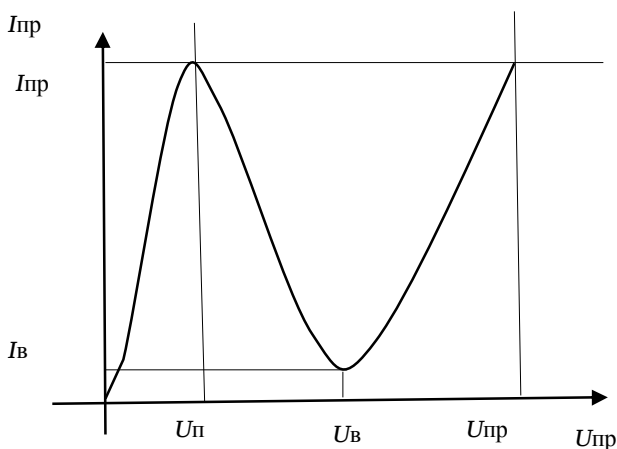


Рис. 1.18. ВАХ туннельного диода

Основные параметры туннельных диодов:

- ток пика $I_{\text{п}}$ — значение прямого тока в точке максимума ВАХ;
- напряжение пика $U_{\text{п}}$ — значение прямого напряжения, соответствующего пиковому току;
- ток впадины $I_{\text{в}}$ — значение прямого тока в точке минимума ВАХ;
- напряжение впадины $U_{\text{в}}$ — значение прямого напряжения, соответствующего току впадины;
- отношение токов $I_{\text{п}}/I_{\text{в}}$;
- прямое напряжение $U_{\text{пр}}$, большее $U_{\text{в}}$ на второй восходящей ветви ВАХ, при котором ток равен пиковому.

Туннельные диоды применяют для усиления и генерации электрических колебаний в диапазоне СВЧ, в импульсных схемах переключателей, в запоминающих устройствах.

1.2.3. Система обозначения полупроводниковых диодов

Полупроводниковые диоды маркируются буквенно-цифровым кодом.

Первый элемент (цифра или буква) кода обозначает исходный полупроводниковый материал, второй (буква) – подкласс приборов, третий (цифра) – основные функциональные возможности прибора, четвертый и пятый – число, обозначающее порядковый номер разработки, шестой элемент – буква, условно определяющая классификацию (разбраковку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии.

Для обозначения *исходного полупроводникового материала* используются следующие символы (первый элемент обозначения):

- 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 (второй элемент обозначения):

- Д – диоды выпрямительные и импульсные;
- Ц – выпрямительные столбы и блоки;
- В – варикапы;
- И – туннельные диоды;
- А – сверхвысокочастотные диоды;
- С – стабилитроны;
- Л – излучающие оптоэлектронные приборы;
- О – оптоэлектронные пары.

Для обозначения *функциональных возможностей* используются цифры (третий элемент обозначения):

- 1 – маломощные выпрямительные диоды;
- 2 – выпрямительные диоды средне мощности;
- 3 – мощные выпрямительные диоды;
- 4 – диодные мосты;
- 5 – импульсные;
- 6 – диоды СВЧ и т. д.

Четвертый и пятый элементы обозначения – двузначное число, указывающее порядковый номер разработки (у стабилитронов – номинальное напряжение стабилизации).

Для обозначения порядкового номера разработки используется двузначное число от 01 до 99. Если порядковый номер разработки превысит число 99, то применяется трехзначное число от 101 до 999.

Например, КД521А – кремниевый импульсный диод, номер разработки 21, группа А, общего применения.

Некоторые дополнительные типы диодов

1. Диоды Шоттки

Кроме полупроводниковых переходов существует также переход «металл-полупроводник», который обозначается как $m-p$ и $m-n$, в зависимости от типа полупроводника [10, 11].

Прямой ток в них создается основными носителями заряда. Накопление заряда в базе отсутствует, а барьерная емкость мала. За счет этого, предельная частота работы составляет 10 ГГц. Диоды Шоттки используют в качестве быстродействующих логарифмических элементов. Диоды Шоттки являются СВЧ-диодами. Они используются в качестве смесительных и детекторных элементов, так как позволяют осуществлять операцию преобразования – переноса спектра СВЧ сигнала в область более низких частот. Также эти диоды используются в качестве переключающе-регулирующих элементов, позволяющих регулировать мощность сигналов СВЧ в волноводных линиях путем изменения внутреннего сопротивления.

2. Импульсные диоды

Они предназначены для работы в качестве ключа, который может иметь два состояния: открыт (когда R_d мало), закрыт (когда R_d велико). Время перехода из одного состояния в другое определяется быстродействием аппаратуры с этими диодами. Длительность процесса переключения определяется временем накопления необходимой концентрации неравновесных носителей в близких к $p-n$ -переходу слоях за счет их диффузии через $p-n$ -переход. В результате прямое напряжение на диоде при его отпирании имеет большую величину, чем в установившемся режиме:

3. Диоды Ганна

В некоторых полупроводниках (например, арсениде галлия GaAs) при воздействии очень сильного электрического поля (105...106 В/м) протекающий через них ток становится прерывистым: происходит группирование электронов проводимости в своеобразные группы, которые движутся от катода к аноду со сравнительно небольшой скоростью – до 10^5 м/с. При этом пока в кристалле движется одна группа, другая не возникает. Таким образом, ток протекает не постоянно, а импульсами, следующими один за другим с очень высокой частотой (до десятков ГГц).

Диоды Ганна сравнительно маломощные (единицы ватт), вследствие малых размеров активных областей и трудностей отвода от них тепла.

Вопросы для самоконтроля

1. Как образуется p - n -переход?
2. Из какого материала изготавливаются светодиоды?
3. На каком физическом явлении основана работа стабилитрона?
4. Какое свойство p - n -перехода используется в выпрямительных диодах?
5. На каком физическом явлении основана работа фотодиода?
6. На каком физическом явлении основана работа светодиода?
7. На каком физическом явлении основана работа туннельного диода?

1.3. Биполярные транзисторы

1.3.1. Типы биполярных транзисторов

Транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами, который имеет три или более электрода. По принципу действия транзисторы делятся на биполярные и полевые (униполярные).

Биполярный транзистор – это управляемый полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами и тремя выводами, работа которого основана на использовании носителей заряда обоих знаков, служит для усиления и переключения электрических сигналов. Плоскостной биполярный транзистор представляет собой пластинку германия (Ge), кремния (Si) или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводимостью: n - p - n или p - n - p . В первом случае средняя область имеет дырочную проводимость и две крайние – электронную (рис. 1.19, а). Во втором случае – наоборот (рис. 1.19, б). Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область эмиттером, а другая – коллектором.

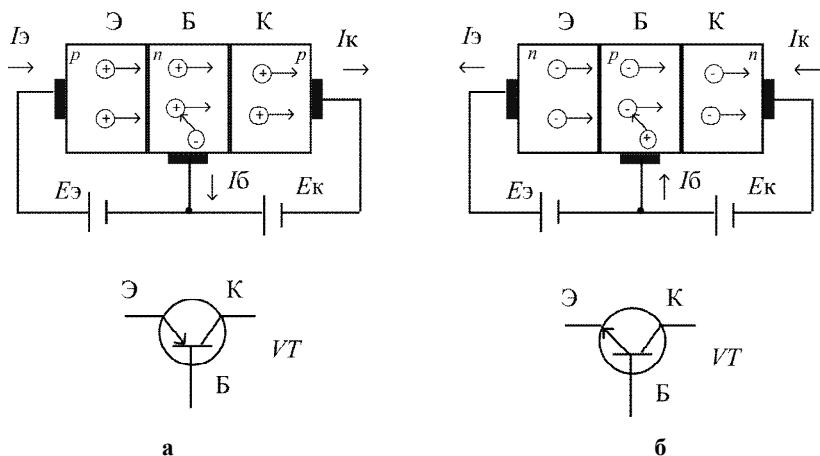


Рис. 1.19. Структура транзистора $n-p-n$ -типа (а) и $p-n-p$ -типа (б)

Таким образом, в транзисторе имеются два $p-n$ -перехода: эмиттерный – между эмиттером и базой и коллекторный – между базой и коллектором. Функция эмиттерного перехода – инжектирование носителей заряда в базу (для транзистора $n-p-n$ – это электроны, для транзистора $p-n-p$ – это дырки); функция коллекторного перехода – сбор носителей заряда, прошедших через базу.

Чтобы носители заряда инжектировались эмиттером и, проходя через базу, полнее собирались коллектором, площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода. Область базы делают очень тонкой. Кроме того, концентрацию примесей в базе делают значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере.

1.3.2. Физические принципы работы транзистора

Различают три основных режима работы биполярного транзистора: активный, отсечки и насыщения. Рассмотрим работу транзистора $p-n-p$ -типа.

В активном режиме эмиттерный переход транзистора смещается в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Под действием прямого напряжения $U_{эб}$ потенциальный барьер эмиттерного перехода снижается и происходит инжекция дырок из эмиттера в базу. Попад в базу, дырки становятся в ней неосновными носителями заряда и под действием сил диффузии движутся к коллекторному $p-n$ -переходу, образуя дырочную составляющую эмиттерного тока I , (рис. 1.20).

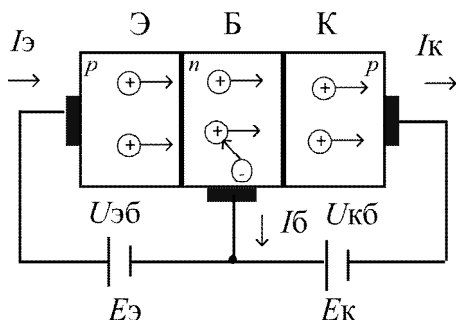


Рис. 1.20. Структура транзистора p - n - p -типа

Часть инжектированных в базу дырок рекомбинирует с имеющимися в ней свободными электронами, но ввиду малой ширины базы основная часть дырок достигает коллекторного p - n -перехода и его электрическим полем перебрасывается в коллектор, образуя составляющую коллекторного тока I_K . Из-за рекомбинации инжектированных дырок в базе $I_K < I_Э$, т.е. $I_K = h_{21}I_Э$.

Коэффициент пропорциональности h_{21} называется *статическим коэффициентом передачи тока эмиттера* (может обозначаться как $\alpha = I_K / I_Э = 0.95 \dots 0.99$, т.е. $I_K = \alpha I_Э$).

Дырки, инжектированные в базу из эмиттера и прорекомбинировавшие в ней, сообщают базе положительный заряд. Для восстановления электрической нейтральности базы в нее из внешней цепи поступает такое же количество электронов, образующих рекомбинационный ток базы $I_Б$. В активном режиме работы транзистора ток базы в десятки и сотни раз меньше токов коллектора и эмиттера: $I_Б = (1 - \alpha)I_Э$.

Поскольку сопротивление коллекторной цепи велико (коллекторный переход смещен в обратном направлении), то протекание по ней изменяющегося и значительного по величине тока I_K позволяет получить в усилителе на транзисторе усиление по напряжению и мощности.

Режим отсечки транзистора получается в том случае, если под действием внешних напряжений эмиттерный и коллекторный p - n -переход смещены в обратном направлении. В этом случае через оба p - n -перехода протекают незначительные обратные токи эмиттера коллектора. Ток базы равен сумме этих токов.

В режиме насыщения оба p - n -перехода – эмиттерный и коллекторный – смещены в прямом направлении, и инжекция дырок в базу осуществляется, как из эмиттера, так и из коллектора. Поскольку в базе эти потоки неосновных носителей направлены навстречу друг другу, то суммарный ток в цепи коллектор – эмиттер определяется разностью этих токов.

В режимах отсечки и насыщения управление токами транзистора почти отсутствует. Эти режимы используются при работе транзисторов в импульсных и ключевых устройствах. Для усиления сигналов применяется активный режим работы транзистора [2, 3, 17].

Работа транзистора n - p - n -типа происходит аналогично работе транзистора p - n - p -типа. В этом случае носителями тока являются электроны, и полярность внешних источников напряжений меняется на противоположную.

1.3.3. Схемы включения, характеристики и параметры транзистора

Имеются три способа включения транзистора в зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей: схема с общей базой (ОБ), схема с общим эмиттером (ОЭ) и схема с общим коллектором (ОК). Схемы включения транзистора приведены на рисунке 1.21.

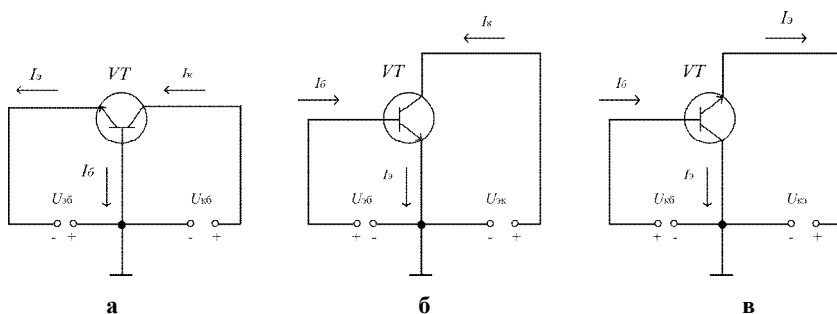


Рис. 1.21. Схемы включения транзистора: а – ОБ; б – ОЭ; в – ОК

Схема с общей базой (ОБ)

Входной ток в схеме с ОБ – ток эмиттера $I_{\text{э}}$, а выходной – ток коллектора $I_{\text{к}}$. В схеме с ОБ $I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$.

Коэффициент усиления (передачи) тока представляет собой отношение тока коллектора к току эмиттера $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_3$, имеет величину меньше единицы, т. е. не обеспечивает усиления тока. Если сопротивление нагрузки достаточно велико, то амплитуда переменной составляющей выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ значительно больше амплитуды входного напряжения $U_{\text{вх}}$, т. е. схема с ОБ усиливает напряжение и мощность.

Схема с общим эмиттером (ОЭ)

Входным током является ток базы i_b , а выходным – ток коллектора I_k . Коэффициент передачи по току $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$, где $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$, $\beta \gg 1$ ($\beta = 10 \dots 200$).

Так как $i_{\text{вых}} \gg i_{\text{вх}}$, а при достаточно большом сопротивлении R_n , амплитуда переменной составляющей выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ значительно больше амплитуды входного напряжения $U_{\text{вх}}$, следовательно, схема обеспечивает усиление тока, напряжения и мощности. Входной ток схемы достаточно мал, поэтому входное сопротивление больше, чем у схемы с общей базой.

Схема с общим коллектором (ОК)

Входная цепь – цепь базы, выходная – цепь эмиттера. В этой схеме коллектор является общим для входной и выходной цепей по переменному току.

Коэффициент передачи тока в этой схеме:

$\beta = I_3 / I_b = I_3 / (I_3 - I_k) = 1 / (1 - \alpha) = \beta + 1$, т. е. схема с ОК имеет максимальный коэффициент усиления по току. Эта схема отличается от схем с ОБ и ОЭ тем, что она не переворачивает фазу входного сигнала.

Коэффициент усиления по напряжению $K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} \ll 1$. Поэтому усилительные каскады с общим коллектором называют эмиттерными повторителями. Схема усиливает ток, но не усиливает напряжение и отличается повышенным входным сопротивлением.

Сравнение трех схем включения транзисторов приведено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная таблица основных параметров трех схем включения транзистора

Параметры	Схемы включения транзистора		
	ОБ	ОЭ	ОК
Входное сопротивление	Низкое ($\leq 100 \text{ Ом}$)	Среднее ($\leq 2 \text{ КОм}$)	Высокое ($0,2 \dots 1 \text{ МОм}$)

Параметры	Схемы включения транзистора		
	ОБ	ОЭ	ОК
Выходное сопротивление	Высокое (0,5...1 МОм)	Среднее (20...100 КОм)	Низкое (50...500 Ом)
Усиление по току	< 1	≤ 200	10...200
Усиление по напряжению	≤ 500	≤ 500	≤ 1

Обычно используют два вида вольтамперных характеристик: входные и выходные статические характеристики (рис. 1.22).

Для схемы с ОЭ входной характеристикой называют зависимость входного тока или тока базы $I_б$ от напряжения базы – эмиттер $U_{бэ}$. Выходной характеристикой называют зависимость $I_к$ от $U_{кэ}$ при фиксированных значениях $I_б = \text{const}$.

Для схемы с ОБ входная характеристика – это зависимость $I_э = f(U_{эб})$, а выходная – $I_к = f(U_{кб})$.

Для схемы с ОК входная характеристика – $I_б = f(U_{кб})$, а выходная – характеристикой является $I_э = f(U_{эк})$.

На практике наиболее часто используется схема с общим эмиттером. Поэтому рассмотрим характеристики биполярного транзистора с ОЭ (рис. 1.22).

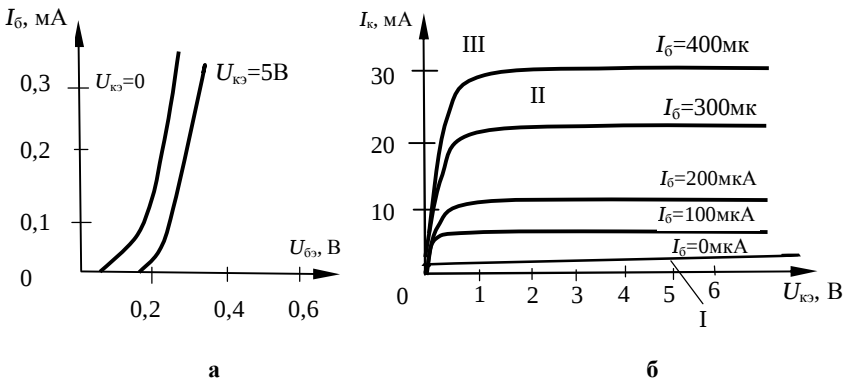


Рис. 1.22. Статические ВАХ биполярного транзистора:
а – входные; б – выходные

Входные статические характеристики представляют собой вольт-амперные характеристики эмиттерного перехода, смещенного в

прямом направлении. Увеличение напряжения на этом переходе приводит к увеличению тока эмиттера и, следовательно, тока базы. Из-за внутренней обратной связи в транзисторе, осуществляемой через базу, коллекторное напряжение также оказывает влияние на входной ток. Однако это влияние сказывается при небольших напряжениях $U_{кб}$ и $U_{кэ}$. При дальнейшем увеличении коллекторного напряжения входной ток почти не изменяется. Поэтому входные характеристики обычно представляются лишь двумя кривыми, снятыми при коллекторном напряжении, равном нулю, и некотором отрицательном (для транзисторов $p-n-p$ -типа) или положительном (для транзисторов $n-p-n$ -типа) напряжении.

Выходные статические характеристики БТ – это вольт-амперные характеристики коллекторного перехода, смещенного в обратном направлении. Их вид также зависит от способа включения транзистора и напряжения на эмиттерном переходе.

На выходных статических характеристиках схемы ОЭ крутой участок характеристик при малых напряжениях $U_{кэ}$ соответствует режиму насыщения, при котором эмиттерный и коллекторный $p-n$ -переходы смещены в прямом направлении. При увеличении напряжения $U_{кэ}$ коллекторный переход запирается, и характеристики становятся более пологими. С ростом тока базы увеличивается и ток коллектора.

Повышение температуры вызывает увеличение токов транзистора и приводит к смещению его характеристик. Особо сильно температура влияет на входные характеристики в схеме ОЭ.

На выходных характеристиках можно выделить три области, свойственные трем режимам работы транзисторов:

- область I – режим отсечки, когда эмиттерный и коллекторный переходы закрыты;
- область II – режим усиления, когда эмиттерный переход – открыт, а коллекторный переход закрыт;
- область III – режим насыщения, когда эмиттерный и коллекторный переходы открыты.

1.3.4. Динамический и ключевой режимы работы биполярного транзистора

Динамическим режимом работы транзистора называется такой режим, при котором в выходной цепи стоит нагрузочный резистор, за счет которого изменение входного тока или напряжения будет вызывать изменение выходного напряжения (рис. 1.23).

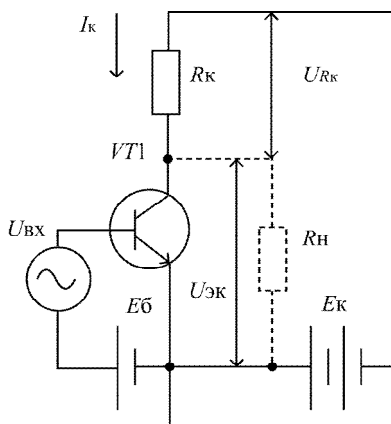


Рис. 1.23. Схема включения БТ с ОЭ, работающего в динамическом режиме

Из рисунка видно (по второму закону Кирхгофа), что $E_K = U_{R_K} + U_{КЭ}$, т. к. $U_{R_K} = I_K R_K$, то $E_K = I_K R_K + U_{КЭ}$ – уравнение нагрузочной прямой. Откуда получаем уравнение динамического режима работы транзистора:

$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_K.$$

Выбор рабочей точки осуществляется путем построения нагрузочной прямой (по уравнению нагрузочной прямой) на семействе выходных характеристик транзистора. При $I_K = 0$, $E_K = U_{КЭ}$; при $U_{КЭ} = 0$, $I_K = E_K / R_K$ (рис. 1.24).

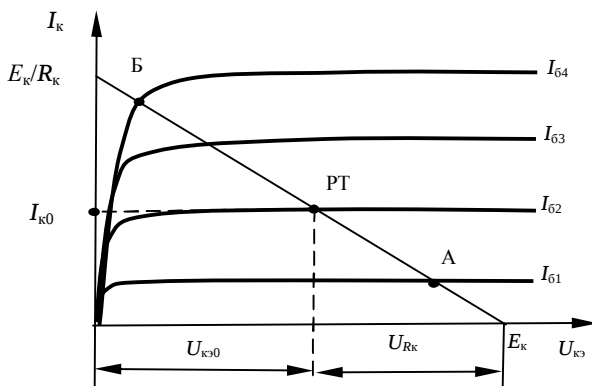


Рис. 1.24. Построение нагрузочной прямой на семействе выходных характеристик транзистора и определение положения рабочей точки

Отрезок АВ – рабочий участок нагрузочной прямой. Рабочую точку (РТ) выбирают посередине рабочего участка нагрузочной прямой АВ, но на пересечении с характеристикой транзистора.

Точка А соответствует точке отсечки, а точка В соответствует точке насыщения транзистора. Ключевым режимом называется такой режим, при котором рабочая точка скачком переходит из режима насыщения в режим отсечки (из точки В в точку А) и, наоборот, (из точки А в точку В), минуя линейный режим (рис. 1.25). В этом случае, транзистор будет работать как ключ, т. е. иметь два состояния: открытое и закрытое. Ключевой режим позволяет получить на выходе транзистора импульсный сигнал.

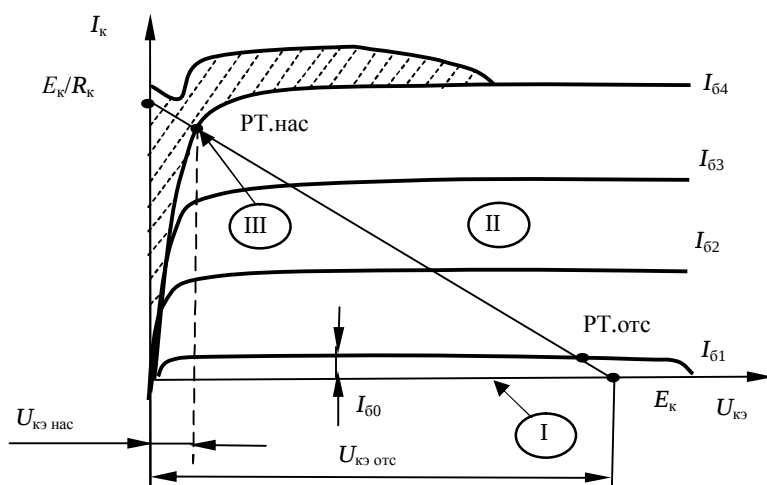


Рис. 1.25. Ключевой режим работы БТ

1.3.5 h -параметры биполярного транзистора

При работе транзистора в усилительных схемах важную роль играют переменные сигналы с малыми амплитудами. Свойства транзистора в этом случае определяются так называемыми мало-сигнальными параметрами, или h -параметрами.

Кроме h -параметров используются также y -параметры и z -параметры. Все y -параметры имеют размерность проводимости, а все z -параметры – размерность сопротивлений. Однако их измерение

сопряжено со значительными практическими трудностями, в то время как h -параметры измеряются сравнительно легко.

Если рассмотреть транзистор как четырехполюсник (рис. 1.26), то связь между входными (U_1, I_1) и выходными (U_2, I_2) напряжениями и токами четырехполюсника выражается двумя уравнениями.

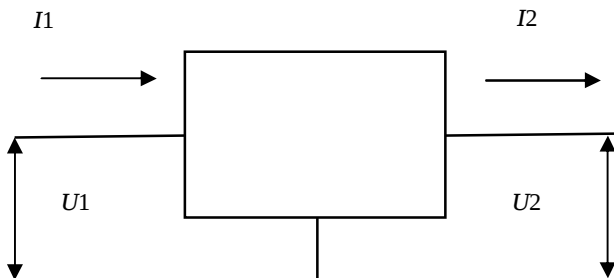


Рис. 1.26. Транзистор как четырехполюсник

$$\Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2.$$

Параметры, входящие в эти уравнения, определяются с использованием двух режимов:

1) режим короткого замыкания для переменного тока на выходе, т. е. при отсутствии нагрузки в выходной цепи. При этом $U_2 = \text{const}$.

2) режим холостого хода, т. е. при разомкнутой для переменного тока цепи, когда во входной цепи имеется только постоянный ток, $I_1 = \text{const}$.

Эти режимы, или эти условия, легко осуществить на практике при измерении h -параметров.

В систему h -параметров входят следующие величины:

1) $h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1$ (при $U_2 = \text{const}$) – входное сопротивление транзистора при отсутствии переменного напряжения. При таком условии изменение входного тока ΔI_1 является результатом изменения входного напряжения ΔU_1 .

2) $h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2$ (при $I_1 = \text{const}$) – коэффициент обратной связи по напряжению, показывает, какая доля выходного напряжения передается на вход транзистора вследствие наличия в нем внутренней обратной связи.

3) $h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1$ (при $U_2 = \text{const}$) – коэффициент передачи (усиления) по току, показывает, что изменение выходного тока ΔI_2 зависит только от изменения входного тока ΔI_1 .

4) $h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2$ (при $I_1 = \text{const}$) – выходная проводимость для переменного тока на выходе транзистора.

Значения h -параметров зависят от схемы включения БТ в электрическую цепь и могут быть измерены как непосредственно, так и определены по входной и выходной характеристикам транзистора.

Биполярный транзистор можно представить схемой замещения в h -параметрах (рис. 1.27).

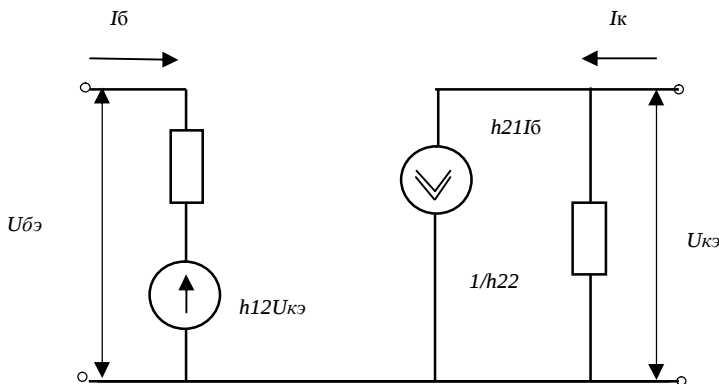


Рис. 1.27. Схема замещения биполярного транзистора в h -параметрах

Вопросы для самоконтроля

1. В чем отличие транзисторов n - p - n -типа от транзисторов p - n - p типа?
2. Назовите основные параметры биполярного транзистора.
3. В каком случае биполярный транзистор находится в активном режиме?
4. В каком случае биполярный транзистор работает в ключевом режиме?
5. В каком случае биполярный транзистор работает в динамическом режиме?
6. Объясните работу биполярного транзистора n - p - n -типа.
7. Что представляют собой входные и выходные ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ (ОБ, ОК)?
8. Как определить h -параметры биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ (ОБ, ОК)?

1.4. Полевые транзисторы

Полевым транзистором (ПТ) называется транзистор, в котором между двумя электродами образуется *проводящий канал*, по которому протекает ток. Ток канала управляется электрическим полем, создаваемым третьим электродом, который называется *затвором* (З). Электрод, от которого начинают движение носители заряда, называется *истоком* (И), а электрод, к которому они движутся – *стоком* (С). Полевые транзисторы называют также униполярными, так как принцип действия их основан на использовании носителей заряда только одного знака.

1.4.1 Классификация и условное обозначение полевых транзисторов

Полевые транзисторы по типу электропроводности подразделяются на *n*-канальные и *p*-канальные; каждый тип транзистора в свою очередь бывает с управляющим *p-n*-переходом и с изолированным затвором (МДП-транзисторы и МОП-транзисторы) (рис. 1.28). МДП (МОП)-транзисторы делятся на транзисторы со встроенным каналом (обедненного типа) и с индуцированным каналом (обогащенного типа).



Рис. 1.28. Классификация и условное обозначение полевых транзисторов

1.4.2. Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом

Рассмотрим транзистор с управляющим p - n -переходом, n -канальный. Конструктивно такой транзистор представляет собой пластинку полупроводника n -типа с двумя p - n -переходами и тремя выводами (рис. 1.29).

Конструкция

Оба p -слоя электрически связаны между собой и имеют общий электрод, называемый затвором (З). Между p - n -переходами располагается канал, в данном случае n -типа. Управляющее (или входное) напряжение подается между затвором (З) и истоком (И). Напряжение $U_{зи}$ является обратным для обоих p - n -переходов. В выходную цепь, в которую входит канал транзистора, подключается напряжение $U_{си}$ положительным полюсом к стоку.

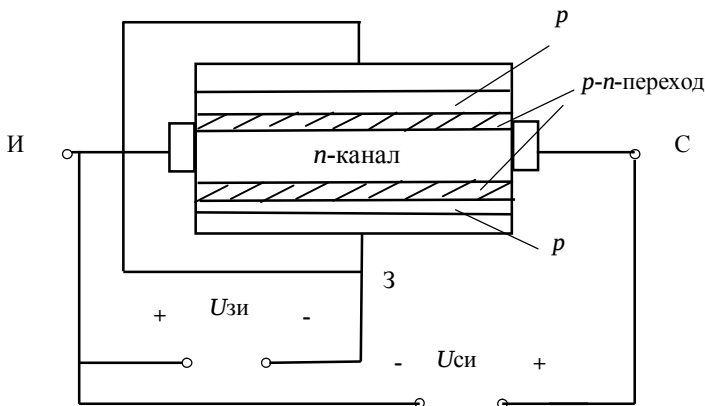


Рис. 1.29. Конструкция транзистора с управляющим p - n -переходом (n -канального)

Принцип работы

Если к электродам подключить напряжение питания, то между истоком и стоком будет протекать ток, величина которого зависит от напряжения на затворе. То есть принцип работы сводится к тому, что при изменении напряжения $U_{зи}$ изменяется ширина p - n -переходов, которые представляют собой участки полупроводника, обедненные носителями заряда. Так как p -слой имеет большую концентрацию примесей, чем n -слой, то изменение ширины переходов происходит в основном за счет более высокоомного n -слоя,

тем самым изменяется сечение токопроводящего канала и его проводимость, следовательно, и выходной ток I_c . Максимальный ток стока I_c будет при нулевом напряжении на затворе.

На проводимость канала полевого транзистора оказывает влияние как управляющее напряжение $U_{зи}$, так и напряжение $U_{си}$.

Напряжение на затворе, при котором ток стока I_c минимален, называется напряжением отсечки $U_{зи\text{ отс}}$.

Характеристики полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом:

– стоковые (или выходные) (рис. 1.30, а):

$$I_c = f(U_{си}) / U_{зи} = \text{const.}$$

– стоко-затворные (или переходные) (рис. 1.30, б):

$$I_c = f(U_{зи}) / U_{си} = \text{const.}$$

Характеристики представлены для n -канального транзистора. Для p -канального транзистора полярность приложенных напряжений будет обратной и, соответственно, характеристики будут лежать в других координатных плоскостях.

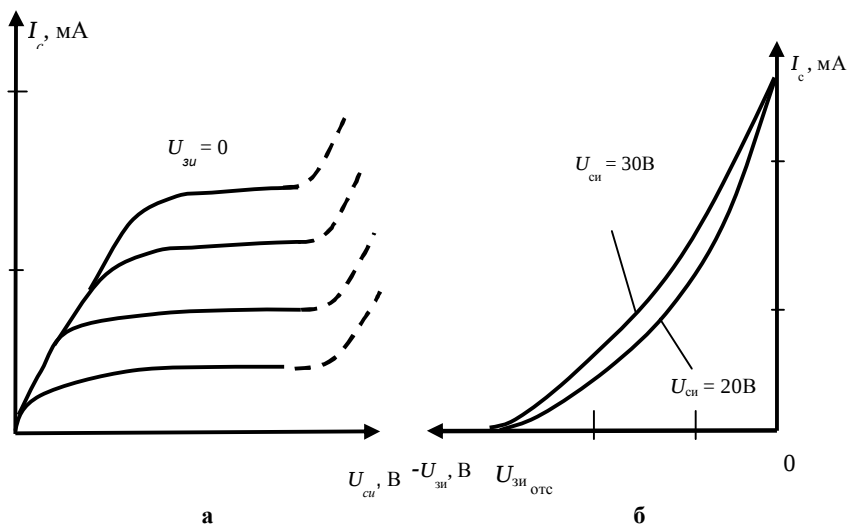


Рис. 1.30. Характеристики полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом: а – стоковая; б – стоко-затворная

Явление насыщения объясняется тем, что при повышении напряжения $U_{си}$ ток I_c должен увеличиваться, но так как одновременно повышается обратное напряжение на p - n -переходе, то запирающий слой расширяется, а канал сужается, т. е. его сопротивление возрастает, и ток I_c должен уменьшаться. То есть имеют место два взаимно противоположных воздействия на ток, который в результате остается почти постоянным. При увеличении отрицательного напряжения $U_{зи}$ (для рассматриваемого n -канального транзистора) ток стока I_c уменьшается.

Свойства ПТ характеризуются дифференциальными параметрами.

Параметры полевых транзисторов:

– крутизна $S = \frac{dI_c}{dU_{си}} | U_{зи} = const;$

– внутреннее (выходное) сопротивление

$$R_i = \frac{dU_{си}}{dI_c} | U_{зи} = const;$$

– статический коэффициент усиления

$$m = - \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} | I_c = const.$$

Коэффициент усиления выражается отношением таких изменений напряжений, которые компенсируют друг друга по действию на ток I_c . Для такой компенсации напряжения должны иметь разные знаки, отсюда знак минус. Этот коэффициент может быть определен как $m = S \times R_i$.

К параметрам также относятся:

– входные сопротивления $R_{вх} = \frac{dU_{зи}}{dI_3} | U_{си} = const;$

– межэлектродные барьерные емкости:

– $C_{зи}$ – входная емкость;

– $C_{зс}$ – проходная емкость между $З$ и $С$;

– $C_{си}$ – выходная емкость.

1.4.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП и МОП)

В отличие от полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом, в которых затвор имеет непосредственный электрический контакт с

областью токопроводящего канала, в МДП- транзисторах затвор изолирован от канала слоем диэлектрика. Название МДП-транзистор пошло от его структуры: металл – диэлектрик – полупроводник или металл – окисел – полупроводник.

МДП-транзисторы со встроенным каналом

Конструкция

МДП-транзисторы со встроенным каналом n -типа создается в полупроводнике с электропроводностью p -типа (рис. 1.31), в котором имеются две области с повышенной проводимостью n^+ - типа. Эти области являются стоком и истоком. Между ними имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью n -типа.

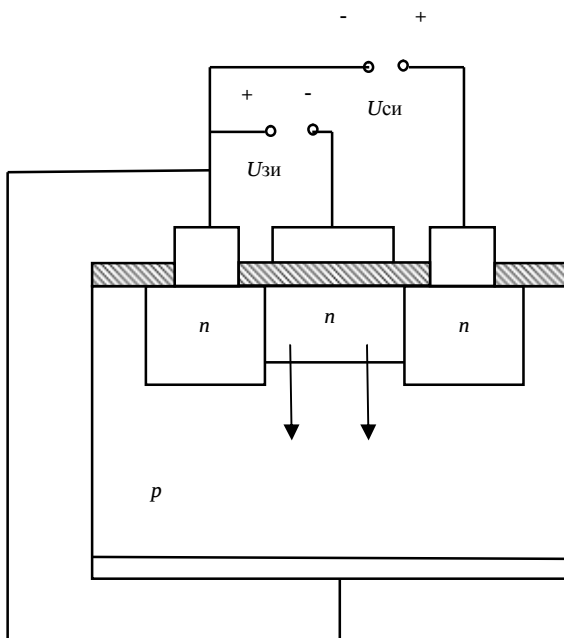


Рис. 1.31. Конструкция МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Толщина диэлектрического слоя составляет примерно 3...5 нм. Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. В МДП-транзисторе обычно делают четвертый электрод, которым является подложка (в нашем примере пластина p -типа).

Принцип работы

Если при напряжении $U_{зи} = 0$ приложить напряжение между стоком и истоком $U_{си}$, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов.

При подаче напряжения $U_{зи} < 0$ в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны проводимости выталкиваются из канала в кристалл. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается, ток I_c уменьшается. Чем больше напряжение $U_{зи}$, тем меньше ток стока I_c . Такой режим транзистора называют режимом обеднения.

Если напряжение $U_{зи} > 0$, то под действием поля, созданного этим напряжением, из кристалла в канал будут приходить электроны, проводимость канала увеличится, и ток стока I_c возрастет. Этот режим называют режимом обогащения.

Все эти физические процессы наглядно выражаются выходной (стоковой) характеристикой (рис. 1.32, а).

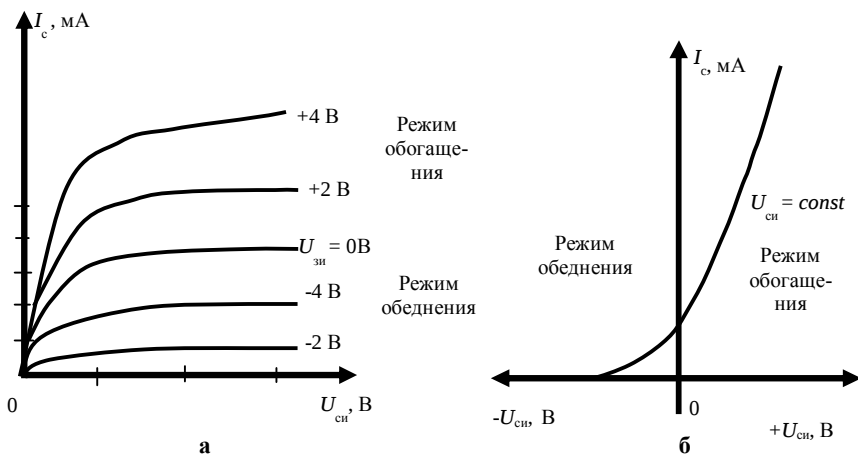


Рис. 1.32. Выходная (а) и стоко-затворная характеристики (б) МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа

По выходной характеристике можно построить стоко-затворную (переходную) характеристику (рис. 1.32, б).

МДП-транзистор с индуцированным (инверсным) каналом

Конструкция такого транзистора отличается от конструкции транзистора с встроенным каналом тем, что канал проводимости

здесь специально не создается, а возникает (индуцируется) только при подаче на затвор напряжения определенной полярности (рис. 1.33). При отсутствии этого напряжения канала нет, между истоком и стоком n^+ -типа есть только кристалл p -типа, и на одном из p - n^+ -переходов получается обратное напряжение.

Принцип работы

Сопротивление между истоком и стоком велико, транзистор закрыт. Но если подать на затвор в данном случае положительное напряжение, то под влиянием поля затвора электроны проводимости будут перемещаться из областей стока, истока и кристалла к затвору. Когда напряжение $U_{зи}$ превысит некоторое отпирающее или пороговое напряжение $U_{пор}$, то в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличится, что превысит концентрацию дырок, произойдет инверсия типа электропроводности, т. е. образуется канал n -типа и транзистор начнет проводить ток.

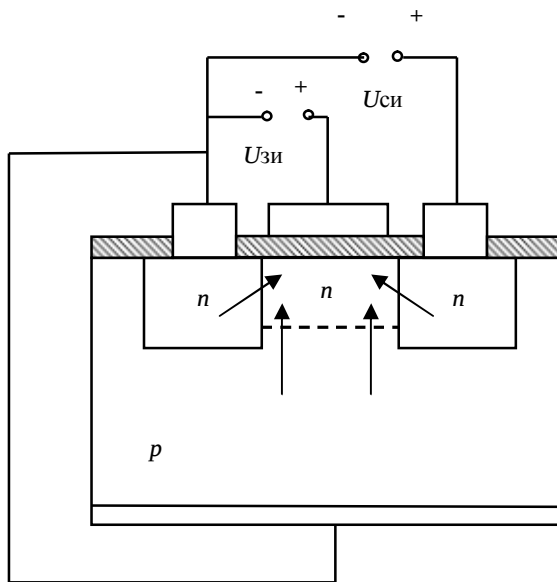


Рис. 1.33. Конструкция МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

Чем больше положительное напряжение $U_{зи}$, тем больше проводимость канала и ток стока. То есть такой транзистор может работать только в режиме обогащения, что показывают его выходные характеристики и переходная характеристика (рис. 1.34).

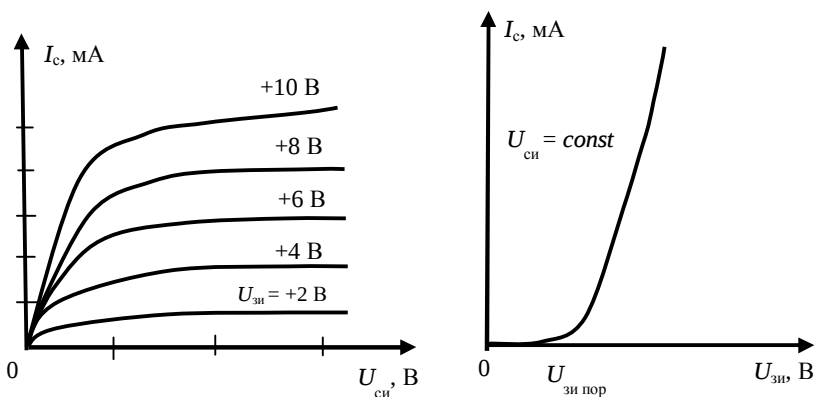


Рис. 1.34. Выходная (а) и стоко-затворная (б) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

1.4.4. Схемы включения ПТ и их особенности

Полевые транзисторы по аналогии с биполярными имеют три схемы включения: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ).

Схема с общим истоком (рис. 1.35) аналогична схеме с ОЭ. Она дает большое усиление по току и по мощности и так же, как схема с ОЭ, переворачивает фазу напряжения при усилении.

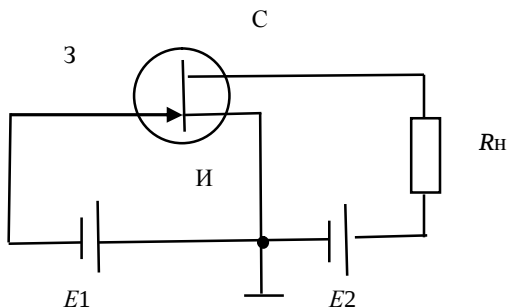


Рис. 1.35. Схема с ОИ

Схема с общим затвором (рис. 1.36) аналогична схеме с общей базой (ОБ).

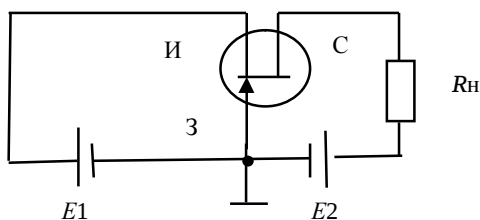


Рис. 1.36. Схема с ОЗ

Она не дает усиления по току, поэтому усиление по мощности в ней во много раз меньше, чем в схеме с ОИ. Входное сопротивление $R_{вх}$ мало, так как входным током является ток стока (в реальных схемах используется редко).

Схема с общим стоком (рис. 1.37) подобна схеме с ОК (эмиттерному повторителю) и может быть названа истоковым повторителем с $K_U \approx 1$.

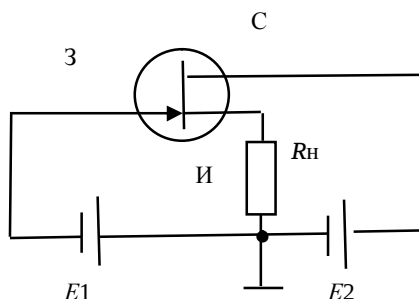


Рис. 1.37. Схема с ОС

Выходное напряжение по величине и фазе повторяет входное. Для такой схемы характерно небольшое выходное сопротивление и повышенное входное сопротивление.

Полевые транзисторы широко используются в усилителях, генераторах и другой радиоэлектронной аппаратуре. Они являются основой для разработки современных средств вычислительной техники, включая микропроцессоры, микроконтроллеры, полупроводниковую память.

1.4.5. Маркировка транзисторов

1 – буква или цифра: Г(1), К(2), А(3) – материал: германий, кремний, арсенид галлия;

- 2 – буква: П – полевой, Т – биполярный;
 3 – цифра, указывающая диапазон основных параметров (мощность и частотные свойства, указаны в таблице 2);
 4 и 5 – двузначное число, указывающее порядковый номер разработки;
 6 – буква, обозначающая параметрическую группу прибора.

Таблица 2

К определению третьего символа в маркировке транзистора

$P \setminus f$	НЧ < 3 МГц	Ср 3...30 МГц	ВЧ и СВЧ > 30 МГц
ММ < 0,3 Вт	1	2	3
СрМ 0,3...3 Вт	4	5	6
М > 3Вт	7	8	9

Например, КТ315А – транзистор биполярный высокочастотный, малой мощности, широкого применения, номер разработки 15, группа А; КП302А – транзистор полевой высокочастотный, малой мощности, широкого применения, номер разработки 02, группа А.

Преимущества полевых транзисторов перед биполярными:

1. Высокое входное сопротивление в схеме с ОИ.
2. Малый уровень собственных шумов, так как перенос тока осуществляют только основные носители заряда.
3. Высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий.
4. Высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных схем.

1.4.6. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

Биполярный транзистор с изолированным затвором (*IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistors*) – полностью управляемый полупроводниковый прибор, основой которого является трехслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком. На рисунке 1.38 приведено условное обозначение биполярного транзистора с изолированным затвором (*IGBT*) [11].

Данные приборы *IGBT* являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл-оксид-полупроводник, управляемых электрическим полем (*MOSFET-Metal-Oxid-Semiconductor-*

Field-Effect-Transistor) и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Эквивалентная схема включения двух транзисторов приведена на рисунке 1.39. Прибор введен в силовую цепь выводами биполярного транзистора *E* (эмиттер) и *C* (коллектор), а в цепь управления – выводом *G* (затвор).

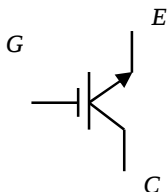


Рис. 1.38. Условное обозначение *IGBT*

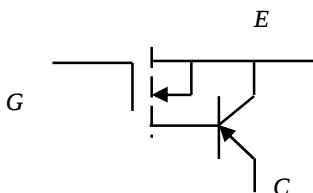


Рис. 1.39. Схема соединения транзисторов в единой структуре *IGBT*

Таким образом, *IGBT* имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включенном состоянии.

Современные *IGBT*-модули находят широкое применение при создании неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов для питания электродвигателей постоянного и переменного тока средней мощности, преобразователей индукционного нагрева, сварочных аппаратов, источников бесперебойного питания и бытовой техники.

1.4.7. Однопереходный транзистор

Однопереходный транзистор (иначе называемый двухбазовым диодом) имеет только один *p-n*-переход и по структуре напоминает полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом, но принцип его

работы другой. В однопереходном транзисторе (рис. 1.40, а) эмиттер типа p^+ образует с базой n -типа p^+-n -переход, на который в отличие от полевого транзистора подается не обратное, а прямое напряжение. Выходной ток $i_{\text{вых}}$, протекающий через базу, создает внутри нее на участке от эмиттера до Б1 падение напряжения $U_{\text{вн}}$, которое является обратным для эмиттерного перехода и запирает его.

Когда внешнее прямое напряжение $U_{\text{эб1}} = E1 + U_{\text{вх}}$ станет больше внутреннего напряжения $U_{\text{вн}}$, то результирующее напряжение на переходе станет прямым, переход отпирается и дырки будут двигаться по направлению к выводу Б1, образуя эмиттерный ток. Сопротивление базы при этом уменьшается. Переход откроется, что приведет к дальнейшему нарастанию тока эмиттера (получается лавинообразный процесс нарастания тока эмиттера). Это соответствует отрицательному дифференциальному сопротивлению, как у туннельного диода. Поэтому такой транзистор используется для построения переключающих схем.

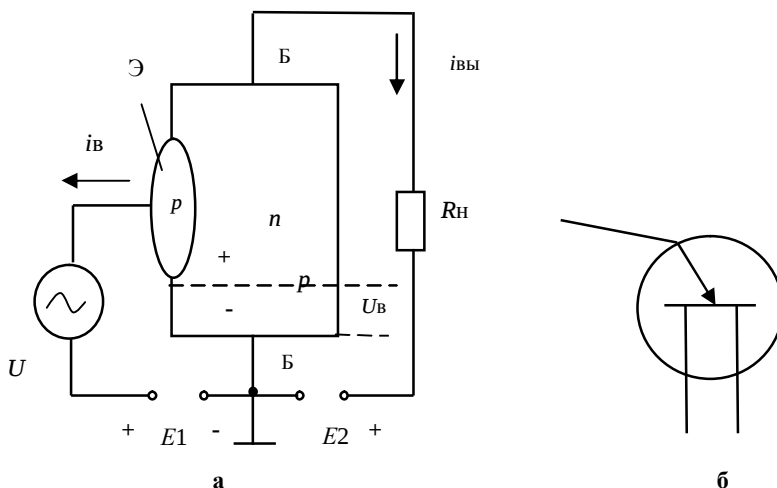


Рис. 1.40. Схема (а) и условное графическое изображение (б) однопереходного транзистора

Однопереходные транзисторы применяются также для усиления, генерации, в импульсных схемах, являются низкочастотными приборами [3, 10].

Вопросы для самоконтроля

1. Какие типы полевых транзисторов вы знаете?

2. Назовите основные параметры полевых транзисторов.
3. Как осуществляется управление током стока в транзисторе с управляющим p - n -переходом?
4. Сравните ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом и со встроенным каналом.
5. Назовите особенности каждой из схем включения полевых транзисторов.
6. Назовите основные отличия полевых транзисторов от биполярных. Укажите их достоинства и недостатки.
7. Особенности *IGBT*-транзисторов.
8. Особенности однопереходных транзисторов.

1.5. Тиристоры

Тиристор – полупроводниковый переключающий прибор, обладающий двумя устойчивыми состояниями: низкой проводимости (тиристор закрыт) и высокой проводимости (тиристор открыт). Они применяются как мощные электронные ключи, имеют три и более p - n -переходов. Тиристоры нашли применение в силовой электронике, где требуется формирование мощных питающих напряжений постоянного или переменного тока. На основе тириستоров разрабатываются, например, устройства регулирования частотой вращения электродвигателей.

Тиристоры подразделяются на три основных типа:

- динисторы (с двумя электродами);
- тринисторы (с тремя электродами);
- симисторы (симметричные тиристоры).

1.5.1. Диодный тиристор (динистор)

Диодный тиристор состоит из четырех областей полупроводника с чередующимися типами электропроводности, между которыми образуются три p - n -перехода. Крайнюю область p -типа называют анодом, а крайнюю область n -типа – катодом (рис. 1.41, а). При подключении источника питания плюсом к аноду динистора, а минусом к катоду переходы П1 и П3 окажутся смещенными в прямом направлении (будут открыты), а средний П2 – в обратном направлении (будет закрыт). То есть переходы П1 и П3 являются эмиттерными, а переход П2 –

На рисунке 1.42 представлена ВАХ диодного тиристора. При увеличении прямого напряжения $U_{пр}$, ток невелик и его величина растет медленно, что соответствует участку ОА. В этом режиме тиристор можно считать закрытым, так как все напряжение падает на закрытом коллекторном переходе. На переходах П1 и П3 окажется очень незначительное прямое напряжение, инжекция носителей заряда из эмиттеров в базы будет невелика, и через тиристор будет протекать небольшой прямой ток.

При некотором значении прямого напряжения, называемого напряжением включения $U_{вкл}$, энергия носителей заряда, проходящих через коллекторный переход, увеличивается настолько, что они

начинают ионизировать атомы этого перехода. Лавинообразное увеличение носителей заряда приводит к резкому уменьшению сопротивления перехода П2, ток при этом резко возрастает (участок АБ с отрицательным дифференциальным сопротивлением на рисунке 1.42). То есть возникает лавинообразный процесс быстрого отпирания тиристора.

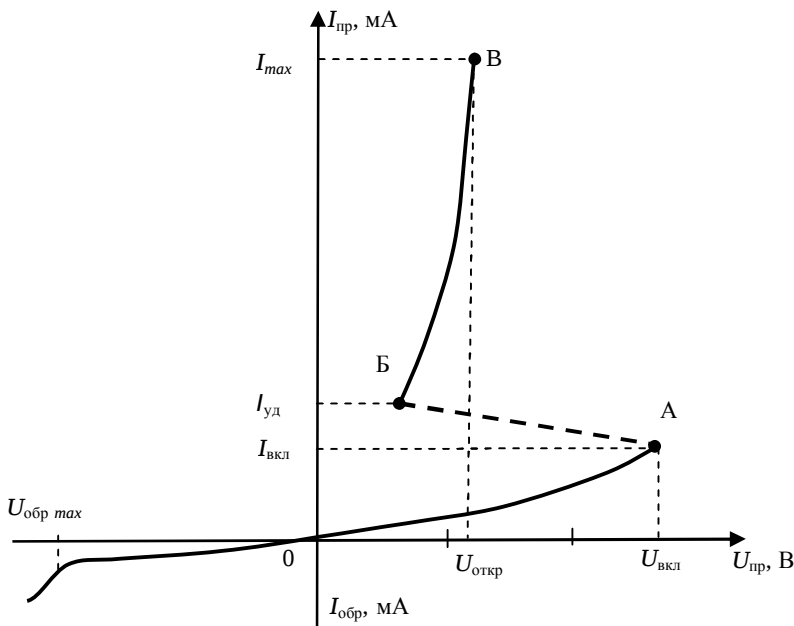


Рис. 1.42. ВАХ диодного тиристора

После переключения динистора в открытое состояние его ВАХ аналогична прямой ветви выпрямительного диода. В открытом состоянии динистор находится до тех пор, пока через него протекает ток, не меньший тока удержания $I_{уд}$ (участок БВ на рисунке 1.42). Ток в этом режиме, когда тиристор открыт, определяется главным образом сопротивлением нагрузки R_n , включенным последовательно с тиристором.

Если изменить полярность подключения внешнего источника напряжения на противоположную (минус к аноду, а плюс к катоду), то эмиттерные переходы П1 и П3 окажутся смещенными в обратном направлении, и через динистор будет протекать маленький обратный ток при достаточно большом напряжении $U_{обр}$.

Параметры динистора:

- $I_{\max}$ – максимальное значение прямого тока;
- $U_{\text{откр}}$ – напряжение в открытом состоянии тиристора;
- $I_{\text{уд}}$ – ток удержания, минимальное значение анодного тока, который удерживает тиристор в открытом состоянии;
- $t_{\text{вкл}}$ и $t_{\text{выкл}}$ – время включения и время выключения тиристора;
- $U_{\text{обр.мах}}$ – обратное максимальное напряжение, при котором обеспечивается заданная надежность.

1.5.2. Триодный тиристор (тринистор)

Если от одной из базовых областей динистора сделать вывод, который называется управляющим электродом, то получается управляемый переключающий прибор, называемый триодным тиристором. Управляющий электрод может быть сделан от области, ближайшей к аноду, тогда он называется тиристором с управлением по аноду; либо управляющий электрод может быть сделан от области, ближайшей к катоду, тогда он называется тиристором с управлением по катоду (условные графические обозначения приведены на рисунке 1.47). Подавая через этот электрод напряжение от внешнего источника, можно регулировать значение напряжения включения $U_{\text{вкл}}$. Чем больший ток течет через такой управляющий переход I_y , тем ниже напряжение включения $U_{\text{вкл}}$. Вольтамперная характеристика (ВАХ) триодного тиристора для различных токов управляющего электрода I_y представлена на рисунке 1.43.

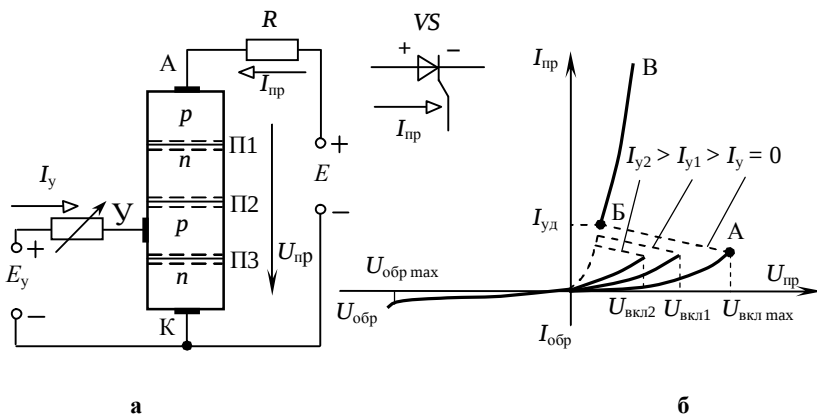


Рис. 1.43. Структура триодного тиристора (а), ВАХ триодного тиристора (б)

Ток управления $I_{y1} = 0$, $I_{y2} > I_{y1}$, $I_{y3} > I_{y2}$. Чем больше ток I_y , тем больше инжекция носителей зарядов от соответствующего эмиттера к среднему коллекторному переходу П2 и тем меньше требуется напряжение на тиристоре для того, чтобы начался процесс отпирания.

Наиболее высокое значение напряжения $U_{вкл}$ получается при отсутствии тока I_y , когда триодный тиристор превращается в диодный. И, наоборот, при значительном I_y напряжение включения $U_{вкл}$ минимально.

Для запираания тиристора необходимо уменьшить его анодный ток до значения меньше тока удержания $I_{уд}$. Такие тиристоры называют *незапираемыми*. У *запираемых* тиристоров необходимо подать на управляющий электрод напряжение противоположной полярности.

Простейшая схема включения триодного тиристора показана на рисунке 1.44. Как уже говорилось выше, такой тиристор называют тиристором с управлением по катоду, поскольку управляющим электродом является базовая область, ближайшая к катоду (к n -области).

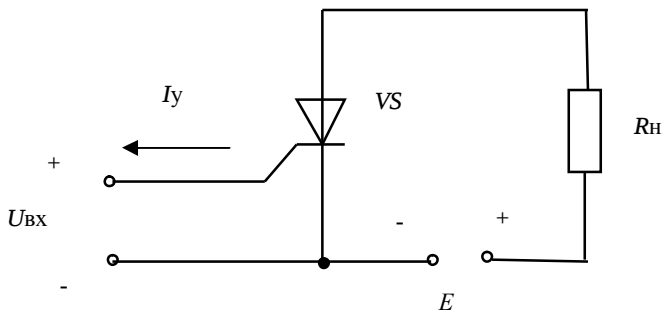


Рис. 1.44. Схема включения триодного тиристора

Параметры у тиристоров такие же, как и у динисторов. К этим параметрам лишь добавляются величины, характеризующие управляющую цепь: управляющий ток I_y , управляющее напряжение U_y .

1.5.3. Симисторы

Симметричные тиристоры или симисторы имеют структуру n - p - n - p - n или p - n - p - n - p . Они отпираются при любой полярности напряжения и проводят ток в обоих направлениях. Структура симистора представлена на рисунке 1.45.

При одной полярности работает левая половина прибора, при другой (противоположной) – правая половина прибора. Роль симистора могут выполнять два диодных тиристора, включенных встречно-параллельно.

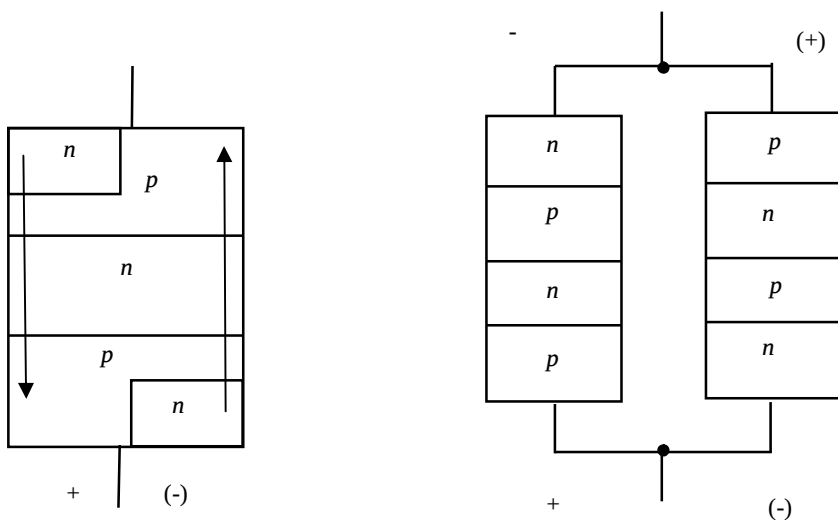


Рис. 1.45. Структура (а) и схема замещения (б) симистора

Вольтамперная характеристика (ВАХ) симистора показана на рисунке 1.46.

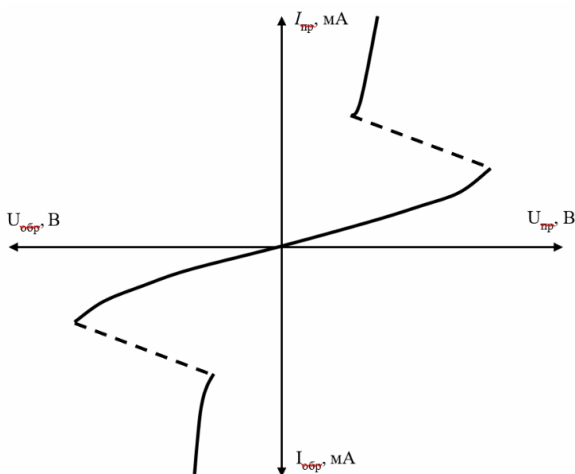


Рис. 1.46. ВАХ симистора

Условные графические изображения различных тиристоров представлены на рисунке 1.47 (ГОСТ 2.730–73):

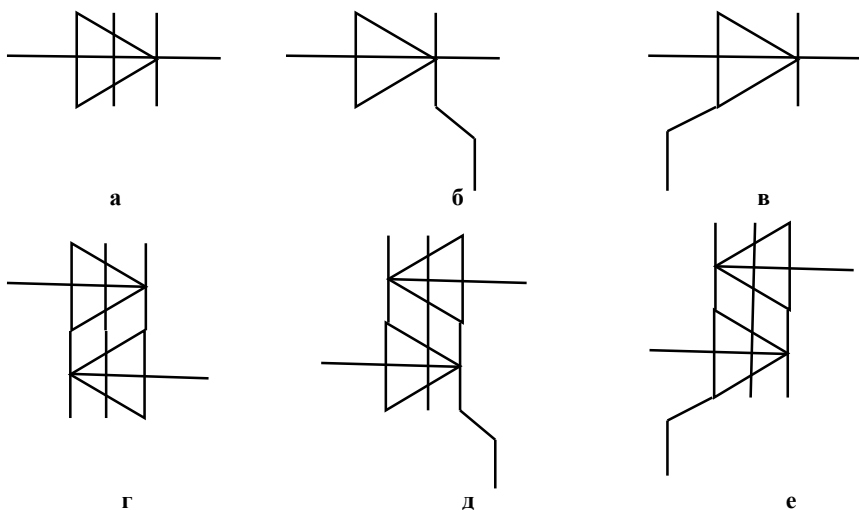


Рис. 1.47. Условные графические изображения динистора (а), тринистора с управлением по катоду (б), тринистора с управлением по аноду (в), симистора неуправляемого (г), симистора с управлением по катоду (д), симистора с управлением по аноду (е)

Маркировка тиристоров

Для импульсных тиристоров и тиристоров, предназначенных для систем автоматики, условные обозначения в различные периоды регламентировались ГОСТ 10862–64 и ГОСТ 10862–72.

Первый элемент – буква или цифра, обозначающая исходный материал: К или 2 – кремний.

Второй элемент – буква, указывающая вид прибора: Н – динисторы (диодные тиристоры); У – тринисторы (триодные тиристоры).

Третий элемент – число, указывающее назначение или электрические свойства прибора:

- малой мощности – от 101 до 199;
- средней мощности – от 201 до 299;
- большой мощности – от 301 до 399.

Четвертый элемент – буквы А, Б, В и т. д., указывающие разновидности приборов с определенным сочетанием основных параметров. Например, КН102Б – кремниевый динистор, малой мощности, группа Б.

Пример маркировки по ГОСТ 20859-75(79) (рисунок 1.48):

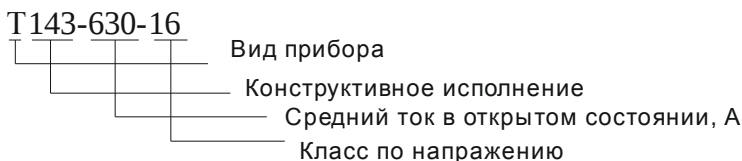


Рис. 1.48. Пример маркировки тиристора

Полная маркировка может содержать дополнительные элементы (всего 9 элементов), тогда расшифровка будет следующей:

Первый элемент – буква или буквы, обозначающие вид прибора: Т – тиристор; ТЛ – лавинный тиристор; ТС – симметричный тиристор (симмистор); ТО – фототиристор; ТЗ – запираемый по управляющему электроду.

Второй элемент – буква, обозначающая подвид тиристора по коммутационным характеристикам: Ч – высокочастотный тиристор; Б – быстродействующий; И – импульсный.

Третий элемент – цифра (от 1 до 9), обозначающая порядковый номер модификации (разработки).

Четвертый элемент – цифра (от 1 до 9), обозначающая классификационный размер корпуса прибора.

Пятый элемент – цифра (от 0 до 5), обозначающая конструктивное исполнение.

Шестой элемент – число, равное значению максимально допустимого среднего тока в открытом состоянии для тиристорov.

Седьмой элемент – буква Х для приборов с обратной полярностью (основание корпуса – катод).

Восьмой элемент – число, обозначающее класс по повторяющемуся импульсному напряжению в закрытом состоянии.

Девятый элемент – группа цифр, обозначающая сочетание классификационных параметров.

Тиристоры применяются чаще всего в качестве мощных переключателей, в автогенераторах, мультивибраторах, устройствах защиты, для управления электродвигателями переменного тока, в выпрямителях и инверторах.

Вопросы для самоконтроля

1. Нарисуйте конструкцию, условное обозначение и опишите принцип работы диодного тиристора.

2. Сравните диодный и триодный тиристоры по конструкции, принципу работы, параметрам и ВАХ.

3. У какого тиристора (тринистора или динистора) время включения будет меньше и почему?

4. Сравните диодный тиристор и симистор по конструкции, принципу работы, параметрам и ВАХ.

5. Для каких целей применяются тиристоры?

6. Назовите особенности симистора.

1.6. Интегральные микросхемы

Интегральная микроэлектроника – направление в электронике, представляющее собой комплекс физических, технологических, конструктивных и схемотехнических методов построения электронных функциональных элементов и узлов повышенной надежности, минимального объема и малого потребления энергии источников питания. Это достигается изготовлением в едином интегральном технологическом цикле всей совокупности активных и пассивных компонентов электронной схемы и соединительных проводников между ними. Полученный таким способом интегральный микроэлектронный функциональный элемент (называемый также интегральной микросхемой) предназначен для выполнения заданных операций.

Интегральные микросхемы (ИМС) принято классифицировать по способам изготовления на полупроводниковые, пленочные и гибридные схемы.

Полупроводниковыми называют микросхемы, все компоненты которых выполнены в объеме или в приповерхностном слое полупроводниковой пластинки.

Пленочная – микросхема, в которой все элементы и межэлементные соединения выполнены в виде пленок проводящих и диэлектрических материалов. Различают тонкопленочные и толстопленочные ИС.

Гибридная – микросхема, в которой пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) выполнены в виде пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку, а активные элементы являются навесными. В качестве активных элементов обычно используют бескорпусные диоды или транзисторы.

В зависимости от функционального назначения интегральные микросхемы делятся на *аналоговые* и *цифровые*. Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки аналоговых сигналов, т. е. сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Цифровые ИМС предназначены для преобразования и обработки дискретных сигналов.

В зависимости от числа элементов и компонентов различают ИМС:

- малой степени интеграции (МИС) – до 50 элементов;
- средней степени интеграции (СИС) – до 500 элементов;
- большой степени интеграции (БИС) – до 10 000 элементов;
- сверхбольшой степени интеграции (СБИС) – более 10 000

элементов.

Интегральные микросхемы помещаются в корпус. Наибольшее распространение получили металлокерамический, металlostеклянный, стеклокерамический и пластмассовый корпуса. Корпуса имеют от четырех до нескольких сотен выводов.

Основными параметрами ИМС являются:

1. Степень интеграции – количество элементов, входящих в состав ИМС (характеризует сложность ИМС).
2. Плотность упаковки – параметр ИМС, который характеризует количество элементов ИМС в единице объема.

Технология производства полупроводниковых интегральных микросхем преимущественно планарная и основана на поочередном легировании (обогащении) отдельных участков полупроводниковой пластинки донорными и акцепторными примесями, которое осуществляется при помощи специально наносимой на поверхность полупроводника маски, технологические отверстия («окна») происходят путем диффузии при высоких температурах из твердых, жидких или газообразных соединений, содержащих атомы заданной примеси.

Часто используется ионная имплантация, при которой ионы примеси разгоняются в специальных ускорителях до больших скоростей, позволяющих при попадании на поверхность полупроводника внедряться в него на заданную глубину и таким образом образовывать зоны с заданной проводимостью.

На рисунке 1.49 приведены основные пассивные (конденсатор, резистор) и активные (биполярный транзистор) элементы интегральных полупроводниковых микросхем.

Полупроводниковые резисторы выполняются в объеме полупроводника путем локальной диффузии (диффузионные резисторы), что позволяет изготавливать их одновременно с другими элементами ИМС. Диффузионным резистором может служить эмиттерная, базовая или коллекторная область структуры биполярного транзистора (БТ) (см. рис. 1.49).

В полупроводниковых ИМС используют два типа конденсаторов: диффузионные (на основе p - n -перехода) и оксидные.

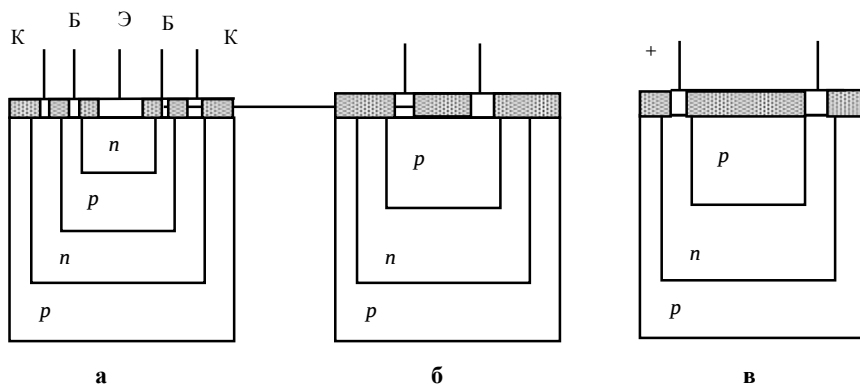


Рис. 1.49. Пассивные и активные элементы полупроводниковых ИМС: диффузионный транзистор (а), диффузионный резистор (б), диффузионный конденсатор (в)

Диффузионные конденсаторы выполняют на основе эмиттерного и коллекторного переходов транзисторной структуры, что не требует дополнительных технологических операций. В оксидных конденсаторах в качестве одной обкладки используют слой n^+ -типа, в качестве диэлектрика – слой диоксида кремния, в качестве второй обкладки – пленку алюминия (см. рис. 1.49).

Наряду с биполярными транзисторами в полупроводниковых ИМС применяют МДП-транзисторы. На рисунке 1.50 показаны структуры МДП-транзистора с индуцированным n -каналом, МДП-резистора и МДП-конденсатора, которые могут создаваться в едином технологическом процессе.

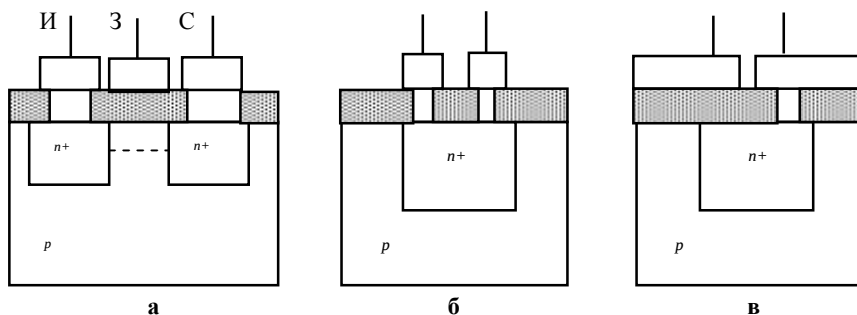


Рис. 1.50. Структура МДП-транзистора в интегральном исполнении:
а – МДП-транзистор с индуцированным n -каналом, б – МДП-резистор,
в – МДП-конденсатор

Области стока и истока формируют локальной диффузией легирующих примесей в кремниевую подложку с противоположным типом электропроводности. Изоляция затвора от полупроводника осуществляется пленкой диоксида кремния (SiO_2), расположенной на поверхности подложки между областями стока и истока. Затвор и выводы электродов выполняют путем металлизации.

Изоляция элементов ИМС осуществляется с помощью p - n -переходов, диэлектрической пленки SiO_2 и с помощью диэлектрической подложки.

Пленочные ИМС подразделяются на тонкопленочные и толсто-пленочные. К *тонкопленочным* относятся ИМС, толщина пленок которых не превышает 1 мкм. Пленки толщиной более 1 мкм называют *толстыми*.

Элементы тонкопленочных ИМС наносятся методом термовакuumного осаждения или катодного распыления. При термовакuumном осаждении подложка с маской располагаются в вакуумной камере, в которой помещен испаряемый материал и нагреватель. При нагревании материал испаряется и осаждается на подложку через «окна» в маске в виде тонкой пленки.

При катодном распылении в разреженной газовой среде размещаются холодный катод из распыляемого металла, анод и между ними подложка. Между анодом и катодом прикладывается высокое напряжение, вызывающее ионизацию газа. Положительные ионы движутся к катоду и выбивают из него атомы металла, которые осаждаются на подложке, образуя тонкую пленку.

Толстые пленки получают методом шелкографии, заключающимся в продавливании пасты, изготовленной из материалов, образующих пленки, через специальные сетки-трафареты, имеющие шелковую основу.

На рисунке 1.51 приведена структура таких пленочных элементов (вид сверху).

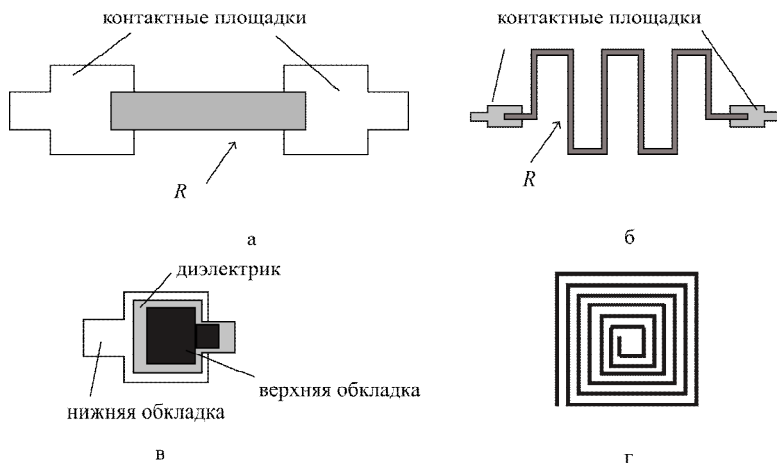


Рис. 1.51. Структура пленочных элементов: а – резистор, б – резистор в виде меандра, в – конденсатор, г – индуктивность

В пленочных микросхемах для создания катушки индуктивности используется плоская металлическая спираль, нанесенная на изолирующее основание. Однако в полупроводниковых микросхемах обычно имитируется эффект отставания тока от напряжения, как это имеет место в реальной индуктивности. Это отставание может быть достигнуто за счет замедленного движения носителей заряда в некотором объеме полупроводника.

Если необходимо, чтобы в состав микросхемы входили помимо пассивных элементов и активные (биполярные и полевые транзисторы, тиристоры и т. д.), то последние выполняют в виде отдельных дискретных микроминиатюрных компонентов и подсоединяют к микросхеме. Пример части гибридной микросхемы приведен на рисунке 1.52. Гибридные интегральные микросхемы обычно используются для изготовления малосерийной или опытной аппаратуры, применяемой для выполнения каких-либо нестандартных операций над сигналами.

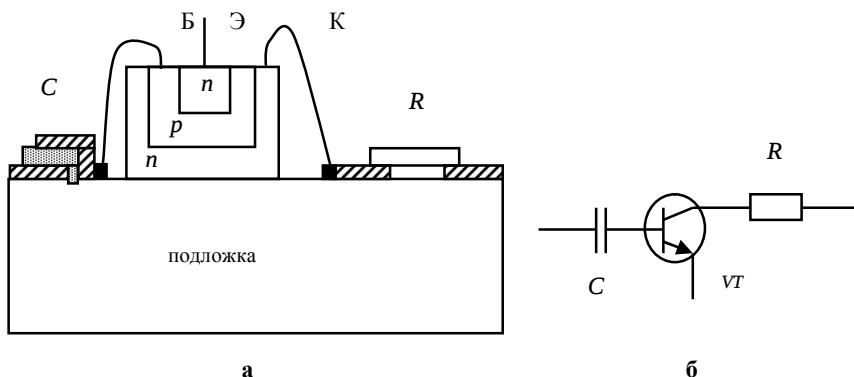
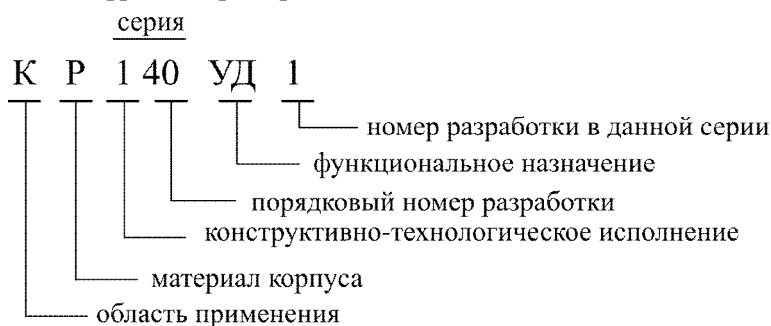


Рис. 1.52. Гибридная ИМС (а) и ее принципиальная электрическая схема (б)

Если в интегральной микросхеме активные элементы выполнены в приповерхностном слое полупроводника, поверх которого нанесены пассивные компоненты, то такая микросхема называется совмещенной.

Интегральные микросхемы выпускаются в виде серий. Каждая серия содержит несколько микросхем, выполняющих определенные функции, однако они имеют единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначены для совместного применения.

Маркировка ИМС состоит из нескольких элементов и включает буквы и цифры. Например



Первый элемент – буква К означает, что ИМС общего применения. Отсутствие буквы К означает, что ИМС специального применения.

Второй элемент – буква означает материал и тип корпуса: Р – пластмассовый, М – керамический типа 2, А – пластмассовый типа 4.

Третий и четвертый символы – три или четыре цифры – серия. Первая цифра в серии означает конструктивно-технологическое исполнение:

1, 5, 7 – полупроводниковые (7 – полупроводниковые бескорпусные),

2, 4, 6, 8 – гибридные, 3 – прочие.

Пятый и шестой символы – функциональное назначение схемы:

УД – операционный усилитель,

ЛА – логический элемент И–НЕ,

ИР – регистр,

ИЕ – счетчик,

ИД – дешифратор,

ЕН – стабилизатор напряжения и т. д. Последние цифры – номер разработки в данной серии.

Применение ИМС вместо дискретных элементов в качестве электронной базы электронных устройств дает значительные преимущества по надежности, габаритам, стоимости и другим показателям. Это связано с тем, что при использовании ИМС резко уменьшается количество паяных соединений – основного фактора ненадежности, значительно сокращаются габаритные размеры и масса проектируемых электронных устройств, существенно снижается их стоимость, прежде всего за счет небольшой стоимости ИМС, снижения трудоемкости изготовления аппаратуры и использования автоматизированных систем проектирования.

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляют собой ИМС?
2. Дайте краткую характеристику полупроводниковых, пленочных и гибридных ИМС.
3. Что представляют собой пассивные и активные элементы различных ИМС?
4. В чем сущность планарной (планарно-эпитаксиальной) технологии?
5. Как реализуется тонкопленочная технология ИМС?
6. Как реализуется толстопленочная технология ИМС?
7. Что понимают под степенью интеграции микросхем?
8. Расшифруйте маркировку интегральной схемы К176ЛА7.
9. Назовите преимущества применения ИМС.

1.7. Оптроны. Элементы индикации

Оптрон – это полупроводниковый прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, имеющие между собой оптическую связь. В источнике излучения электрические сигналы преобразуются в световые, которые воздействуют на фотоприемник и создают в нем снова электрические сигналы.

Прием и преобразование световых («фотонных») сигналов в электрические осуществляется *фотоэлектронными приборами*. Преобразование электрических сигналов в световые производится *электросветовыми (излучающими) приборами*.

В качестве *излучающих приборов* используются или микроиниатюрные лампочки накаливания или (чаще всего) светодиоды.

Фотоэлектронные приборы разделяются на четыре класса:

1) фотоэмиссионные приборы, основанные на фотоэлектронной эмиссии с поверхности фотокатодов, помещенных в вакуум или разреженный газ;

2) фоторезистивные приборы, основанные на увеличении проводимости полупроводников под воздействием света;

3) фотогальванические приборы, в которых при воздействии света генерируется фото-ЭДС;

4) фотомагнитные приборы, в которых при одновременном воздействии магнитного поля и света генерируется фотомагнитная ЭДС.

Простейшими фотоэмиссионными приборами являются двухэлектродные вакуумные или газонаполненные фотоэлементы.

К фоторезистивным приборам относятся полупроводниковые фоторезисторы (приборы без *p-n*-перехода).

К фотогальваническим элементам относятся фотоэлементы с запирающим слоем (вентильные фотоэлементы), фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и солнечные батареи. Фототранзисторы конструктивно отличаются от обычных биполярных и полевых транзисторов лишь тем, что у них в корпусе имеется окно, пропускающее световой поток и фокусирующее его в области *p-n*-перехода (рис. 1.53, а и рис. 1.53, б). Фототиристоры (рис. 1.53, в) отличаются от обычных тиристоров тем, что в их корпусах также имеется прозрачное для света окно, вследствие чего их можно включать (а некоторые их виды и выключать), воздействуя световым сигналом.

Фотогальванические приборы являются преобразователями световой энергии в электрическую энергию с КПД до 25 %. Это позволяет

применять фотогальванические приборы для преобразования световых сигналов в электрические, а также создавать на основе этих приборов преобразователи солнечной энергии в электрическую (1 м^2 земной поверхности, освещаемой солнечным светом, получает световую энергию мощностью до 500–1000 Вт). В настоящее время для этих целей наиболее широко применяют кремниевые солнечные батареи.

Элемент солнечной батареи устроен следующим образом. На пластинке n -кремния диффузионным способом получают тонкий полупрозрачный слой p -кремния, в результате чего образуется плоский p - n -переход (рис. 1.53, г). При освещении солнечным светом p - n -перехода появляется фото-ЭДС, равная 0,5–0,6 В. В режиме короткого замыкания солнечные батареи создают ток до 40 мА на 1 см^2 площади p - n -перехода.

Фотоэлектрические преобразователи световых изображений на основе полупроводниковых приборов с зарядовой связью.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) конструктивно напоминают МОП-транзисторы с изолированным затвором (рис. 1.53, д, е) на поверхности основания («подложки») из сверхчистого кремния с дырочной проводимостью создается тонкий слой (порядка 0,1 микронметра) диоксида кремния (SiO_2), поверх которого наносятся тончайшие (практически прозрачные) металлические полоски, выполняющие роль затворов. Если на затвор подается плюс от внешнего источника, а на основание – минус, то непосредственно под затвором, в основании с p -проводимостью, возникает область без носителей заряда (т. е. своеобразная «потенциальная яма»). Все дырки вытесняются из этой зоны вглубь основания (как это схематически показано пунктирной линией на рисунке 1.53, д). При этом электроны, которые бы могли войти в эту зону и изменить ее потенциал, в нормальных условиях в основании практически отсутствуют, поскольку оно выполняется из сверхчистого кремния, в который при создании были введены только акцепторные примеси.

Таким образом, под затвором создается «потенциальная яма», в которой нет неосновных носителей заряда – электронов, но в которую их можно ввести и они смогут находиться («храниться») в ней достаточно долго, так как дырок, с которыми они могли бы рекомбинировать, поблизости нет. Электроны в «потенциальной яме» могут образоваться под действием света: но для этого все элементы прибора должны быть выполнены столь тонкими (десятые доли

микрометра), чтобы быть прозрачными для световых потоков. В этом случае, фотоны проникают в подзатворную область, где и отдают свою энергию, вызывая генерацию носителей заряда (электронов и дырок). Дырки полем затвора оттесняются вглубь основания, а электроны остаются в подзатворной области и создают в потенциальной яме «зарядовый пакет».

При этом, чем более интенсивный световой поток попадает в подзатворную область, тем больше электронов в ней появляется. Если из подобных микроэлементов создать линейку ПЗС (рис. 1.53, е), расположив их как можно ближе друг к другу, или матрицу ПЗС, разместив микроэлементы геометрически равномерно по площади, то, проецируя на образованную таким образом фотоматрицу световое изображение, можно получить мозаичное, состоящее из множества отдельных зарядовых пакетов, электронное изображение. Это объясняется тем, что под каждым затвором будет иметься заряд, величина которого будет прямо пропорционально зависеть от степени освещенности области расположения конкретного затвора.

Полученное электронное изображение затем преобразуется в электрический сигнал (для этого надо измерить («считать») заряд, имеющийся под каждым элементарным затвором). Следует отметить, что приборы с зарядовой связью обладают одной особенностью: заряд, имеющийся, например, под затвором 1 (рис. 1.53, д) легко может быть перемещен под затвор 2 рядом с ним расположенный. Для этого надо подать на затвор 2 напряжение большее, чем на затворе 1. Тогда электроны из-под затвора 1 переместятся под затвор 2, откуда они могут быть перемещены подобным же способом под затвор 3, затем затвор 4 (рис. 1.53, е) и т. д., пока пакет электронов не достигнет стока и не уйдет в источник питания, создав на сопротивлении нагрузки падение напряжения. Так можно последовательно (или последовательно-параллельно) считать все образованное электронное изображение: элемент за элементом и строка за строкой.

Таким образом, на основе фотоматрицы из приборов с зарядовой связью может быть создан мозаичный преобразователь светового изображения в электронное, которое затем может быть преобразовано в электрический сигнал, несущий информацию о степени освещенности каждого участка исходного светового изображения. Фотоэлектрические преобразователи на основе ПЗС широко используются в электронике: в современном телевидении, цифровых фотоаппаратах, цифровых видеокамерах и сканерах.

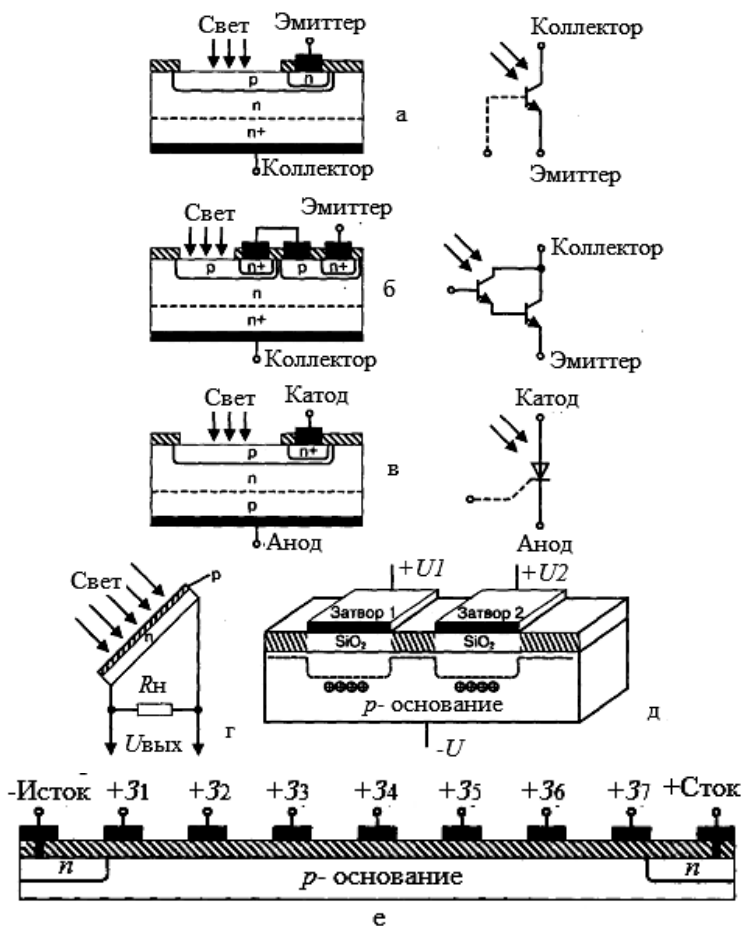


Рис. 1.53. Фототранзистор (а), составной фототранзистор (б), фототиристор (в), солнечная батарея (г) и устройство фотоэлектрического преобразователя на основе прибора с зарядовой связью (д, е)

Если оптрон имеет один излучатель и один приемник излучения, то его называют оптопарой.

1.7.1. Оптоны

Рассмотрим различные конструкции оптронов.

1) Оптоны с закрытым оптическим каналом (рис. 1.54).

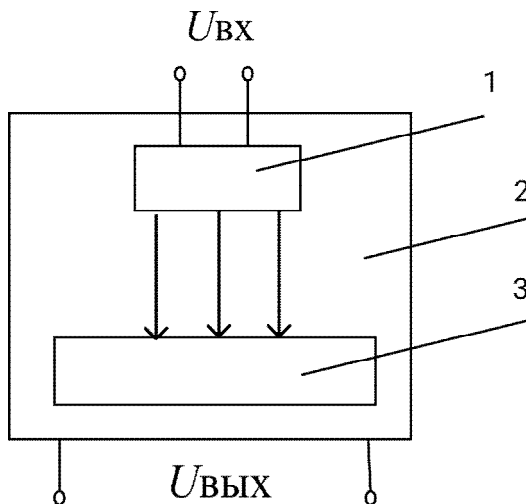


Рис. 1.54. Оптрон с закрытым оптическим каналом: 1 – излучатель; 2 – оптически прозрачный клей; 3 – фотоприемник

Излучатель и фотоприемник помещают в корпус и заливают оптически прозрачным клеем.

2) Оптроны с открытым оптическим каналом.

Оптрон с воздушным зазором между излучателем и фотоприемником изображен на рисунке 1.55.

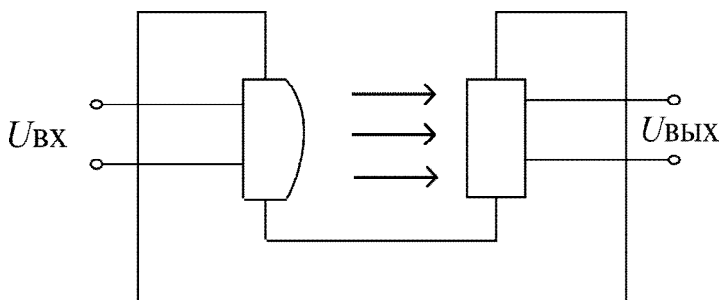


Рис. 1.55. Оптрон с открытым оптическим каналом (с воздушным зазором): 1 – излучатель; 2 – оптически прозрачный клей; 3 – фотоприемник

Оптрон с внешним объектом, при котором световой поток излучателя попадает в фотоприемник, отражаясь от какого-либо внешнего объекта, изображен на рисунке 1.56.

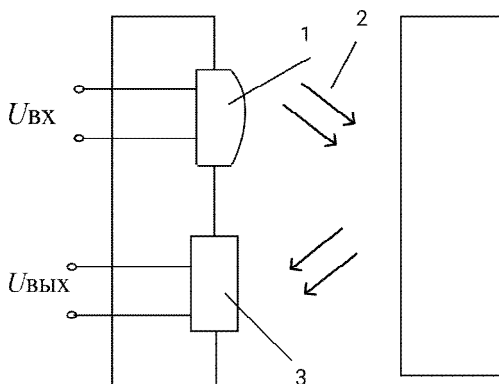


Рис. 1.56. Оптрон с внешним объектом

Типы оптопар, их параметры и характеристики

1. Резисторные оптопары

Они имеют в качестве излучателя сверхмощную лампочку накаливания или светодиод. Приемником излучения является фоторезистор, который может работать как на постоянном, так и на переменном токе. Условное обозначение и схема включения резисторной оптопары показаны на рисунке 1.57.

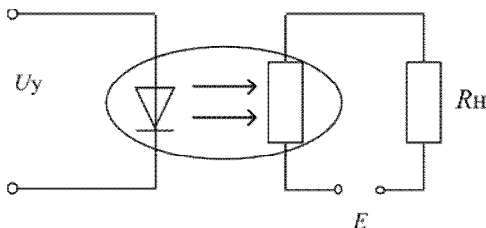


Рис. 1.57. Условное обозначение и схема включения резисторной оптопары

Параметры резисторных оптопар:

1) максимальные токи ($I_{ВХ\ max}$, $I_{ВЫХ\ max}$) и напряжения на входе и на выходе ($U_{ВХ\ max}$, $U_{ВЫХ\ max}$);

2) выходное сопротивление при нормальной работе ($R_{ВЫХ}$) и темновое выходное сопротивление ($R_{Т\ ВЫХ}$);

3) сопротивление изоляции ($R_{ИЗОЛ}$);

4) время включения ($t_{ВКЛ}$) и выключения ($t_{ВЫКЛ}$).

Характеристики:

1) входные ВАХ;

2) передаточная ($R_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$).

Резисторные оптопары применяются: для коммутации, для автоматического регулирования усиления, для связи между каскадами усилителя, для управления бесконтактными делителями напряжения и т. д.

2. Диодные оптопары

Они содержат обычно кремниевый фотодиод и арсенид-галлиевый светодиод (рис. 1.58).

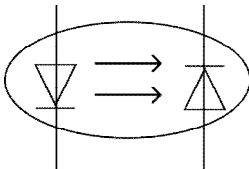


Рис. 1.58. Условное обозначение диодной оптопары

Параметры диодных оптопар:

- 1) входные и выходные напряжения и токи;
- 2) коэффициент передачи тока (т. е. $I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}$);
- 3) время нарастания и время схода выходного сигнала.

Диодные оптопары применяются для:

- создания импульсных трансформаторов, не имеющих обмоток;
- передачи сигналов между блоками РЭА;
- управления работой микросхем.

3. Транзисторные оптопары

Транзисторные оптопары имеют в качестве излучателя светодиода, а в качестве приемника излучения – биполярный кремниевый фототранзистор (рис. 1.59).

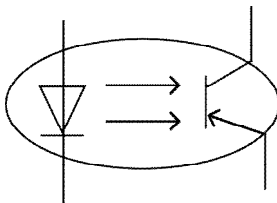


Рис. 1.59. Условное обозначение транзисторной оптопары

В качестве приемника может также использоваться однопереходный и полевой транзисторы.

Основные параметры транзисторных оптопар аналогичны параметрам резисторных оптопар. Оптопары этого типа работают обычно в ключевом режиме и применяются в коммутаторных схемах, в устройствах связи различных датчиков с измерительными блоками, а также в качестве реле.

4. Тиристорные оптопары

Они имеют в качестве фотоприемника кремниевый фототиристор (рис. 1.60).

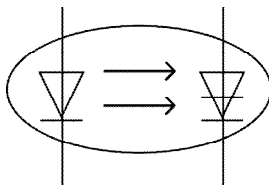


Рис. 1.60. Условное обозначение и схема включения тиристорной оптопары

Тиристорные оптопары применяются в схемах для формирования мощных импульсов, управления и коммутации различных устройств с мощными нагрузками.

Параметры:

- 1) токи $I_{вх}$ и $I_{вых}$, и напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$;
- 2) время включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$;
- 3) сопротивление $R_{изол}$ изоляции между входной и выходной цепями.

Достоинства оптронов:

- 1) отсутствие электрической связи между входом и выходом и обратной связи между фотоприемником и излучателем из-за высокого сопротивления изоляции;
- 2) широкая полоса частот колебаний, пропускаемых оптроном;
- 3) высокая помехозащищенность оптического сигнала, т. е. его невосприимчивость к воздействию внешних электромагнитных полей;
- 4) возможность управления выходными сигналами путем воздействия на оптическую часть прибора.

Недостатки оптронов:

- 1) значительная потребляемая мощность (из-за того, что дважды происходит преобразование энергии);
- 2) большое влияние температуры и радиации на свойства оптронов;
- 3) заметное «старение», т. е. ухудшение параметров с течением времени;
- 4) высокий уровень собственных шумов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что может служить излучателем (приемником) в оптоэлектронных приборах?
2. Назовите основные достоинства и недостатки оптоэлектронных приборов различных типов.
3. Приведите конструкцию и принцип работы фототранзистора.
4. Приведите конструкции оптронов.
5. Назовите основные параметры и характеристики резисторных оптопар.
6. Приведите примеры использования тиристорных оптопар.

1.7.2. Элементы индикации

Использование многих систем электроники невозможно без участия человека, который должен иметь сведения о работе систем и контролируемых параметров. Для этого служат устройства преобразования различных сигналов в видимое изображение. Устройства отображения информации выполняют на основе элементов индикации, в которых используются следующие физические явления:

1. Свечение кристаллических веществ под воздействием электрического поля (электролюминесцентные индикаторы).
2. Свечение люминофорного покрытия при бомбардировании электронами (вакуумно-люминесцентные индикаторы и электронно-лучевые приборы).
3. Свечение газа при электрическом разряде (газоразрядные элементы индикации).
4. Излучение квантов света при рекомбинации носителей заряда в кристаллических веществах (полупроводниковые светодиоды).
5. Изменение оптических свойств вещества под воздействием электрического поля (жидкокристаллические индикаторы) и др.

Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ)

Основаны на использовании явления электролюминесценции.

Основные свойства ЭЛИ:

- 1) малое потребление мощности;
- 2) большой угол обзора;
- 3) возможность получения разного цвета свечения;
- 4) плоская конструкция;
- 5) большой срок службы;

б) высокая надежность.

Конструкция ЭЛИ: представляют собой плоский конденсатор (рис. 1.61), у которого одна обкладка выполнена в виде стеклянной пластины или пленки с нанесенным на нее прозрачным электродом, а другая обкладка – в виде непрозрачного электрода. Прозрачный электрод выполняют методом напыления окиси свинца.

Принцип работы ЭЛИ: переменное напряжение, приложенное к электродам, создает необходимую для возникновения свечения напряженность электрического поля.

По виду и характеру изображения ЭЛИ подразделяются на:

- 1) буквенно-цифровые;
- 2) мозаичные;
- 3) с измененным цветом.

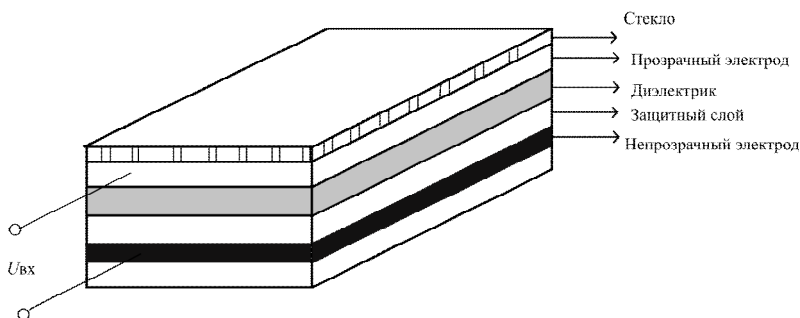


Рис. 1.61. Конструкция ЭЛИ

Вакуумно-люминесцентные индикаторы (ВЛИ)

Состоят из последовательно расположенных один за другим катодов накала; сетки; несколько анодов, размещенных в одной плоскости.

Накаленный катод из нити из тугоплавкого металла (Wf, Mb) служит источником, эмитирующим электроны. Аноды выполняют в виде знаков синтезирующих металлических сегментов, покрытых люминофором. Каждый сегмент имеет отдельный вывод, который находится под положительным напряжением ($+U$). Металлическая сетка расположена между анодом и катодом. Она служит для управления током индикатора (рис. 1.62).

При столкновении с поверхностью анодов электроны вызывают свечение люминофора. Сочетание светящихся сегментов создает изображение.

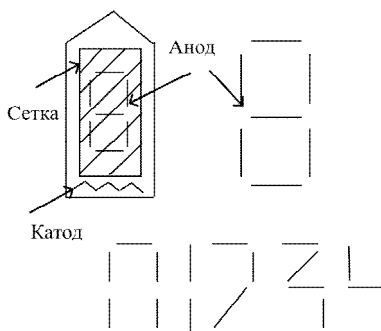


Рис. 1.62. Конструкция ВЛИ

Газоразрядные знаковые индикаторы

Конструкция: газоразрядные индикаторы – это многокатодные приборы с одним или двумя анодами (сеткой). Катоды из тонкой проволоки в виде цифр, букв, знаков, располагаются один за другим и связаны с внешними выводами.

Принцип работы. При подаче U_n на анод и один из катодов между ними в газовой среде возникает разряд. Вид свечения тлеющего разряда внутри баллона имеет форму катода. Подавая напряжение на разные катоды можно получить смену цифр – до 10 знаков в баллоне. Цвет свечения знаков зависит от наполненного газа (неон, аргон, гелий). Анод – Ni, Ti.

Полупроводниковые индикаторы

К полупроводниковым индикаторам относятся светодиоды. В полупроводниковых индикаторах используют сегментный принцип, где каждый сегмент представляет собой определенный диод. Из семи сегментов можно синтезировать цифры от 0 до 9 и 12 букв русского алфавита (рис. 1.63).

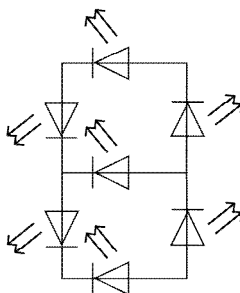


Рис. 1.63. Полупроводниковый семисегментный индикатор

Большими возможностями обладают полупроводниковые знаковые индикаторы в виде матриц точечных элементов. Например, знаковый индикатор АЛС340А состоит из 36 точечных элементов. Элементы сгруппированы в 5 колонок и 7 рядов + одна светящаяся точка в седьмом ряду.

Катоды элементов каждого ряда соединены между собой и имеют общий вывод, так же, как и аноды элементов каждой колонки. Подавая напряжение между выводами выбранного ряда и колонки, можно вызвать свечение заданного элемента матрицы. Элементы переключаются циклически с частотой, при которой их мигание незаметно в силу инерционности глаза. Такие матричные элементы позволяют отображать все цифры и буквы русского и латинского алфавитов. На основе таких элементов можно создать буквенно-цифровые дисплеи, в частности, в виде бегущей строки.

К достоинствам таких индикаторов относится большой срок службы, высокая яркость свечения, низкое рабочее напряжение.

К недостаткам – сравнительно высокая потребляемая мощность. (0,5 – 1 Вт на один светодиод).

Жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ)

ЖКИ не излучают собственный свет, а преломляют падающий или проходящий сквозь них свет. Поэтому для использования ЖКИ необходим внешний источник света. Основой ЖКИ являются жидкокристаллические вещества, обладающие свойствами жидкости и имеющие кристаллическую молекулярную структуру, которая изменяется под воздействием электрического поля, при этом изменяется коэффициент преломления света.

По конструкции ЖКИ подобны конденсатору, в котором между двумя стеклянными пластинами, внутренняя поверхность которых покрыта проводящим слоем, находится слой жидкокристаллического вещества (рис. 1.64).

На рисунке 1.64 приняты следующие обозначения: 1 и 3 – стеклянные пластины; 2 – клеевое соединение; 4 – передний прозрачный электрод, 5 – жидкокристаллическое вещество; 6 – задний прозрачный электрод; 7 – задний отражающий электрод.

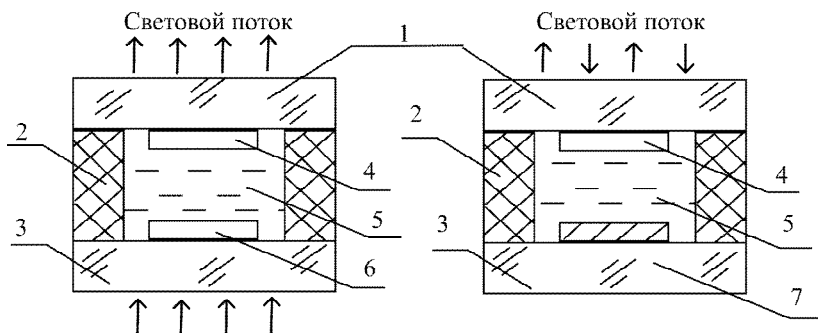


Рис. 1.64. Конструкции ЖКИ, работающие на просвет (а) и на отражение (б)

Если прозрачные электроды выполнить в виде сегментов, то, подавая напряжение между отражающим электродом и соответствующим сегментом, можно получить темные знаки на светлом фоне. Под воздействием переменного напряжения 10...20 В, приложенного между электродами, изменяются преломляющие свойства жидкокристаллического вещества, уменьшается его прозрачность. ЖКИ находят широкое применение в часах, микрокалькуляторах, измерительных приборах.

Достоинства ЖКИ: малая мощность потребления ($5...50 \text{ мкВт/см}^2$) и большой срок службы.

Недостатки ЖКИ: необходимость во внешнем источнике света и узкий диапазон рабочих температур ($+1...+50^\circ\text{C}$).

Система обозначений индикаторов

Единой системы условных обозначений индикаторов не существует.

Примеры:

- 1) полупроводниковые индикаторы: АЛ350А – знаковый светодиод, красного свечения, с яркостью свечения 350 кд/м;
- 2) ЖКИ: ИЖК Ц 4-6/17 – индикатор жидкокристаллический, цифровой, типа 4, число разрядов 6, высота знаков 17 мм;
- 3) вакуумно-люминесцентные: ИВ, ИЛТ, ИЛМ;
- 4) электро-люминесцентные: ИЭЛ-Р-ХП, ИЭЛ-И-І;
- 5) газоразрядные: МН-7, ТН-2.

Плазменные панели

Газоразрядный экран (плазменная панель, PDP-монитор) – устройство отображения информации, монитор, работа которого основана на явлении свечения люминофора под воздействием

ультрафиолетовых лучей, возникающих при электрическом разряде в ионизированном газе, иначе говоря, в плазме.

Конструкция плазменной панели представляет собой матрицу газонаполненных ячеек, заключенных между двумя параллельными стеклянными пластинами, внутри которых расположены прозрачные электроды, образующие соответственно шины сканирования, подсветки и адресации. Разряд в газе протекает между разрядными электродами (сканирования и подсветки) на лицевой стороне экрана и электродом адресации на задней стороне (рис. 1.65).

Для создания плазмы ячейки обычно заполняются газом – неоном или ксеноном (реже используется гелий He и/или аргон Ar). Пиксель плазменной панели обладает следующими размерами: 200 x 200 x 100 мкм. Передний электрод изготавливается из оксида индия и олова, поскольку он проводит ток и максимально прозрачен.

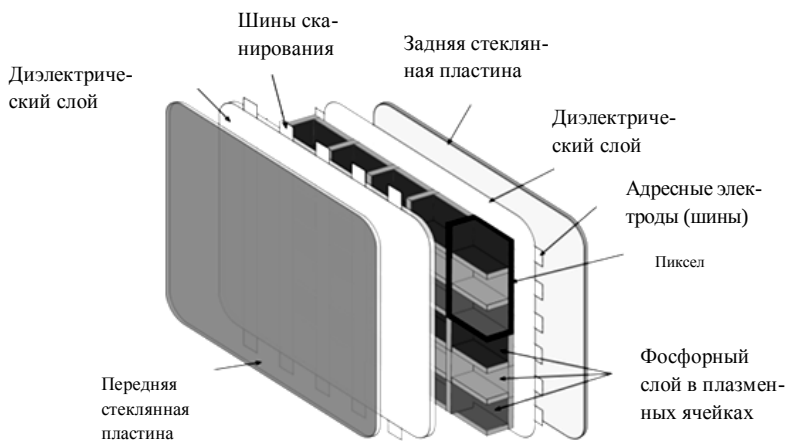


Рис. 1.65. Конструкция плазменной панели

Существующая проблема в адресации миллионов пикселей решается расположением пары передних дорожек в виде строк (шины сканирования и подсветки), а каждой задней дорожки – в виде столбцов (шина адресации). Внутренняя электроника плазменных экранов автоматически выбирает нужные пиксели. Эта операция проходит быстрее, чем сканирование лучом на ЭЛТ-мониторах. В последних моделях PDP обновление экрана происходит на частотах 400...600 Гц, что не позволяет человеческому глазу замечать мерцания экрана.

Принцип действия плазменной панели основан на свечении специальных люминофоров при воздействии на них ультрафиолетового излучения. В свою очередь, это излучение возникает при электрическом разряде в среде сильно разреженного газа. При таком разряде между электродами с управляющим напряжением образуется проводящий «шнур», состоящий из ионизированных молекул газа (плазмы).

Подавая управляющие сигналы на вертикальные и горизонтальные проводники, нанесенные на внутренние поверхности стекол панели, схема управления *PDP* осуществляет соответственно «строчную» и «кадровую» развертку раstra телевизионного изображения. При этом яркость каждого элемента изображения определяется временем свечения соответствующей ячейки плазменной панели: самые яркие элементы «горят» постоянно, а в наиболее темных местах они вообще не «поджигаются». Светлые участки изображения на PDP светятся ровным светом, и поэтому изображение не мерцает, чем выгодно отличается от картинки на экране традиционных кинескопов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой элемент является базовым для полупроводникового буквенно-цифрового индикатора?
2. Принцип работы электролюминесцентного индикатора.
3. Принцип работы газоразрядного индикатора.
4. Назовите принцип работы жидкокристаллического индикатора, работающего на просвет и на отражение.
5. Назовите принцип работы вакуумно-люминесцентного индикатора.

1.8. Электровакуумные и электронно-лучевые приборы

Принцип действия вакуумных электронных приборов (ламп) основан на движении электронов в вакууме под действием электрического поля. Эти приборы служат базой для большинства видов радиоэлектронной аппаратуры [3, 7]. С помощью электровакуумных приборов можно создать генераторы мощностью $\sim 10^6$ Вт, а с помощью одного полупроводникового прибора удается получить примерно в 1000 раз меньшую мощность колебаний.

Электровакуумными приборами являются телевизионные передающие и приемные электронно-лучевые трубки.

Существуют следующие группы электронных приборов:

1. Электронные лампы. Они имеют накаленный катод и предназначены для преобразования электрического тока. Их используют в генераторах переменного тока различной частоты, усилителях постоянного и переменного тока, усилителях мощности, выпрямителях переменного тока, стабилизаторах напряжения, преобразователях частоты, формирователях импульсов специальной формы и других устройствах.

2. Электронно-лучевые приборы. В этих приборах используется энергия светового потока, сфокусированного в луч. Их используют в телевидении (кинескопы), в измерительных приборах (осциллографы), в дисплеях ЭВМ, радиолокаторах и индикаторах.

3. Фотоэлектронные приборы – преобразуют световые сигналы в электрические (фотоэлементы с внешним фотоэффектом и фотоэлектронные умножители).

1.8.1. Устройство и принцип работы электровакуумных приборов

В зависимости от назначения лампы бывают: делительные, выпрямительные, детекторные, частотопреобразовательные и др.

В зависимости от числа электродов различают следующие типы ламп: диоды (лампы без сеток, двухэлектродные); триоды (лампы с одной сеткой, трехэлектродные); тетроды (лампы с двумя сетками, четырехэлектродные); пентоды (лампы с тремя сетками, пятиэлектродные); гексоды (лампы с четырьмя сетками, шестиэлектродные); гептоды (лампы с пятью сетками, семиэлектродные); октоды (лампы с шестью сетками, восьмиэлектродные). Выпускаются также комбинированные лампы, у которых в одном баллоне размещается несколько ламп: двойной диод, двойной триод, триод-пентод и т. д.

Практически все электронные лампы имеют катод. Катоды электронных ламп бывают прямого накала и косвенного накала. В катодах прямого накала металлическая нить, по которой проходит ток, служит одновременно и катодом. Катоды косвенного накала нагреваются с помощью специальных подогревателей, которые не являются электродами лампы.

Двухэлектродная электронная лампа – диод

Диод содержит два электрода: катод (К) и анод (А). Катод является излучателем электронов (эмиттером), а анод – их собирателем (коллектором), схема включения диода приведены на рисунке 1.66.

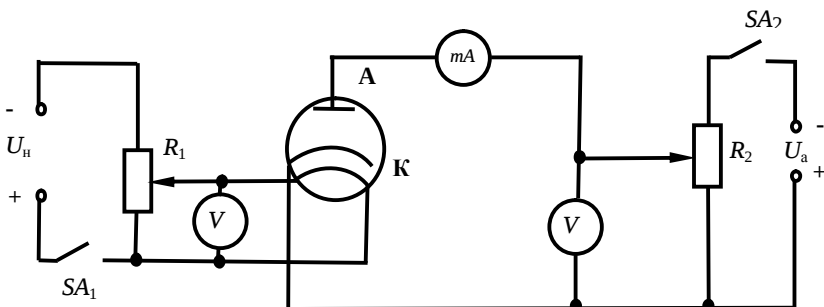


Рис. 1.66. Схема включения электровакуумного диода

Принцип работы диода

Если к электродам лампы приложить напряжение U_a , то под действием возникшего электрического поля, испускаемые раскаленным катодом электроны, будут двигаться к положительному аноду. Через лампу пройдет ток. При изменении полярности анода и катода ток через лампу протекать не будет. Свойство диода пропускать ток только в одном направлении называется односторонней проводимостью.

Условие работы диода: $U_a > 0$; $U_n > 0$.

Используются диоды для выпрямления переменного тока в высоковольтных выпрямителях и в детекторах.

Основные характеристики диода:

1. Анодная характеристика $I_a = f(U_a)$ при $U_n = \text{const}$;
2. Накальная характеристика $I_a = f(U_n)$ при $U_a = \text{const}$.

На рисунке 1.67 приведена анодная характеристика, которая имеет основное практическое значение, т. к. электронные устройства обычно работают при неизменном напряжении накала U_n . При некотором напряжении U_a наступает режим насыщения, при котором все электроны достигают анода (ток насыщения I_n).

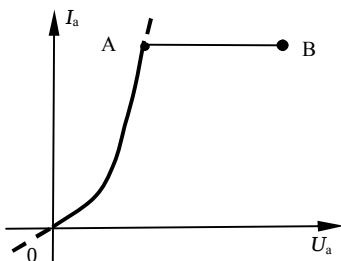


Рис. 1.67. Анодная характеристика диода

Электронные лампы работают при $U_n = \text{const}$, и ток анода I_a в цепи пропорционален напряжению U_a в степени 3/2 (закон степени 3/2):

$$I_a = \sigma U_a^{3/2},$$

где σ – постоянная для данного типа лампы.

Статические параметры диода

1. Крутизна (S) характеризует степень изменения анодного тока I_a при изменении анодного напряжения U_a на 1 В.

$$S = \frac{dI_a}{dU_a}, \text{ мА/В, т. е. } S = \frac{I_{a2} - I_{a1}}{U_{a2} - U_{a1}} = \frac{dI_a}{dU_a} = \text{tg} \alpha_1,$$

где α – угол наклона характеристики.

2. Внутреннее сопротивление лампы (R_i) – это величина, обратная крутизне анодной характеристики диода:

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} = \frac{1}{S}.$$

Чем больше крутизна S и меньше внутреннее сопротивление R_i , тем лучше работает лампа в качестве выпрямителя тока.

3. Допустимая мощность рассеяния на аноде: $P_a = I_a \cdot U_a$.

4. Межэлектродная емкость диода.

Трехэлектродная лампа (триод)

Ламповый триод содержит три электрода: анод (А), катод (К), сетку (С). Схема включения триода приведена на рисунке 1.68.

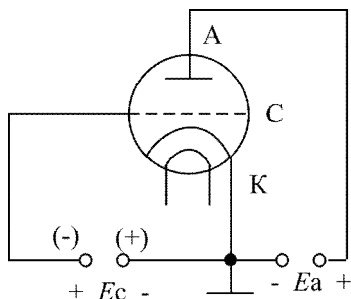


Рис. 1. 68. Схема включения триода

Принцип работы триода

При изменении E_a и E_c поле у поверхности катода изменяется и изменяется количество электронов, движущихся к аноду. На сетку может быть подано положительное (+) или отрицательное (-) напряжения относительно катода.

При отрицательном напряжении ($-E_c$) поле сетки тормозит выходящие с поверхности катода электроны, что приводит к образованию у катода отрицательного пространственного заряда и к уменьшению количества электронов, проходящих через сетку к аноду.

Положительное напряжение на сетке ($+E_c$) вызывает уменьшение пространственного заряда у катода и увеличение количества электронов, поступающих на анод. Кроме того, некоторое количество электронов может попасть на сетку, образуя сеточный ток I_c .

Характеристики триода

1) анодно-сеточные характеристики

$$i_a = f(u_c) \text{ при } u_a = \text{const}$$

2) сеточные характеристики

$$i_c = f(u_c) \text{ при } u_a = \text{const}$$

3) анодные характеристики:

$$i_a = f(u_a) \text{ при } u_c = \text{const}$$

4) сеточно-анодные характеристики:

$$i_c = f(u_a) \text{ при } u_c = \text{const}$$

Покажем на графике семейства анодно-сеточных и сеточных характеристик (рис. 1.69).

Чем выше u_a , тем больше i_a и больше сдвигается влево анодно-сеточная характеристика $i_a = f(u_c)$, показанная штриховыми линиями, а характеристика для сеточного тока проходит ниже (сплошные линии). То есть чем выше u_a , тем больше i_a при данном сеточном напряжении. Зато сеточный ток i_c становится меньше, т. к. усилившееся поле анода не дает многим электронам притягиваться к сетке.

Теперь рассмотрим анодные и сеточно-анодные характеристики (рис. 1.70).

Анодная характеристика при $u_c = 0$ идет из начала координат. Для более низких сеточных напряжений ($u_{c1}-u_{c4}$) анодные характеристики расположены правее (т. к. требуется более высокое отпирающее

анодное напряжение). Анодные характеристики для положительных сеточных напряжений ($u_{c5}-u_{c7}$) идут из начала координат и имеют выпуклость влево, а не вправо (т. е. при большем положительном u_c , i_a больше).

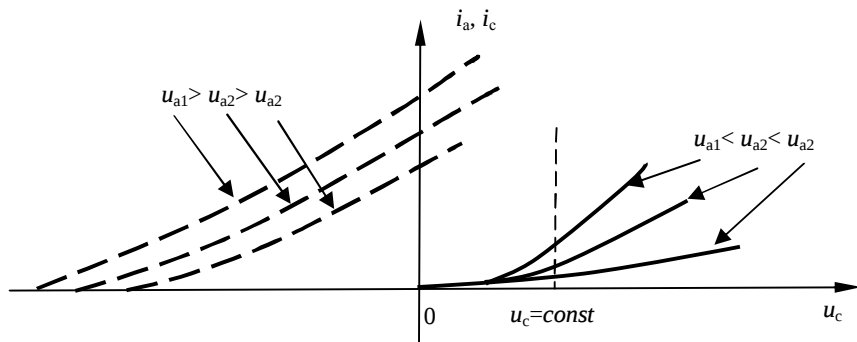


Рис. 1.69. Анодно-сеточные и сеточные характеристики триода

Сеточно-анодные характеристики (штриховые линии) даны только для положительных u_c , т. к. при отрицательных u_c ток сетки отсутствует. При $u_a = 0$, $i_c = \max$ и тем больше, чем выше сеточное напряжение.

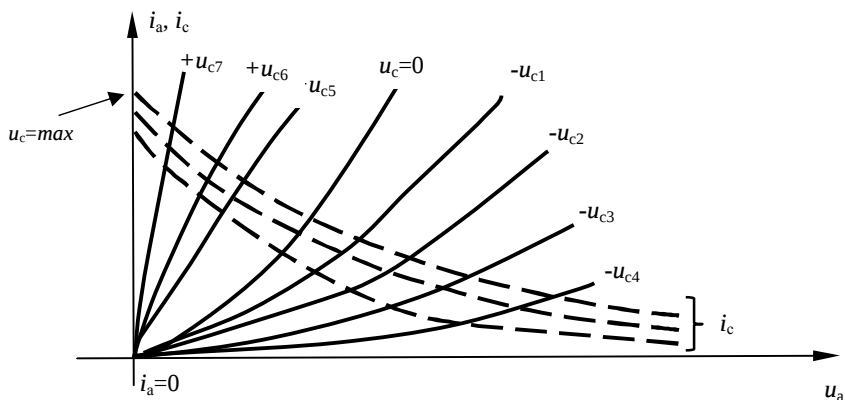


Рис. 1.70. Анодные и сеточно-анодные характеристики триода

Применяются триоды в качестве приемно-усилительных элементов малой мощности для усиления низкой частоты и детектирования (т. е. выделения сигналов низкой частоты из общего сигнала), а также в генераторах, усилителях радиочастоты, электронных стабилизаторах напряжения.

Тетроды и пентоды

Тетроды – это четырехэлектродные лампы, имеют вторую сетку, которая называется экранирующей, и расположена между управляющей сеткой и анодом (рис. 1.71). Экранирующая сетка предназначена для повышения коэффициента усиления и внутреннего сопротивления. Экранирующая сетка обозначается индексом С2, а управляющая сетка – С1.

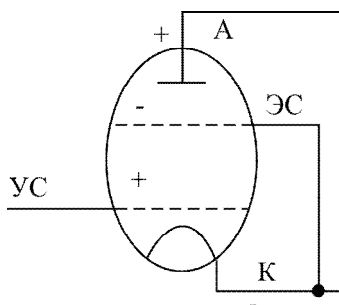


Рис. 1.71. Конструкция тетроды

Если экранирующая сетка соединена с катодом, то она экранирует катод и управляющую сетку от действия анода. Экранирующая сетка перехватывает большую часть электрического поля анода и сквозь экранирующую сетку проникает только небольшая часть силовых линий от анода. Ослабление поля анода экранирующей сеткой учитывает проницаемость этой сетки D_2 . Электрическое поле, проникающее через ЭС, далее перехватывается управляющей сеткой с проницаемостью D_1 . Проницаемость тетрода есть произведение проницаемостей управляющей (УС) и экранирующей (ЭС) сеток: $D = D_1 D_2$.

Величина D показывает, какую долю воздействия напряжения управляющей сетки на катодный ток составляет воздействие напряжения анода. Например, если $D = 0,01$, то означает, что анодное напряжение в 1 В влияет на катодный ток также как 0,01 В напряжения управляющей сетки (УС). Т. к. коэффициент усиления

$$m = \frac{1}{D} = \frac{1}{D_1 \times D_2},$$

то при $D = 0,01$, $m = 100$.

То есть с помощью двух сеток достигается высокий коэффициент усиления m и высокое внутреннее сопротивление R_i (т. к.

$$m = SR_i \text{ т. е. } R_i = \frac{m}{S}.$$

Недостатком тетрода является так называемый *динатронный эффект*. Электроны, ударяя в анод, выбивают из него вторичные электроны. В тетроде вторичная эмиссия анода не проявляет себя, если напряжение ЭС меньше напряжения A . Если же тетрод работает с нагрузкой, то при увеличении анодного тока напряжение A может стать меньше напряжения на ЭС. Тогда вторичные электроны, вылетевшие с A , притягиваются к ЭС. Возникает ток вторичных электронов i_{a2} , направленный противоположно току первичных электронов i_{a1} . Общий анодный ток уменьшается, а ток ЭС увеличивается i_{c2} . Это называется динатронным эффектом анода.

Динатронный эффект в тетроде вреден, т. к. возникает резкая нелинейность анодных и анодно-сеточных характеристик, что создает нелинейные искажения при усилении.

Пентодами называются пятиэлектродные лампы. В них еще сильнее выражены положительные свойства тетродов и устранен динатронный эффект. В пентоде имеется еще одна сетка, расположенная между анодом и экранирующей сеткой. Ее называют защитной сеткой, т. к. она защищает лампу от динатронного эффекта. Защитная сетка обычно соединяется с катодом, т. е. имеет нулевой потенциал относительно катода и отрицательный потенциал относительно анода (рис. 1.72).

Действие защитной сетки состоит в том, что между ней и анодом создается электрическое поле, которое тормозит, останавливает и возвращает на анод вторичные электроды, выбитые из анода. Они не проникают на экранирующую сетку и динатронный эффект полностью устраняется.

Пентоды отличаются от тетродов более высоким коэффициентом усиления (m), достигающим иногда нескольких тысяч. Это объясняется тем, что защитная сетка выполняет роль дополнительной экранирующей сетки.

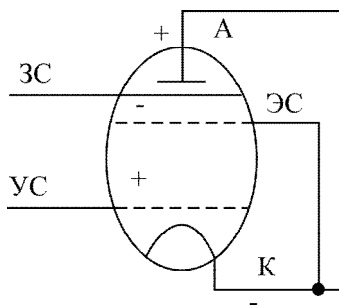


Рис. 1.72. Конструкция пентода

Возрастает и внутреннее сопротивление R_i . Крутизна S такая же, как у триодов и тетродов. Параметры тетродов и пентодов определяются аналогично параметрам триодов. Анодно-сеточные характеристики у пентодов такие же, как у тетрода.

На рисунке 1.73 изображены анодно-сеточные характеристики пентода или тетрода при двух различных значениях напряжения на аноде, причем $U_{a2} > U_{a1}$. Каждая пара характеристик, расположенных близко одна от другой, соответствует определенному напряжению на экранирующей сетке, где $U_{c2}' > U_{c1}'$. Из графика видно, что наибольшее изменение анодного тока наблюдается при изменении напряжения на экранирующей сетке, а не при изменении U_c .

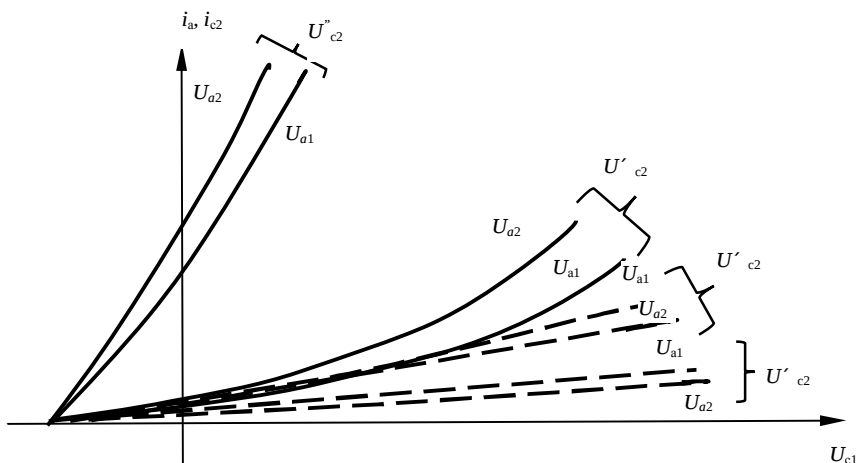


Рис. 1.73. Анодно-сеточные характеристики пентода

Характеристики для тока экранирующей сетки, показанные штриховыми линиями, идут ниже, т. к. ток экранирующей сетки i_{c2} меньше анодного. Начальные точки характеристик совпадают, т. е. лампа запирается одновременно и по анодному току i_a и по току экранирующей сетки i_{c2} .

Семейство анодных характеристик пентода (или тетрода) при $U_{c2} = \text{const}$ и при $U_{c3} = \text{const}$ представлено на рисунке 1.74.

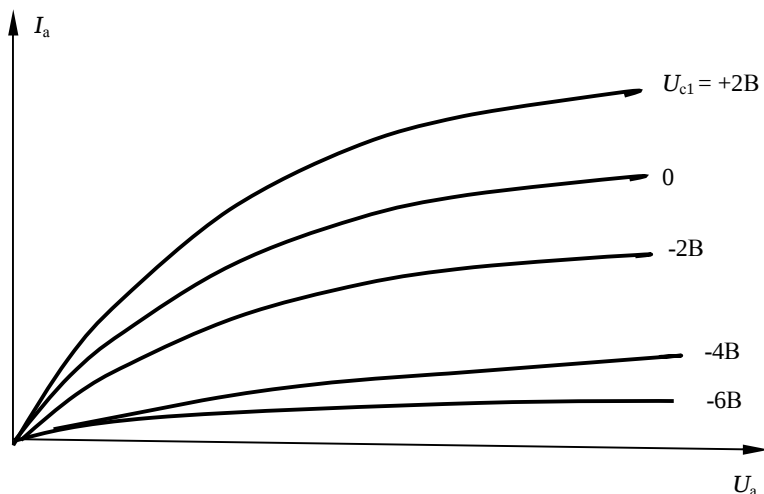


Рис. 1.74. Анодные характеристики пентода (или тетрода)

Из графика видно, что чем больше отрицательное напряжение на управляющей сетке и, соответственно, меньше ток анода, тем ниже проходят характеристики.

Кроме пентодов были разработаны так называемые лучевые тетроды. В них динаatronный эффект устранен путем создания для вторичных электронов потенциального барьера, расположенного между экранирующей сеткой и анодом [3, 7].

В лучевом тетроде, по сравнению с обычным, увеличено расстояние между экранирующей сеткой и анодом, а управляющая и экранирующая сетки имеют одинаковое число витков. При этом витки сеток расположены точно друг напротив друга. Тогда электроны летят от *К* к *А* более плотными пучками или «лучами», т. е. возрастает плотность объемного заряда, что вызывает понижение

потенциального барьера в пространстве между анодом и экранирующей сеткой. А если U_a ниже, чем U_{c2} , то в этом пространстве образуется потенциальный барьер для вторичных электронов (рис. 1.75).

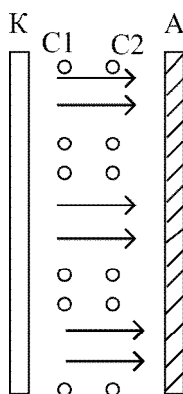


Рис. 1.75. Конструкция лучевого тетрода

Тетроды используются в качестве приемно-усилительных ламп, мощных модуляторных ламп для импульсной работы (т. е. ламп, осуществляющих управление колебательным процессом по амплитуде, частоте, фазе), в генераторах и передатчиках.

1.8.2. Электронно-лучевые приборы

К электронно-лучевым приборам относятся электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) индикаторных устройств радиолокаторов, осциллографов, кинескопы – это приемные телевизионные ЭЛТ, электронные микроскопы и некоторые другие приборы. ЭЛТ делятся на трубки с электростатическим и с магнитным управлением.

ЭЛТ с электростатическим управлением

Устройство ЭЛТ с фокусировкой и отклонением луча электрическим полем показано на рисунке 1.76.

Баллон трубки имеет цилиндрическую форму с расширением в виде конуса. На внутреннюю поверхность расширенной части нанесен люминесцентный экран (ЛЭ) – слой вещества, способного излучать свет под ударами электронов. Внутри трубки расположены электроды: катод (К), обычно косвенного накала, модулятор (М), цилиндрической формы с отверстием в доньшке (этот электрод

служит для управления плотностью электронного потока и для предварительной его фокусировки), A_1 , A_2 – аноды, P_x , P_y – управляющие пластины.

Управление производится следующим образом. На модулятор подается отрицательное напряжение. С увеличением этого напряжения все больше электронов возвращается на катод. При некотором отрицательном напряжении модулятора трубка запирается. Далее идут электроды также цилиндрической формы, это аноды. В простейшем случае их два. Под действием ускоряющего поля анодов электроны приобретают значительную скорость. Система, состоящая из К, М и А, называется электронной пушкой. И служит для создания электронного луча, т. е. тонкого потока электронов, летящих с большой скоростью от второго анода к люминесцентному экрану.

На пути электронного луча поставлены под прямым углом друг к другу две пары отклоняющих пластин (P_x и P_y). Пластины P_y отклоняют луч по вертикали и называются пластинами вертикального отклонения, а пластины P_x являются пластинами горизонтального отклонения.

Свечение люминесцентного экрана объясняется возбуждением атомов вещества экрана. Электроны, ударяя в экран, передают свою энергию атомам вещества экрана, у которых один из электронов переходит на более удаленную от ядра орбиту. При возвращении этого электрона выделяется квант энергии (фотон) и наблюдается свечение. Это явление называется катодолюминесценцией, а вещества, светящиеся под ударами электронов люминофорами.

На внутреннюю поверхность баллона наносят проводящий слой (ПС), чтобы отводить отрицательный заряд с экрана: т. к. в результате попадания электронов на экран, он может зарядиться отрицательно и создать тормозящее поле, уменьшающее скорость электронов, и тем самым уменьшится яркость свечения экрана. ПС обычно бывает графитовым и называется аквадагом.

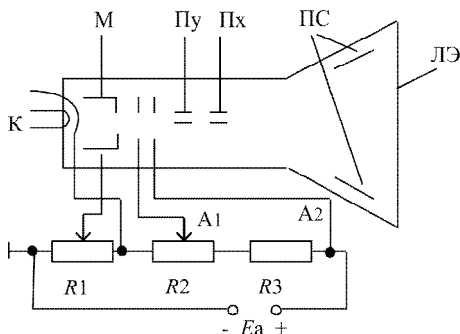


Рис. 1.76. ЭЛТ с электростатическим управлением

Резисторы R_1 , R_2 и R_3 и источник питания E_a представляют собой цепь питания ЭЛТ. Потенциометр R_1 регулирует потенциал модулятора M , который имеет отрицательный относительно катода потенциал. Чем больше отрицательный потенциал модулятора, тем меньше плотность электронного потока, прошедшего через отверстие модулятора и, следовательно, тем меньше яркость изображения на экране. При определенном значении потенциала модулятора электроны вообще не пройдут через модулятор, и экран не будет светиться. R_1 называют резистором яркости. Потенциометр R_2 управляет фокусировкой луча за счет изменения напряжения, подаваемого на первый анод A_1 , в результате чего изменяется разность потенциалов между анодами, т. е. напряженность поля.

Основные параметры ЭЛТ:

- 1) послесвечение;
- 2) разрешающая способность;
- 3) яркость свечения экрана;
- 4) чувствительность к отклонению:

$$S_x = x/U_x; \quad S_y = y/U_y;$$

ЭЛТ с электростатическим управлением используются в осциллографах.

ЭЛТ с магнитной фокусировкой и магнитным отклонением луча

Подобные ЭЛТ получили широкое распространение в качестве приемных телевизионных трубок или кинескопов. Конструкция магнитных трубок проще, чем электростатических, т. к. фокусирующая и отклоняющая системы в виде катушек находятся снаружи трубок (рис. 1.77).

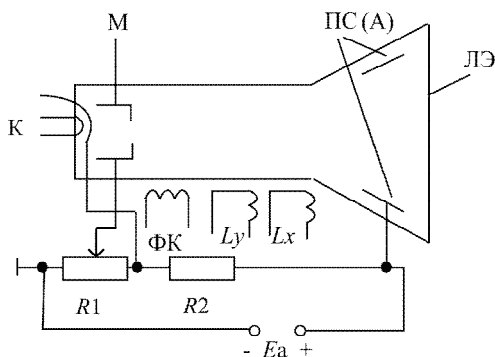


Рис. 1.77. ЭЛТ с магнитной фокусировкой и магнитным отклонением луча

Электронный прожектор такой же, как и в ЭЛТ с электростатическим управлением. Анодом служит проводящий слой. ФК – это фокусирующая катушка, L_y , L_x – это отклоняющие катушки.

Система обозначений электровакуумных приборов

Первый элемент обозначения – число, указывающее напряжение накала в вольтах, например, для приемно-усилительных ламп с подогревным катодом напряжение накала составляет 6,3 В, первый элемент обозначения 6.

Второй элемент – буква, характеризует группу ламп. Приняты следующие обозначения: А – гентод, Б – диод–пентод и световой диод–пентод, Г – диод с триодом, Д – диод, Е – элементно-световой индикатор настройки, Ж – пентод и лучевой тетрод с короткой отсечкой, И – триод гексод и триод-гентод, К – пентод и лучевой тетрод с удлиненной характеристикой, Н – двойной триод, П – выходная лампа (пентод и лучевой тетрод), С – триод, Ф – триод-пентод, Х – двойной диод, Ц – кенотрон.

Третий элемент – число, указывающее порядковый номер разработки типа лампы.

Четвертый элемент – буква, характеризующая конструктивную особенность лампы. Без обозначения – лампа с металлическим баллоном, П – пальчиковые лампы, Б – сверхминиатюрные.

Примеры обозначения ламп: 6Ф5П, 1К2П, 6Ж9П, 6Н8С, 6К13П, 30Ц6С, 1Ц21П, 6Г3П, 6Х6С, 6Н24П, 6Б2П, 6П18П, 6И1П, 6Е1П.

Система обозначений электронно-лучевых трубок:

Первый элемент – размер экрана по диагонали или его диаметр.

Второй элемент – буква, указывающая тип экрана: «Л» – люминесцентный.

Третий элемент – буква, указывающая тип прибора: «К» – кинескоп; «О», – осциллографическая трубка.

Четвертый элемент – номер разработки.

Пятый элемент – буква, указывающая тип материала экрана: Б – белый, Ц – для цветного изображения.

Примеры обозначения электронно-лучевых трубок: 61ЛК5Б, 59ЛК3Ц, 11ЛК1Б, 13ЛО37Б.

Принцип действия растрового дисплея

Одним из устройств вывода информации в графическом виде является дисплей. Он построен на основе электронно-лучевой трубки. Электронный луч, попадая на экран, покрытый люминофором, излучает свет с интенсивностью, зависящей от энергии пучка. Люминофор светится лишь в течение очень короткого промежутка времени, затем изображение гаснет. Чтобы этого не произошло, все изображение необходимо многократно воспроизводить заново с частотой не менее 30 раз в секунду. Если частота регенерации будет меньшей, то изображение станет мигать.

Электронный луч под управлением дисплейного процессора вычерчивает регулярный растр горизонтальных строк развертки. Изображение при этом получается путем изменения интенсивности точек раstra, называемых пикселями. В случае цветного дисплея производится индивидуальное управление интенсивностью трех лучей: для красного, зеленого и синего цветов. В графических дисплеях применяется, как правило, от 256 до 2048 строк развертки. Чем больше строк, тем выше качество изображения.

Кинескопы входят в состав различных видеосистем. Кинескопы изготавливают с магнитным отклонением и с электростатической фокусировкой. Магнитные отклонения в кинескопах позволяет увеличить яркость изображения, так как возможно применение более высокого анодного напряжения, а достоинством электростатической фокусировки является экономичность, так как не требуется мощности на создание тока в фокусирующей катушке.

Кинескопы бывают черно-белые и цветные. В черно-белых кинескопах для получения нужной яркости, цвета свечения и длительности послесвечения к люминофору добавляет активаторы. Ими обычно служат серебро, марганец или медь.

Действие цветного кинескопа основано на свойстве человеческого глаза воспринимать цвета как результат смешивания в определенных соотношениях трех основных цветов: красного, зеленого и синего.

Осциллографические трубки предназначены для получения изображения электрических сигналов на экране. Обычно это ЭЛТ с электростатическим управлением, в которых для наблюдения применяют зеленый цвет свечения экрана, а для фотографирования – голубой или синий.

Запоминающая электронно-лучевая трубка – электронно-лучевой прибор, служащий для записи и хранения временной последовательности электрических сигналов с последующей их визуализацией в виде двумерного изображения (запоминающие трубки с видимым изображением) или с их преобразованием в новую последовательность сигналов (запоминающие электронно-лучевые преобразователи электрических сигналов). В первом случае запоминающие трубки предназначены для отображения в течение достаточно длительного времени однократно записанной информации (например, осциллограммы электрического процесса, буквенно-цифровые и графические данные с ЭВМ и т. п.). Во втором случае запоминающие трубки служат для задержки, сравнения и изменения порядка или темпов следования сигналов (например, для преобразования радиолокационных изображений в телевизионное изображение).

Индикаторная электронно-лучевая трубка предназначена для отображения знакографической, телевизионной и радиолокационной информации в различных устройствах и приборах. В индикаторных ЭЛТ применяется электромагнитное отклонение электронного луча. Фокусировка луча в разных моделях может осуществляться как электростатическим, так и магнитным способом. Экран индикаторных ЭЛТ может быть, как прямоугольной, так и круглой формы.

Передающая телевизионная трубка – общее название класса электронно-лучевых устройств, преобразующих изображение в модулированный электрический сигнал. Это составная часть телекамеры. Составными частями передающих телевизионных трубок являются светочувствительная мишень, куда проецируется изображение и электронно-лучевая пушка, осуществляющая сканирование мишени. Накопление зарядов происходит в течение всего

времени кадра, а считывание – практически мгновенно, при прохождении электронного луча. Для вещательного телевидения соотношение времени накопления и времени считывания – около полумиллиона. Сканирование мишени производится с помощью отклонения электронного луча магнитным полем, как и в кинескопе.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите принцип работы электровакуумных ламп.
2. Какие типы электровакуумных ламп вы знаете, и чем они отличаются друг от друга?
3. Назовите назначение электродов в триоде, тетроде и пентоде.
4. Перечислите основные параметры и характеристики электровакуумных приборов.
5. Для чего служит модулятор в ЭЛТ?
6. Объясните принцип работы ЭЛТ с магнитным управлением.
7. Что такое динаatronный эффект и какие меры применяются для его устранения в лучевом тетроде и пентоде?
8. Расшифруйте обозначение 6Х6С и 59ЛК3Ц.

Раздел 2. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ГЕНЕРАТОРЫ

2.1. Электронные усилители

Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для увеличения параметров входного электрического сигнала (напряжения, тока или мощности) за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала (рис. 2.1).

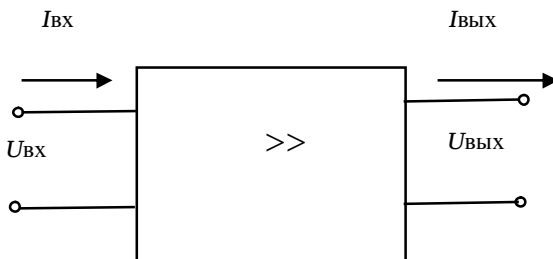


Рис. 2.1. К определению параметров усилителя

В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: с линейным режимом работы и нелинейным режимом работы.

Усилитель *с линейным режимом работы* обеспечивает на выходе сигнал, близкий по форме к входному сигналу. Многие усилители состоят из нескольких ступеней, которые осуществляют последовательное усиление сигнала и называются *каскадами*.

В усилителях *с нелинейным режимом работы* отсутствует пропорциональность между мгновенными значениями входного и выходного токов I и напряжения U . После достижения некоторой величины напряжения входного сигнала напряжение на выходе остается неизменным, т. е. ограничивается на некотором уровне. Такие усилители нашли применение в устройствах для преобразования синусоидального сигнала в импульсный.

Усилители *с линейным режимом работы* классифицируются:

- 1) в зависимости от параметра, который необходимо усилить:
 - усилители напряжения;
 - усилители тока;
 - усилители мощности;
- 2) по элементной базе:
 - ламповые усилители;

- усилители на биполярных транзисторах;
- усилители на полевых транзисторах;
- 3) по диапазону усиливаемых частот:
 - усилители постоянного тока (УПТ);
 - усилители переменного тока: усилители низкой (звуковой) частоты (УНЧ, УЗЧ); усилители высокой частоты (УВЧ); широкополосные усилители (ШПУ); избирательные усилители (ИУ);
- 4) по способу соединения каскадов между собой в многокаскадном усилителе:
 - усилители с непосредственной (гальванической) или резистивной связью (используется в УПТ);
 - усилители с резистивно-емкостной связью (используется в усилителях переменного напряжения: УНЧ, УВЧ, ШПУ);
 - усилители с трансформаторной связью (используется в усилителях мощности).

Основные параметры усилителя:

- 1) коэффициент усиления по напряжению: $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$;
- 2) коэффициент усиления по току: $K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}$;
- 3) коэффициент усиления по мощности: $K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = K_U K_I$;
- 4) входное сопротивление $R_{\text{вх}}$;
- 5) выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$;
- 6) полоса пропускания усилителя $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$, где $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ верхняя и нижняя граничные частоты, которые определяются на уровне 0,707 от $K_{U_{\text{ср}}}$ (т. е. коэффициент усиления на $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раза).

Основные характеристики усилителя:

- 1) амплитудная характеристика (АХ), выражает зависимость выходного напряжения от входного $U_{\text{вых.м}} = f(U_{\text{вх.м}})$ (рис. 2.2, а);
- 2) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $K_U = f(f)$, отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты (рис. 2.2, б);
- 3) фазо-частотная характеристика (ФЧХ) $\varphi = f(f)$, отражает зависимость угла сдвига фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала (рис. 2.2, в).

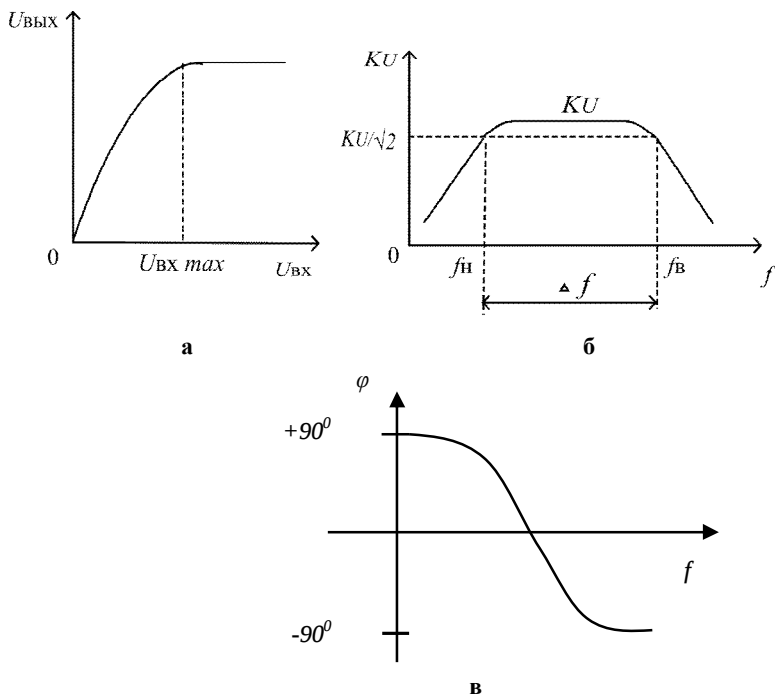


Рис. 2.2. Характеристики усилителя: а – амплитудная; б – амплитудно-частотная; в – фазо-частотная

Амплитудная характеристика имеет линейный участок, где наблюдается пропорциональная зависимость между $U_{вх.м}$ и $U_{вых.м}$. Шумы в усилителе и другие помехи приводят к тому, что при $U_{вх} = 0$ на выходе усилителя имеется некоторое напряжение. При $U_{вх} > U_{вх.маx}$ пропорциональность между входным и выходным напряжениями нарушается из-за нелинейности ВАХ транзистора, что приводит к ограничению амплитуды выходного сигнала и искажению его формы. Такие искажения называются нелинейными.

Таким образом, АХ условно можно разделить на два участка:

- линейный, где наблюдается пропорциональная зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного сигнала;
- нелинейный, где пропорциональная зависимость нарушается.

Такие искажения выходного сигнала, которые возникают ввиду нелинейности входных и выходных ВАХ транзисторов, называют нелинейными и оцениваются коэффициентом нелинейных искажений [7]:

$$k = \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}}{\sqrt{P_1}} \times 100 \%,$$

где P_1 – мощность в нагрузке, обусловленная основной гармонической составляющей напряжения;

$P_2, P_3, P_4, \dots$ – мощности, выделяемые в нагрузке под воздействием 2-й, 3-й, 4-й и т. д. гармонических составляющих напряжения.

Частотные искажения сигнала на АЧХ обусловлены наличием в схеме усилительного каскада частотно-зависимых элементов (емкостей). Уменьшение K_U в области нижних и верхних частот (на частотах меньше f_n и больше f_v) определяется частотными искажениями сигнала. Количественно эти искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений:

$$M_n = M_v = K_{U\text{ ср}} / K_{U\text{ н(в)}} \approx \sqrt{2},$$

где $K_{U\text{ ср}}$ – коэффициент усиления в области средних частот.

Появление фазового сдвига на ФЧХ объясняется задержкой сигнала в усилителе. ФЧХ усилителя показывает, что в области нижних частот выходное напряжение опережает по фазе входное, а в области верхних частот отстает от него. В предельных случаях при $f \rightarrow 0$ и $f \rightarrow \infty$ угол сдвига фаз φ стремится к $\pi/2$ и $-\pi/2$ соответственно. Фазовые и частотные искажения сигнала, вносимые усилителем, называют линейными искажениями, так как обусловлены линейными элементами схемы и не приводят к искажению формы выходного сигнала.

Принцип построения усилительных каскадов

Рассмотрим структурную схему [3, 10] (рис. 2.3).

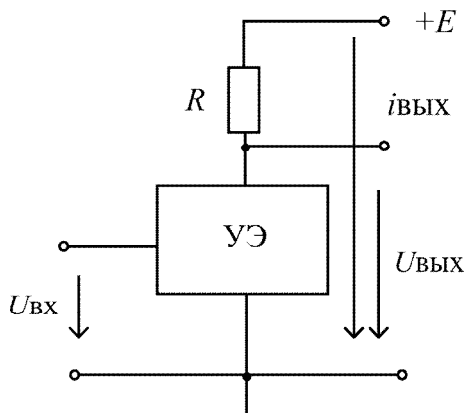


Рис. 2.3. Структурная схема усилителя

Основными элементами каскада являются усилительный элемент УЭ, которым является биполярный или полевой транзистор (или лампа), резистор R и источник питания E [11, 14].

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, который задается входным сигналом.

Одним из наиболее распространенных усилительных каскадов является каскад с общим эмиттером ОЭ (рис. 2.4).

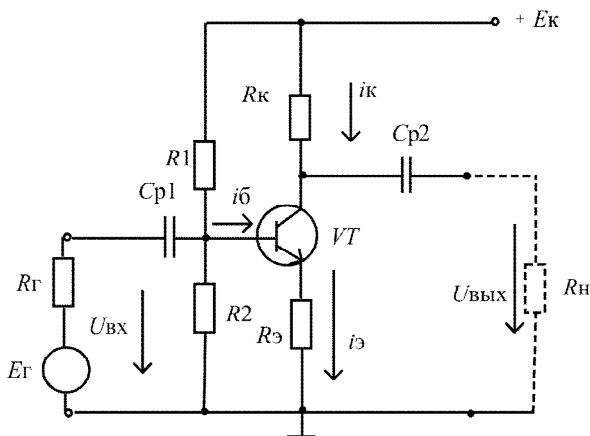


Рис. 2.4. Схема усилительного каскада с ОЭ

Основные элементы схемы:

- источник питания E_K («+» E_K для транзистора $n-p-n$ типа, «-» E_K для транзистора $p-n-p$ типа);
- биполярный транзистор $n-p-n$ типа (VT);
- сопротивление в цепи коллектора R_K , с помощью которого создается выходное напряжение.

К вспомогательным элементам каскада относятся:

- разделительный конденсатор C_{p1} , который не пропускает постоянную составляющую тока, т. е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току;
- разделительный конденсатор C_{p2} , не пропускает постоянной составляющей напряжения в нагрузку или в следующий каскад;
- делитель напряжения $R1/R2$, включенный в цепь базы. Обеспечивает требуемую работу транзистора в режиме покоя, т. е. в отсутствие входного сигнала.

Особенности многокаскадных усилителей

В многокаскадных усилителях число каскадов зависит от требуемых значений коэффициентов усиления K_U , K_I , K_P . Чем больше необходимо получить коэффициент усиления, тем больше количество каскадов, последовательно соединенных между собой. Структурная схема многокаскадного усилителя приведена на рисунке 2.5.

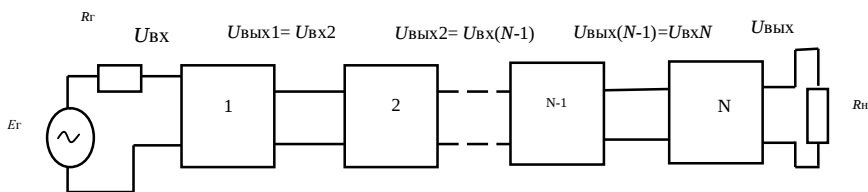


Рис. 2.5. Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления входящих в него каскадов:

$$K_U = \frac{U_n}{E_r} = \frac{U_{вых1}}{E_r} \times \frac{U_{вых2}}{U_{вх2}} \dots \frac{U_{выхN}}{U_{вхN}} = K_{U1} \times K_{U1} \dots K_{UN}.$$

Следует отметить, что с увеличением числа каскадов коэффициент частотных искажений увеличивается: $M = M_1 M_2 \dots M_N$ и, как следствие, Δf усилителя уменьшается.

Угол фазового сдвига в многокаскадном усилителе равен сумме углов фазовых сдвигов, создаваемых всеми конденсаторами в схеме: $\varphi_N = \varphi_{нр1} + \varphi_{нр2} + \dots + \varphi_{нрN}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое усилительный каскад?
2. Объясните принцип работы усилителя.
3. Назовите основные параметры и характеристики усилителя.
4. Назовите назначение основных элементов усилительного каскада.
5. Что такое коэффициент частотных искажений, и какое он принимает значение?
6. Как определить нижнюю и верхнюю граничные частоты?
7. Как определить полосу пропускания усилителя?
8. Перечислите особенности многокаскадных усилителей.

2.2. Обратные связи в усилителях

Обратной связью (ОС) в усилителях называют подачу части (или всего) выходного сигнала усилителя на его вход. Цепь, по которой осуществляется такая передача энергии, называется *цепью обратной связи*.

Виды обратных связей (ОС):

1. Специально созданные ОС, которые применяются для улучшения характеристик усилителя.
2. Паразитные ОС, которые возникают самопроизвольно и ухудшают характеристики усилителя.
3. По принципу действия:
 - ОС по напряжению: $U_{ос} = \beta U_{вых}$;
 - ОС по току: $U_{ос} = R_{ос} i_{вых}$;
 - комбинированная ОС (как по току, так и по напряжению).
4. В зависимости от способа подачи ОС на вход усилителя:
 - последовательная ОС (рис. 2.6, а);
 - параллельная ОС (рис. 2.6, б).
5. В зависимости от воздействия ОС:

- положительная ОС (ПОС), когда $U_{\text{вх}}$ складывается с $U_{\text{ос}}$, в результате чего на усилитель подается увеличенное напряжение U_y ;
- отрицательная ОС (ООС), когда из $U_{\text{вх}}$ вычитается $U_{\text{ос}}$, в результате – напряжения на входе U_y и выходе $U_{\text{вых}}$ усилителя уменьшаются.

Структурная схема усилителя с ОС состоит из двух блоков: непосредственно усилителя с коэффициентом усиления K_U и звена ОС, которое характеризуется коэффициентом передачи β (рис. 2.6).

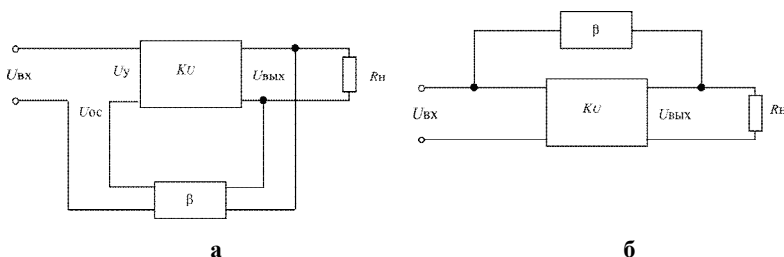


Рис. 2.6. Структурная схема усилительного каскада с последовательной ОС (а) и с параллельной ОС (б)

Наиболее часто в усилителях применяют отрицательную ОС. Влияние ООС (последовательной по напряжению) на коэффициент усиления усилителя определяется следующим образом. В соответствии со структурной схемой (рис. 2.6, а):

$$U_y = U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}},$$

$$\text{так как } U_{\text{ос}} = \beta \cdot U_{\text{вых}},$$

$$\text{то } U_{\text{вх}} = U_{\text{ос}} + U_y = U_y + \beta \cdot U_{\text{вых}}.$$

Для усилителя без ОС:

$$U_{\text{вх}} = U_y, \text{ а } K_U = U_{\text{вых}}/U_y.$$

Для усилителя с ОС:

$$K_{\text{ос}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} / (U_y + \beta \cdot U_{\text{вых}}).$$

Разделив числитель и знаменатель на напряжение U_y , получим:

$$K_{\text{ос}} = K_U / (1 + \beta \cdot K_U),$$

т. е. коэффициент усиления по напряжению усилителя с отрицательной обратной связью (ООС) уменьшается. Несмотря на снижение коэффициента K_U , ООС улучшает свойства усилителя:

1) увеличивается входное сопротивление $R_{вх}$ и уменьшается выходное сопротивление $R_{вых}$ усилителя:

$$R_{вхос} = R_{вх} (1 + \beta \cdot K_U),$$

$$R_{выхос} = R_{вых} / (1 + \beta \cdot K_U).$$

2) расширяется полоса пропускания усилителя Δf (рис. 2.7)

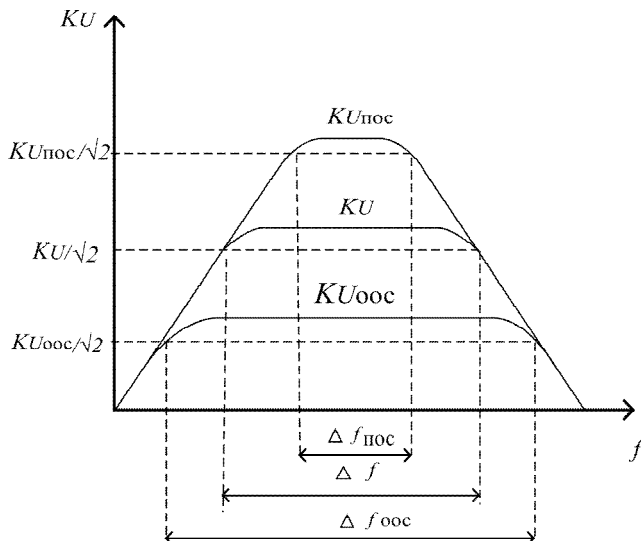


Рис. 2.7. АЧХ усилительного каскада с различными видами ОС

3) снижается уровень нелинейных искажений;

4) повышается стабильность коэффициента усиления усилителя при изменениях параметров транзисторов.

Параллельная ООС приводит к увеличению входного тока $I_{вх}$, в связи с чем уменьшается сопротивление $R_{вх\ оос}$ усилителя и сопротивление $R_{вых\ оос}$:

$$R_{вх\ оос} = (U_{вх} - U_y) / I_{вх},$$

$$R_{вых\ оос} = R_{вых} / (1 + \beta \cdot K_U).$$

Положительная обратная связь (ПОС) в усилителях обычно нежелательна, однако она может возникать произвольно, например, через общие цепи питания усилительных каскадов.

Схемы включения усилительных каскадов (УК)

Следует отметить некоторые особенности УК с ОК и ОБ. В УК с ОК резистор, с которого снимается напряжение $U_{\text{вых}}$ включен в эмиттерную цепь, а коллектор по переменной составляющей тока I и напряжения U соединен непосредственно с общей точкой усилителя. Напряжение на вход $U_{\text{вх}}$ подается между базой и коллектором через разделительный конденсатор C_{p1} , а напряжение $U_{\text{вых}}$ снимается между эмиттером и коллектором через разделительный конденсатор C_{p2} . Резистор R_6 создает начальный ток смещения в цепи базы (рис. 2.8).

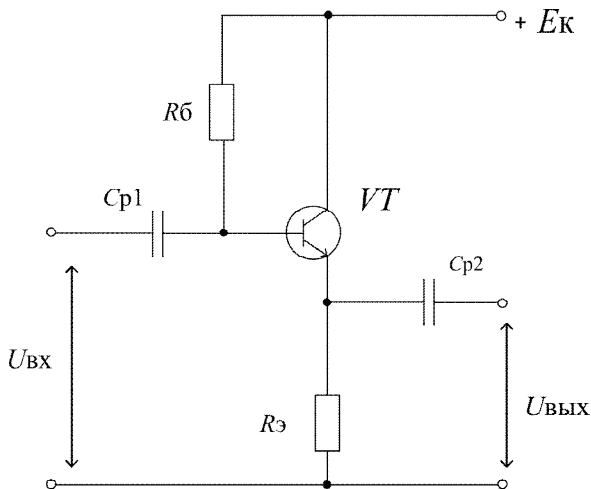


Рис. 2.8. Схема УК с ОК

УК с ОК имеет следующие параметры:

- 1) $K_U \approx 1$;
- 2) $K_P \approx K_I \approx K_{I_{03}}$;
- 3) $R_{\text{вх}}$ большое;
- 4) $R_{\text{вых}}$ малое.

В УК с ОБ (рис. 2.9) делитель R_{61} / R_{62} служит для создания оптимального тока базы в режиме покоя I_{60} . Реактивное сопротивление емкости C_6 имеет сопротивление $\ll R_{61}$ и падение напряжения на нем от переменной составляющей тока мало, поэтому можно считать, что по переменной составляющей тока база соединена с общей точкой усилителя. $U_{\text{вх}}$ подается между К и Б через C_p .

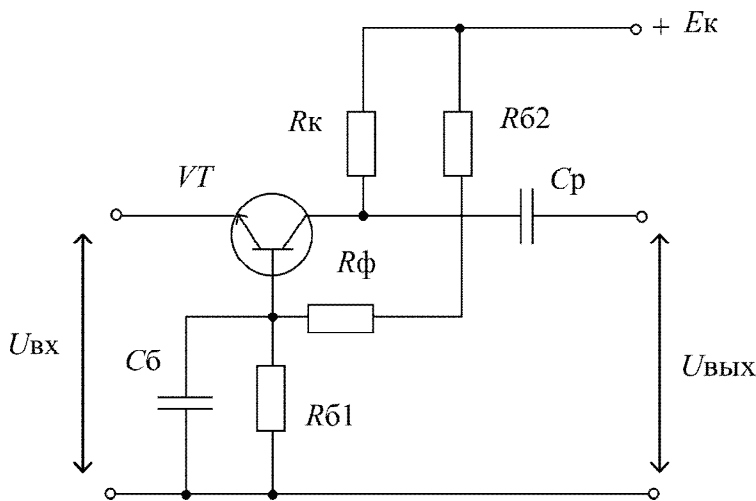


Рис. 2.9. Схема УК с ОБ

УК с ОБ имеет следующие параметры:

- 1) $K_U \approx K_{U_{03}}$;
- 2) $K_I < 1$;
- 3) $K_P = K_U K_{\beta} < K_{P_{03}}$;
- 4) $R_{вх}$ – малое;
- 5) $R_{вых}$ – большое.

Особенности УК на полевых транзисторах (ПТ)

Принцип построения УК на ПТ тот же, что и на биполярных транзисторах. Особенность заключается в том, что ПТ управляется по входной цепи напряжением, а не током. По этой причине задание режима покоя в каскадах на ПТ осуществляется подачей во входную цепь каскада постоянного напряжения составляющей величины и полярности.

Различают каскады с общим стоком (ОС), общим истоком (ОИ), общим затвором (ОЗ). Чаще всего применяются каскады с ОИ (рис. 2.10). Особенностью и преимуществом каскадов на ПТ является то, что

$$R_{вых} \approx R_c = 10^3 \dots 10^4 \text{ Ом, а } R_{вх} = R_3 \approx 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом, т. е. } R_{вых} \ll R_{вх}.$$

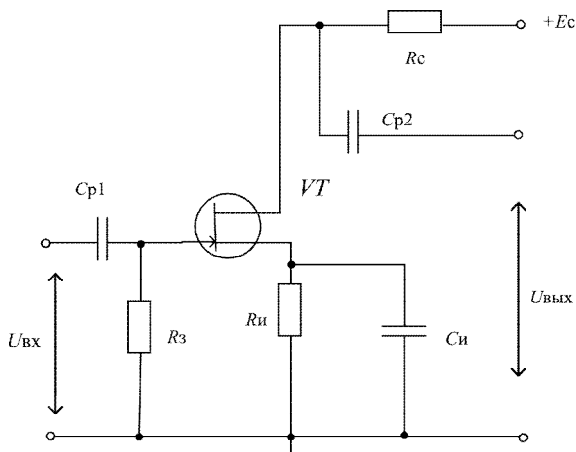


Рис. 2.10. УК на полевом транзисторе с ОИ

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое обратная связь в усилителях?
2. Назовите виды обратных связей в усилителях.
3. Каково влияние положительной и отрицательной обратных связей на параметры и характеристики усилителей?
4. Сравните схемы включения усилительных каскадов с ОЭ и ОБ.
5. Сравните схемы включения усилительных каскадов с ОК и ОЭ.

2.3. Температурная стабилизация усилителей. Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления)

Существенным недостатком транзисторов является зависимость их параметров от температуры. При повышении температуры транзистора за счет возрастания числа неосновных носителей заряда в полупроводнике увеличивается ток I_k . Это приводит к изменению коллекторных характеристик транзистора. При увеличении тока I_k на величину ΔI_k коллекторное напряжение уменьшается на $\Delta U_k = R_k \Delta I_k$ (рис. 2.11).

Это вызывает смещение рабочей точки на коллекторной и переходной характеристиках (из П1 в П2). В некоторых случаях повышение температуры может вывести рабочую точку за пределы линейного участка переходной характеристики, и нормальная работа усилителя нарушится.

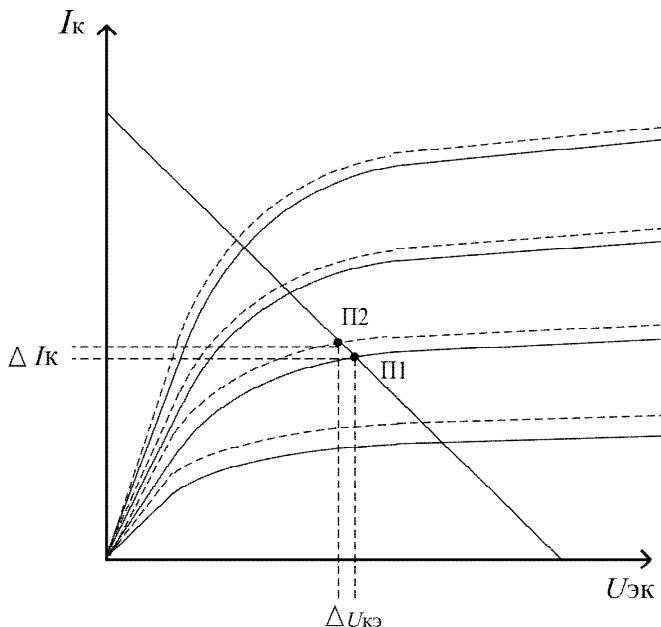


Рис. 2.11. Зависимость характеристик транзистора от температуры

Поэтому для температурной стабилизации усилителей используются специальные способы:

- а) эмиттерная стабилизация;
- б) коллекторная стабилизация.

Эмиттерная температурная стабилизация

Для уменьшения влияния температуры на характеристику усилительного каскада с ОЭ в цепь эмиттера включают резистор $R_э$, шунтированный конденсатором $C_э$ (рис. 2.12).

Напряжение $U_{бэ}$ зависит от сопротивления резисторов и определяется уравнением:

$$U_{бэ} = E_k R_2 / (R_1 + R_2) - R_э I_э,$$

где первый член уравнения есть потенциал базы, а второй – потенциал эмиттера.

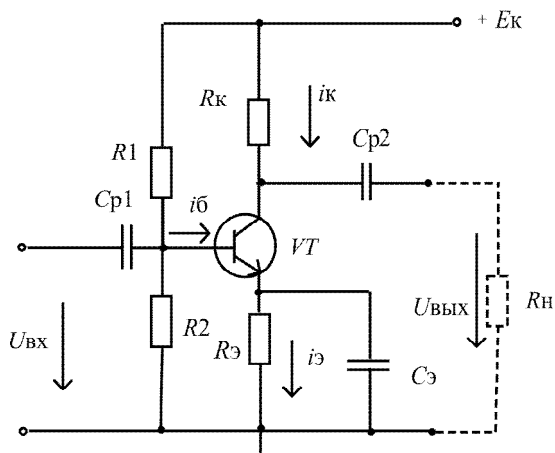


Рис. 2.12. Схема УК с эмиттерной температурной стабилизацией

При наличии $R_Э$ увеличение эмиттерного тока $I_Э = I_Б + I_К$ из-за повышения температуры приводит к возрастанию падения напряжения на сопротивлении $R_Э$. Это вызывает снижение потенциала базы по отношению к потенциалу эмиттера, т. е. напряжение $U_{БЭ}$ уменьшается, а, следовательно, уменьшаются токи $I_Э$ и $I_К$.

Однако введение сопротивления $R_Э$ изменяет работу усилительного каскада. Переменная составляющая эмиттерного тока $i_Э$ создает на резисторе дополнительное падение напряжения $U_Э = R_Э i_Э$, которое уменьшает усиливаемое напряжение, подводимое к транзистору:

$$U_{БЭ} = U_{ВЫХ} - R_Э i_Э.$$

Коэффициент усиления усилительного каскада при этом будет уменьшаться. Это явление называется отрицательной обратной связью (ООС). Для ослабления ООС параллельно сопротивлению $R_Э$ включают емкость $C_Э$, сопротивление которой намного меньше $R_Э$.

Недостатком эмиттерной стабилизации является необходимость повышения напряжения питания коллекторной цепи, т. к. при включении сопротивления $R_Э$ напряжение $U_К$ уменьшается за счет падения напряжения на сопротивлении $R_Э$.

Коллекторная температурная стабилизация

При этом способе стабилизации напряжение обратной связи подается из коллекторной цепи в цепь базы с помощью резистора $R_Б$ (рис. 2.13).

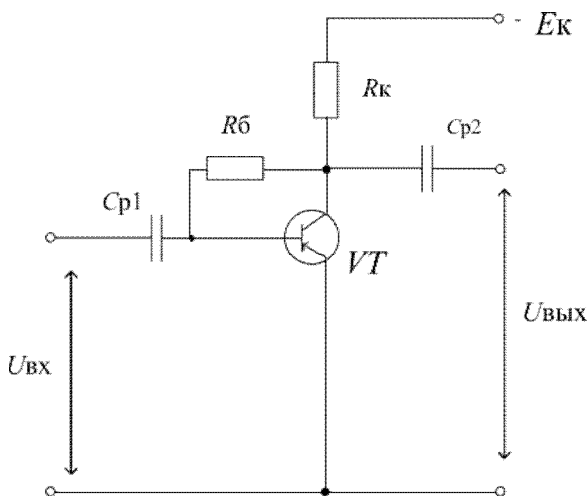


Рис. 2.13. Схема УК с коллекторной температурной стабилизацией

При повышении температуры ток I_k увеличивается, а напряжение $U_{кэ}$ уменьшается. Это приводит к снижению потенциала базы, т. е. к уменьшению напряжения $U_{бэ}$, и, как следствие, к уменьшению токов I_b и I_k , которые стремятся к своему первоначальному значению (при этом сопротивление $R_b = \text{const}$). В результате ток I_k и напряжение $U_{кэ}$ изменяются незначительно:

$$\begin{aligned} U_{кэ} &= U_{Rб} + U_{бэ} \\ U_{бэ} &= U_{кэ} - U_{Rб} \end{aligned}$$

Усилитель с коллекторной стабилизацией обладает меньшей стабильностью, чем усилитель с эмиттерной стабилизацией, но он не требует повышения напряжения питания коллекторной цепи [1, 14, 15].

Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления)

В зависимости от положения рабочей точки в режиме покоя на характеристиках транзисторов, а также значения усиленного напряжения различают 3 основных режима работы усилительных каскадов (или классов усиления: **A, B, C**) [2, 3, 6].

Основными характеристиками этих режимов являются:

- а) нелинейные искажения;
- б) коэффициент полезного действия (КПД).

Режим **A** характеризуется тем, что рабочую точку Π в режиме покоя выбирают на линейном участке (обычно посередине) входной и переходной характеристик и, соответственно, посередине линии нагрузки на семействе выходных характеристик (рис. 2.14). В этом случае нелинейные искажения усиленного напряжения будут минимальными. Благодаря этому режим **A** широко применяют в усилителях напряжения. Однако он имеет и существенный недостаток – очень низкий КПД.

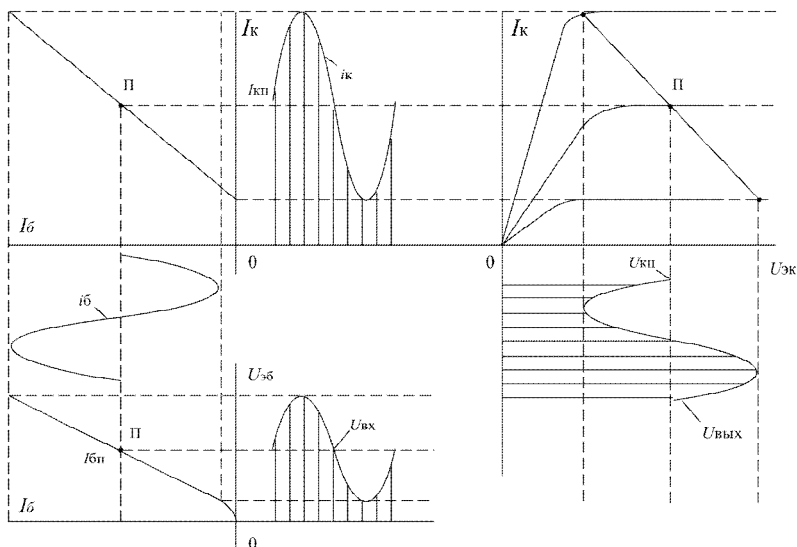


Рис. 2.14. Положение рабочей точки в режиме **A** на характеристиках УК

Значение КПД усилительного каскада в режиме **A** всегда меньше 0,5 (обычно оно редко превышает 0,3). Используется такой режим в усилителях напряжения.

Режим **B** характеризуется тем, что рабочую точку Π_1 выбирают в начале переходной характеристики (точка отсечки Π_1 на рисунке 2.15).

В режиме **B** переменные составляющие тока I и напряжения U транзистора возникают лишь в положительные полупериоды входного напряжения, т. е. появляются большие нелинейные искажения. Режим **B** характеризуется значительно более высоким КПД усилителя по сравнению с режимом **A**, т. к. $I_{кп} \gg I_0$. КПД усилителя в режиме **B** может достигать 80 %. Поэтому режим **B** используется обычно в усилителях мощности [3].

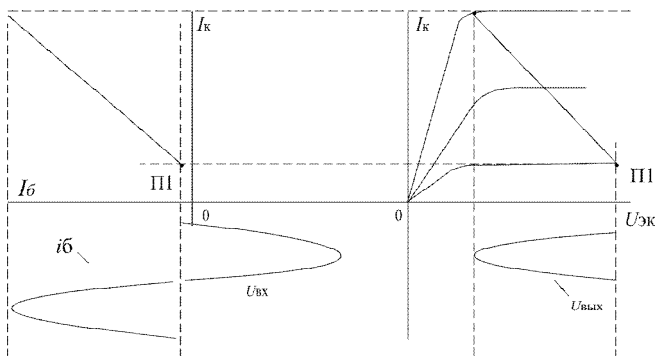


Рис. 2.15. Положение рабочей точки в режиме **В** на характеристиках УК

Режим **С** характеризуется тем, что рабочую точку П2 выбирают за точкой отсечки и ток в транзисторе возникает только в некоторой части положительного полупериода входного напряжения (рис. 2.16).

Этот режим сопровождается большими искажениями усиленного напряжения, но значение КПД может быть очень высоким и приближаться к единице. Режим **С** применяют в избирательных усилителях и автогенераторах.

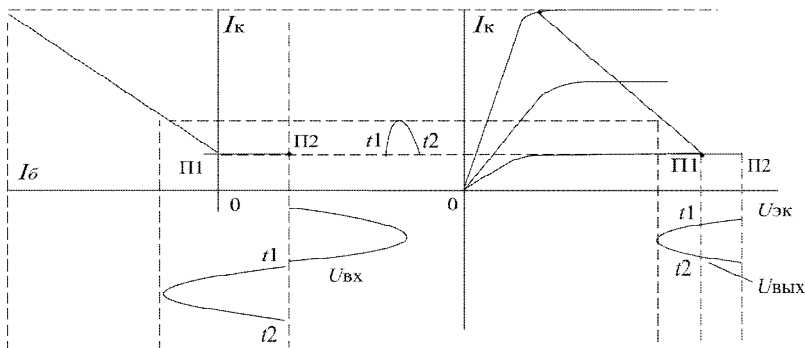


Рис. 2.16. Положение рабочей точки в режиме **С** на характеристиках УК

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните принцип эмиттерной температурной стабилизации усилительного каскада.
2. Объясните принцип коллекторной температурной стабилизации усилительного каскада.

3. Чем отличается режим усиления класса A от классов B и C ? Их использование в усилителях.

4. Как определить положение рабочей точки в режиме усиления класса B ?

5. Как определить положение рабочей точки в режиме усиления класса A ?

6. Как определить положение рабочей точки в режиме усиления класса C ?

2.4. Усилители мощности

Усилительные каскады, обеспечивающие получение максимальной мощности в нагрузочном устройстве, называются усилителями мощности.

Особенности и классификация усилителей мощности

Усилители мощности (УМ) классифицируются по следующим признакам:

1. По элементной базе:
 - УМ на биполярных транзисторах, включенных по схеме ОЭ, ОК, ОБ;
 - УМ на полевых транзисторах, включенных по схеме ОИ, ОС.
2. По используемому классу усиления:
 - одноктактные (используют режим A);
 - двухтактные (используют режим B или AB).
3. По способу подключения нагрузки:
 - трансформаторные;
 - бестрансформаторные: с двумя источниками питания и с одним источником питания.

Основные параметры УМ:

- 1) коэффициент усиления по мощности K_p ;
- 2) выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$, для получения максимальной мощности в нагрузочном устройстве $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$;
- 3) КПД (зависит от класса усиления).

Расчет основных величин, характеризующих показатели работы УМ, проводят обычно графоаналитическим методом, с помощью характеристик транзистора. В УМ нашли применение три класса усиления A , AB , B , отличающиеся положением точки покоя на линии нагрузки [1]. На рисунке 2.17 приведен пример коллекторных

характеристик транзистора с ОЭ, на которые нанесены рабочие точки в режимах *A* и *B*.

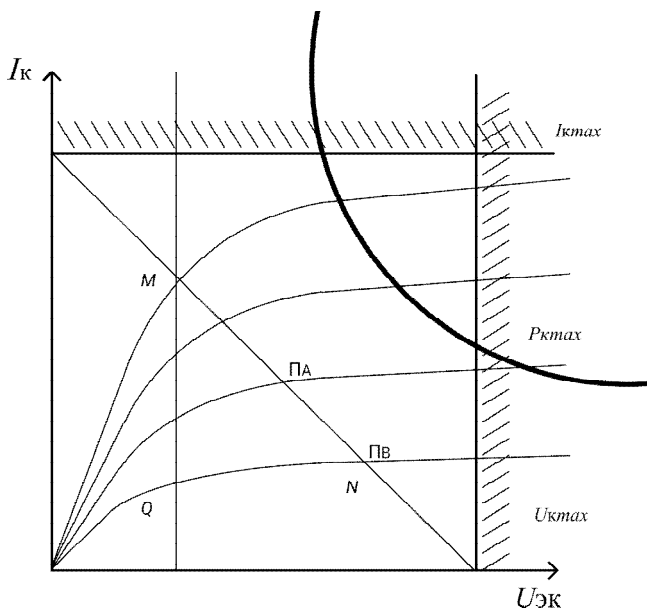


Рис. 2.17. Для расчета параметров УМ

В режиме класса *A* точка покоя PA будет находиться на нагрузочной прямой ($U_k = E_k$ при $I_k = 0$; $I_k = E_k/R_k$ при $U_k = 0$) и соответствовать середине линейного участка переходной характеристики, где можно получить оптимальные значения тока базы и напряжения между базой и эмиттером.

В режиме класса *B* точка покоя PB располагается в крайней правой части линии нагрузки при напряжении $U_{бэ} = 0$. При наличии входного сигнала ток I_k транзистора протекает только в положительный полупериод. Т. к. чаще всего в УМ используют УК с общим эмиттером, то на семейство коллекторных характеристик можно нанести линии, соответствующие предельными режимами работы, которые, в свою очередь, определяются предельными эксплуатационными величинами (рис. 2.17):

- максимальная мощность $P_{max} = P_{kmax}$;
- максимальное напряжение $U_{кэmax}$;
- максимальный ток коллектора I_{kmax} .

Площадь треугольника MQN , образованного линией нагрузки и линиями, параллельными осям координат и проведенными из точек M и N , будет пропорциональна мощности P_{max} , которую можно получить от транзистора в заданных условиях.

Коэффициент усиления по мощности находят по формуле

$$K_p = P_k / P_6,$$

где $P_6 = 0,5U_{6m}I_{6m}$, а $P_k = 0,5U_{max}I_{kmax}$.

Если в результате расчета окажется, что получаемая в нагрузочном резисторе мощность меньше требуемой, то необходимо использовать более мощный транзистор.

Однотактный трансформаторный усилитель мощности

Однотактный трансформаторный УМ используется для получения небольших мощностей (рис. 2.18).

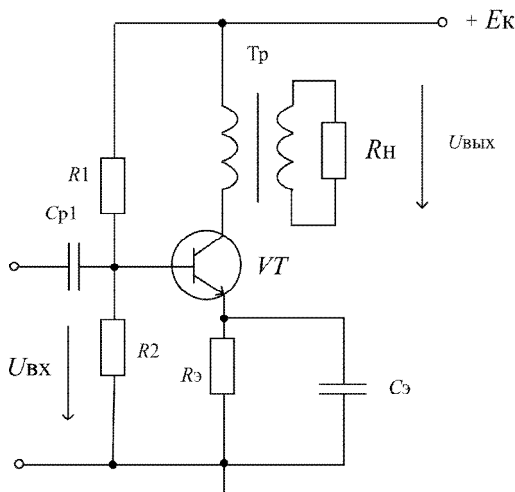


Рис. 2.18. Однотактный трансформаторный УМ

Назначение элементов

1) понижающий трансформатор ставят для согласования сопротивлений R_n и $R_{вых}$ усилителя мощности с коэффициентом $n = w_1/w_2 = \sqrt{R_{вых} / R_n}$, где w_1 и w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток. Это значит, что при определенном n можно добиться

равенства $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$, т. е. выполнить условие получения P_{max} в нагрузочном устройстве;

2) делитель $R1/R2$ фиксирует по постоянному току потенциал базы;

3) сопротивление R_3 – элемент эмиттерной температурной стабилизации;

4) разделительный конденсатор C_p , который не пропускает постоянную составляющую тока, т. е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току.

Однотактный УМ работает в режиме усиления класса **A** и усиление входного сигнала происходит за один такт работы транзистора.

Двухтактный трансформаторный усилитель мощности

Двухтактный УМ состоит из двух симметричных «плеч» (рис. 2.19). Транзисторы $VT1$ и $VT2$, которые подбирают с максимально близкими характеристиками, работают в одинаковом режиме. Единственным отличием в работе «плеч» УМ является противофазность токов и напряжений в цепях баз транзисторов.

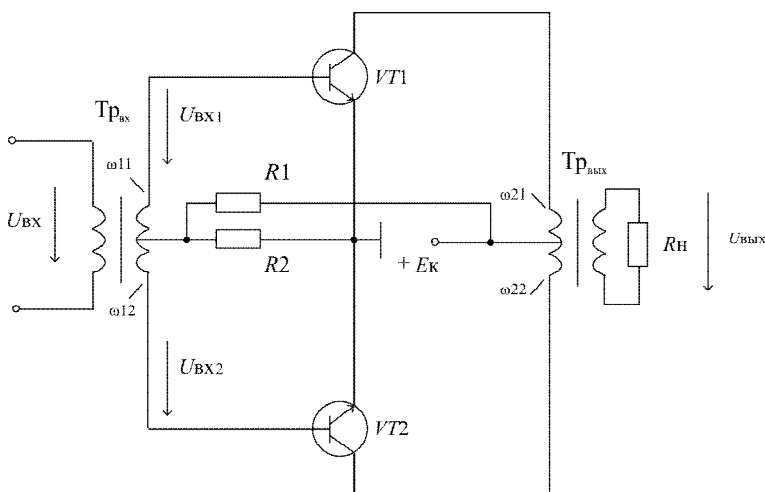


Рис. 2.19. Двухтактный трансформаторный УМ

Назначение элементов двухтактного УМ аналогично назначению соответствующих элементов однократного УМ с учетом того, что они обслуживают два транзистора. Входной трансформатор $Tr_{\text{вх}}$ обеспечивает получение двух одинаковых по модулю, но противофазных

напряжений $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$. Выходной трансформатор $\text{Tr}_{\text{вых}}$ суммирует переменные выходные тока и напряжения транзисторов. К вторичной обмотке $\text{Tr}_{\text{вых}}$ подключен нагрузочный резистор. Преимущества двухтактных усилителей наиболее ощутимы при использовании режима **В**.

При подаче входного сигнала начинающегося с положительной полуволны, на вторичной обмотке W_{11} за счет самоиндукции $\text{Tr}_{\text{вх}}$ действует отрицательная полуволна относительно общей точки обмоток, а на вторичной обмотке W_{12} действует положительная полуволна. В результате $VT2$ остается закрытым, а $VT1$ открывается и через него течет коллекторный ток $i_{\text{к1}}$. В обмотке W_{21} $\text{Tr}_{\text{вых}}$ создается напряжение U_{21} , на нагрузке опять же за счет самоиндукции действует положительная полуволна.

При поступлении на вход каскада отрицательной полуволны напряжения, полярность напряжений на вторичных обмотках $\text{Tr}_{\text{вх}}$ изменяется на обратную. Теперь закрытым остается транзистор $VT1$, а в усилении сигнала будет участвовать $VT2$. На обмотке W_{22} $\text{Tr}_{\text{вых}}$ от протекания $i_{\text{к2}}$ от $VT2$ создается напряжение U_{22} той же величины, которое будет трансформироваться в нагрузочную обмотку W_n с обратной полярностью. На нагрузке получим отрицательную полуволну напряжения.

Таким образом, процесс усиления входного сигнала осуществляется в два такта работы схемы. Первый такт сопровождается усилением одной полуволны с участием одного транзистора, а второй такт – усилением другой полуволны с участием другого транзистора [3, 4, 15].

Бестрансформаторные усилители мощности

Двухтактные каскады усиления мощности выполняют и без использования трансформаторов, что обусловлено необходимостью уменьшения массы, габаритов и стоимости УМ.

Собирают такой УМ из транзисторов разных типов (рис. 2.20), где транзистор $VT1$ -типа $p-n-p$, а транзистор $VT2$ -типа $n-p-n$.

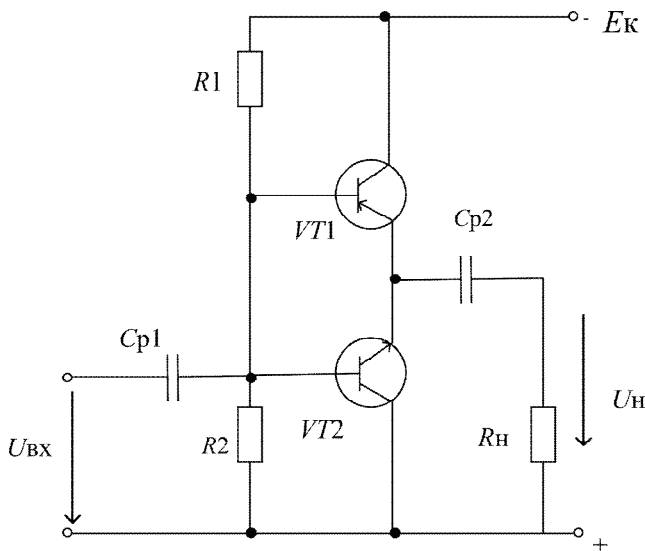


Рис. 2.20. Бестрансформаторный УМ

Конденсатор C_{p1} разделяет по постоянному току источник сигнала и входную цепь усилителя мощности. Конденсатор C_{p2} разделяется по току нагрузочный резистор и эмиттерные цепи транзисторов. На базы транзисторов действует одно и то же переменное напряжение $U_{вх}$. Однако, в силу различной структуры транзисторов токи в цепях противофазные. Нагрузочный резистор подключен к общей точке транзисторов, поэтому переменные токи в нем имеют одинаковое направление, а результирующий ток в два раза превышает переменный ток одного транзистора.

Существуют схемы бестрансформаторных усилителей мощности, где на входе используются два противофазных сигнала, которые создаются с помощью предвыходного фазоинверсного каскада. Эти схемы различаются двумя способами подключения нагрузки к выходу каскада и, соответственно, двумя способами осуществления питания схемы [1, 6].

При первом способе каскад питают от двух источников $E_{к1}$ и $E_{к2}$, имеющих общую точку, а нагрузку подключают между точкой соединения эмиттера и коллектора транзисторов и общей точкой источников питания (рис. 2.21).

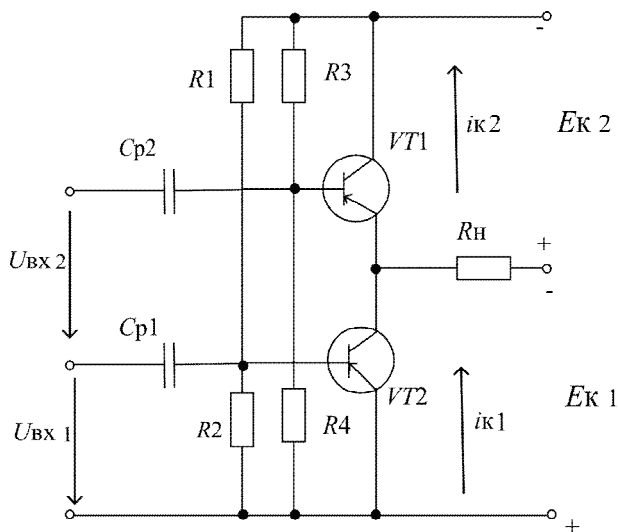


Рис. 2.21. Бестрансформаторный УМ с двумя источниками питания

При втором способе питание каскада осуществляется от одного общего источника, а нагрузку подключают через конденсатор большой емкости (рис. 2.22) [6].

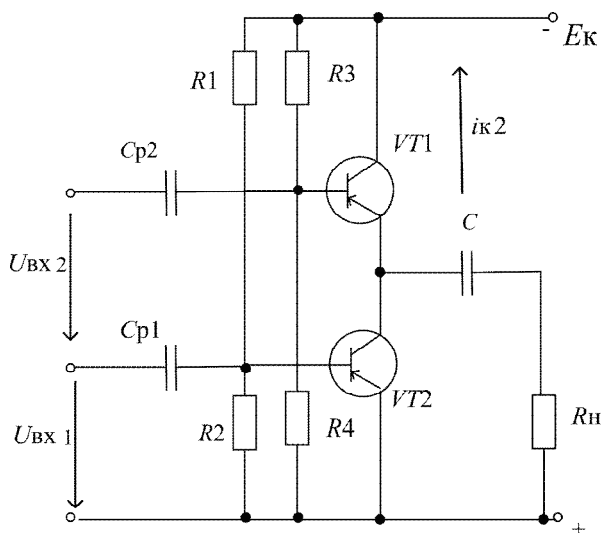


Рис. 2.22. Бестрансформаторный УМ с одним источником питания

В отсутствие сигналов на входе $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ конденсатор C заряжен до напряжения $0,5E_k$. В такте работы транзистора $VT1$, $VT2$ закрыт, и конденсатор выполняет функцию источника питания нагрузки. В такте работы $VT2$ ток нагрузки протекает через источник питания E_k . При этом ток $i_{к2}$, протекающий через конденсатор C , наполняет его энергией, компенсируя тем самым отданную в нагрузку энергию в предыдущем такте. $VT1$ и $VT2$ в схемах с двумя противофазными входными сигналами имеют различные способы включения: $VT1$ – по схеме ОЭ, $VT2$ – по схеме ОК, а это значит, что коэффициенты усиления по напряжению различны и должны быть приняты меры по выравниванию коэффициентов усиления для обеих полуволн входного сигнала. Эту задачу решают обеспечением соответствующих коэффициентов усиления по двум входам фазоинверсного каскада.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные параметры усилителя мощности.
2. Назовите отличия однотактного усилителя мощности от двухтактного.
3. Каковы преимущества и недостатки различных схем усилителей мощности?
4. Введением какого элемента в схему однотактного трансформаторного усилителя мощности можно получить максимальную мощность в нагрузочном устройстве?
5. Объясните принцип работы двухтактного трансформаторного усилителя мощности.
6. Объясните принцип работы двухтактного бестрансформаторного усилителя мощности с одним источником питания.
7. Объясните принцип работы двухтактного бестрансформаторного усилителя мощности с двумя источниками питания.

2.5. Усилители постоянного тока (УПТ)

Особенности УПТ

Часто при проведении измерений в электронных устройствах необходимо усиливать сигналы очень низкой частоты – порядка долей Гц. Для этого требуется усилители, имеющие равномерную амплитудно-частотную характеристику до самых низких частот. Такие усилители называют усилителями постоянного тока (УПТ). Приведем для сравнения АЧХ УПТ и усилителя с RC -связью (рис. 2.23).

В области низких и средних частот АЧХ УПТ равномерна. В области высоких частот в УПТ, так же, как и в усилителях с RC -связью, появляются фазовые сдвиги и частотные искажения, что приводит к уменьшению K_U .

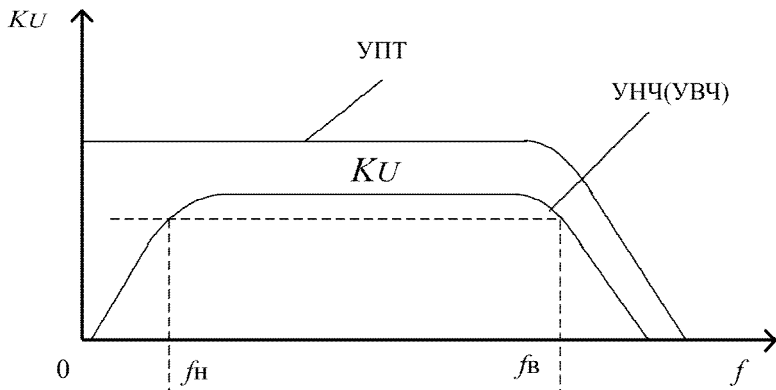


Рис. 2.23. АЧХ УПТ

В УПТ возникают трудности, связанные с отделением полезного сигнала от постоянных составляющих напряжения U и тока I , которые необходимы для работы транзисторов усилительных каскадов.

Как и в усилителях с RC -связью, характеристики УПТ должны отвечать ряду требований:

1. В отсутствие входного сигнала должен отсутствовать выходной сигнал.
2. При изменении знака входного сигнала должен изменять знак и выходной сигнал.
3. Напряжение на нагрузочном устройстве должно быть пропорционально входному напряжению.

УПТ с одним источником питания и двумя источниками питания

Схема УПТ с одним источником питания представлена на рисунке 2.24). Простейший УПТ с одним источником питания состоит из обычного усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ (выделен штриховыми линиями), у которого отсутствует конденсатор C в цепях эмиттера, что приводит к снижению коэффициента усиления из-за возникновения отрицательной обратной связи, но обеспечивает большую полосу пропускания.

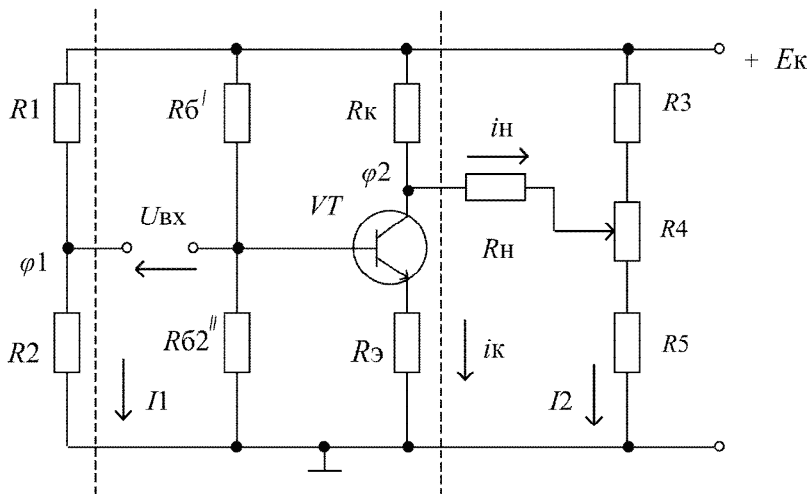


Рис. 2.24. Схема УПТ с одним источником питания

Если рассмотреть временную диаграмму работы схемы, то видно, что потенциалы средних точек делителей таковы, что при $U_{\text{ВХ}} = 0$, $j_6 = j_1$, $j_K = j_2$, вследствие чего отсутствует ток во входной цепи и в нагрузочном резисторе $i_H = 0$. Для точной подстройки режима в выходной цепи ставится переменный резистор R_5 . При подаче входного сигнала появляется ток во входной цепи, изменяются базовый и коллекторные токи, что приводит к изменению напряжения на коллекторе и появлению тока в нагрузке i_H .

Потенциальная диаграмма (рис. 2.25) показывает, что при отсутствии входного напряжения $U_{\text{ВХ}} = 0$ в интервале времени $(0 \leq t \leq t_1)$, выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = 0$, в интервале времени $t_1 < t < t_2$ при входном напряжении $U_{\text{ВХ}} < 0$, выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} > 0$, а в интервале времени $t > t_2$, входное напряжение $U_{\text{ВХ}} > 0$, выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} < 0$. Таким образом, компенсируется постоянная составляющая коллекторного тока.

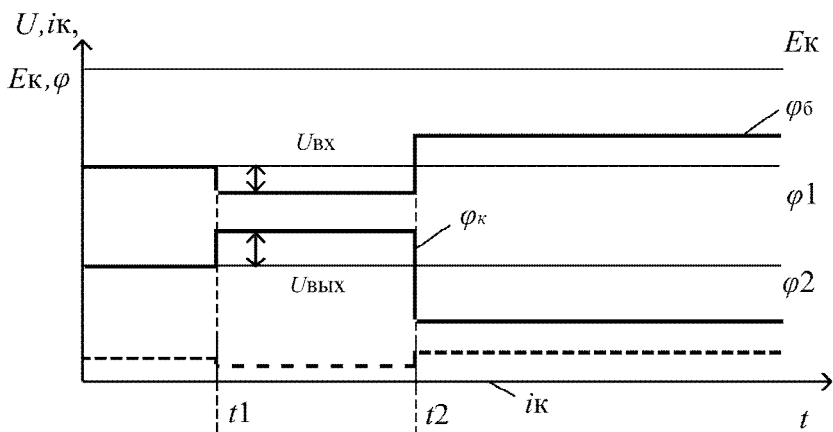


Рис. 2.25. Потенциальная диаграмма работы УПТ с одним источником питания

В схеме УПТ с двумя источниками питания (рис. 2.26) источники $+E_1$ и $-E_2$ создают положительное и отрицательное напряжения относительно общей точки, имеющей нулевой потенциал («земля»). Входной сигнал подается непосредственно на базу транзистора.

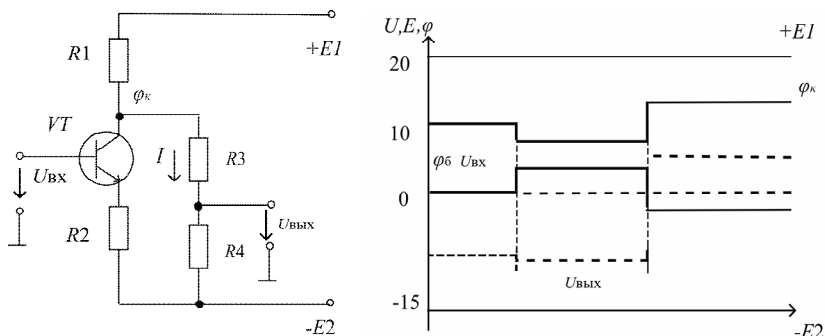


Рис. 2.26. УПТ с двумя источниками питания и его потенциальная диаграмма

При напряжении $U_{ВХ} = 0$, потенциал базы $\phi_6 = 0$. К делителю R_3/R_4 , в отсутствии входного сигнала, приложено напряжение $\phi_6 + \phi_4 = \phi_6 - (-E_2) = \phi_6 + E_2$, при этом потенциал средней точки делителя должен быть равен нулю, т. е. напряжение на выходе равно 0, при этом падение напряжения на плечах делителя соответственно $U_{R3} = \phi_6$, $U_{R4} = E_2$.

При подаче входного напряжения (положительной полярности) возрастает ток базы транзистора I_b , что приводит к увеличению коллекторного тока I_k . При этом увеличивается падение напряжения на R_1 и снижается потенциал верхнего вывода делителя R_3/R_4 , снижается потенциал средней точки делителя и на выходе появляется напряжение отрицательной полярности. Таким образом, делитель R_3/R_4 компенсирует постоянную составляющую напряжения и передает с некоторым уменьшением усиленное напряжение с коллектора транзистора на выход усилителя.

Дрейф нуля в УПТ

УПТ имеют недостаток, затрудняющий усиление очень малых постоянных напряжений и токов. В УПТ существует так называемый дрейф нуля, который определяет нижний предел усиливаемых напряжений. Дрейф нуля заключается в следующем. С течением времени изменяются токи транзисторов и напряжения на их электродах. При этом нарушается компенсация постоянной составляющей напряжения и на выходе усилителя появляется напряжение в отсутствие входного сигнала [7, 11]. Поскольку УПТ должен усиливать напряжения вплоть до самых низких частот, всякое изменение постоянных составляющих напряжения $U_{к0}$, $U_{б0}$ (из-за нестабильности источников питания; старения транзисторов; изменения температуры окружающей среды и т. д.) принципиально не отличается от полезного сигнала.

Для борьбы с дрейфом нуля принимают целый ряд мер:

- стабилизацию напряжения источников питания;
- стабилизацию температурного режима и тренировку транзисторов;
- использование дифференциальных (или балансных) схем УПТ;
- преобразование усиливаемого напряжения.

Дифференциальные или балансные схемы построены по принципу четырехплечевого моста (рис. 2.27).

Если мост сбалансирован, т. е. $R_1/R_2 = R_4/R_3$, то при изменении напряжения источника питания $+E_k$ баланс не нарушается и в нагрузочном резисторе R_n ток равен нулю. С другой стороны, при пропорциональном изменении сопротивлений резисторов R_1 , R_2 или R_3 , R_4 баланс моста тоже не нарушается. Если заменить резисторы R_2 , R_3 транзисторами, то получается дифференциальная схема, часто применяемая в УПТ (рис. 2.28).

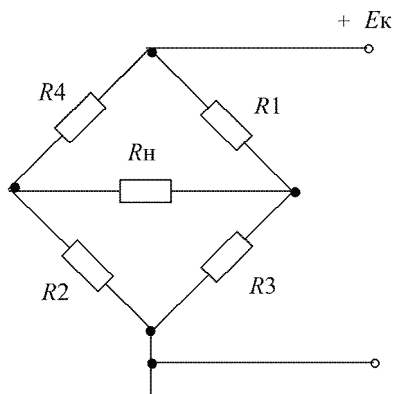


Рис. 2.27. Схема четырехплечего моста

В дифференциальном усилителе сопротивления резисторов R_2 , R_3 в коллекторных цепях транзисторов выбирают равными, и режимы обоих транзисторов устанавливают одинаковыми. Пары транзисторов подбирают с идентичными характеристиками.

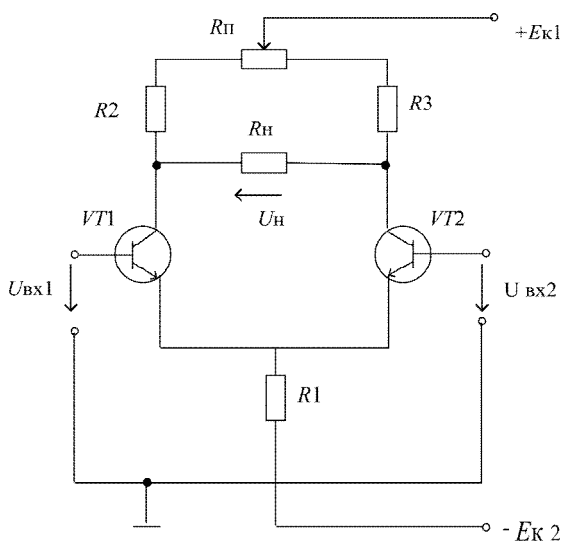


Рис. 2.28. Дифференциальная схема в УПТ

В этой схеме резистор R_1 стабилизирует ток транзисторов, а переменный резистор $R_п$ служит для установки нуля.

Выражение для коэффициента усиления дифференциального каскада аналогично выражению для K_U обычного однокаскадного усилителя с коллекторной нагрузкой:

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}.$$

При подаче входного сигнала на базу транзистора $VT1$ увеличивается ток базы транзистора $VT1$ и уменьшится ток базы транзистора $VT2$. При этом токи $I_{\text{э1}}, I_{\text{к1}}$ увеличиваются, а токи $I_{\text{э2}}, I_{\text{к2}}$ уменьшаются. Изменение токов происходит на одну и ту же величину. Напряжение $U_{\text{к1}} = E_{\text{к1}} - I_{\text{к1}}R_{\text{к1}}$ уменьшается, что вызывает приращение напряжения $-DU_{\text{к1}}$, противоположное по знаку (т. е. проинвертированное) относительно входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$. Напряжение $U_{\text{к2}} = E_{\text{к2}} - I_{\text{к2}}R_{\text{к2}}$ возрастает, что создает приращение напряжения того же знака $+DU_{\text{к2}}$ (т. е. непроинвертированное), что и напряжение входного сигнала. Таким образом, в данном случае выход каскада со стороны коллектора транзистора $VT1$ является инвертирующим, а со стороны коллектора транзистора $VT2$ – неинвертирующим. Если подается сигнал на вход $VT2$, то коллектор транзистора $VT2$ будет инвертирующим выходом, а коллектор $VT1$ – неинвертирующим.

Операционные усилители (ОУ)

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель напряжения, предназначенный для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами: их усиление или ослабление, сложение или вычитание, интегрирование или дифференцирование и т. д. Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости, индуктивности и другие электронные элементы.

ОУ относится к усилителям постоянного тока (УПТ) с большим коэффициентом усиления, имеющим дифференциальный вход (два входных вывода) и один общий выход. В электронных схемах ОУ могут быть обозначены следующим образом (рис. 2.29):

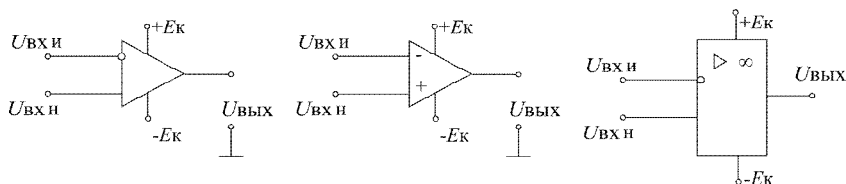


Рис. 2.29. Условное изображение ОУ

Идеальный ОУ имеет коэффициент усиления K_U , стремящийся к бесконечности (у реальных ОУ он обычно превышает 10^5), обладает большим входным (10^6 Ом) и малым выходным сопротивлением (доли Ом). Один вход ОУ ($U_{вх\ и}$, «+») называется неинвертирующим, а второй ($U_{вх\ и}$, «-») – инвертирующим.

ОУ имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на *неинвертирующий вход* $U_{вх\ и}$ приращение выходного сигнала $U_{вых}$ совпадает по знаку (фазе) с приращением $U_{вх\ и}$. Если сигнал подан на *инвертирующий вход* $U_{вх\ и}$, то приращение $U_{вых}$ имеет обратный знак (в противофазе) по сравнению с приращением $U_{вх\ и}$.

Инвертирующий вход используют в усилителях для введения отрицательной обратной связи (ООС), благодаря чему повышается стабильность K_U , снижаются нелинейные искажения, увеличивается $R_{вх}$.

Структурная схема ОУ представлена на рисунке 2.30.



Рис. 2.30. Структурная схема ОУ

Основу ОУ составляет дифференциальный каскад [6, 7], который используется в качестве входного каскада усилителя.

Выходным каскадом ОУ обычно является эмиттерный повторитель (ЭП), который обеспечивает нагрузочную способность всей схемы. Т. к. K_U (ЭП) = 1, то необходимое значение K_U ОУ обеспечивается подключением дополнительных каскадов между дифференциальным каскадом и ЭП. В зависимости от количества используемых каскадов, ОУ подразделяются на двух- и трехкаскадные. В трехкаскадных ОУ входной дифференциальный каскад обычно выполняют с резистивными нагрузками, а в двухкаскадных – с динамическими нагрузками.

Характеристики ОУ

Важнейшими характеристиками ОУ являются его амплитудные (или передаточные) характеристики и амплитудно-частотные характеристики. Их представляют в виде двух кривых по инвертирующему и неинвертирующему входам, соответственно. Эти характеристики снимаются при подаче сигнала на один из входов, при нулевом сигнале на другой (рис. 2.31).

Здесь горизонтальные участки кривых соответствуют режиму транзистора ЭП (эмиттерного повторителя) (транзистор полностью открыт).

При изменении напряжения входного сигнала на этих участках $U_{\text{вых.}}$ остается без изменения и определяется $U_{\text{вых. max}}^+$ и $U_{\text{вых. max}}^-$, которые близки к напряжению источников питания E_K .

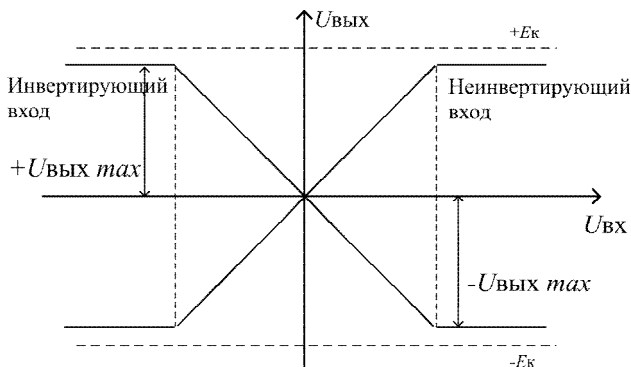


Рис. 2.31. Амплитудные (или передаточные) характеристики ОУ

Наклонному участку кривых соответствует пропорциональная зависимость напряжения $U_{\text{вых.}}$ от напряжения $U_{\text{вх.}}$. Угол наклона определяется коэффициентом усиления $K_{\text{ОУ}} = \Delta U_{\text{вых.}} / \Delta U_{\text{вх.}}$. Значение $K_{\text{ОУ}}$ зависит от типа ОУ и может принимать значение от нескольких сотен до сотен тысяч.

Когда кривые проходят через 0, это соответствует напряжениям $U_{\text{вых.}} = 0$ и $U_{\text{вх.}} = 0$. Такое состояние называется балансом ОУ. Однако для реальных ОУ условие баланса обычно не выполняется (наблюдается разбаланс). При напряжении $U_{\text{вх.}} = 0$, $U_{\text{вых.}}$ может быть чуть больше или чуть меньше нуля. Напряжение, при котором $U_{\text{вых.}} = 0$, называется входным напряжением смещения нуля $U_{\text{см0}}$. Оно определяет значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ для создания баланса. Основной причиной разбаланса является разброс параметров дифференциального усилительного каскада (обычно транзисторов).

Другой важной характеристикой ОУ является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (рис. 2.32).

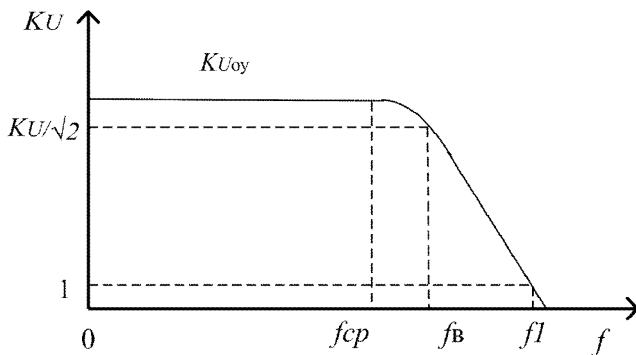


Рис. 2.32. Амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя

Параметры ОУ

1. Входные параметры:

- а) входное сопротивление $R_{вх}$;
- б) входные токи смещения;
- в) разность и дрейф токов смещения.

2. Выходные параметры:

- а) выходное сопротивление $R_{вых}$;
- б) максимальное выходное напряжение $U_{max\text{ вых}}$;
- в) выходной ток $I_{вых}$.

3. Энергетические параметры:

- а) максимальные потребляемые токи от обоих источников питания;
- б) суммарная потребляемая мощность.

4. Частотные параметры (определяют по АЧХ ОУ, (см. рис. 2.32):

- а) частота среза $f_{ср}$, начиная с которой АЧХ имеет спадающий характер;
- б) частота единичного усилителя f_1 , при которой $K_{U_{0y}} = 1$;
- в) граничная частота $f_{в\text{ гр}}$, которой соответствует снижение коэффициента усиления ОУ в $\sqrt{2}$ раз.

5. Скоростные (динамические) параметры:

- а) скорость нарастания выходного напряжения (скорость отклика);
- б) время установления выходного напряжения.

Большинство ОУ изготавливается в виде интегральных микросхем по полупроводниковой технологии (серии К140, К153, К740 и др.), некоторые – по гибридной (серии 284, 286).

Примеры интегральных ОУ: К140УД21, К140УД24 (высокоточные); К157УД1, К1408УД1 (мощные и высоковольтные); К140УД10, К544УД2 (быстродействующие).

Аналоговая схемотехника на основе операционных усилителей позволяет создавать различные вычислительные схемы. На основе операционных усилителей могут быть реализованы операции сложения и вычитания, дифференцирования и интегрирования. Недостатком этих вычислительных схем является невысокая точность вычислений. Однако этой точности в целом ряде случаев бывает вполне достаточно.

Большинство ОУ изготавливается в виде интегральных микросхем по полупроводниковой технологии (серии К140, К153, К740 и др.), некоторые – по гибридной (серии 284, 286).

Примеры интегральных ОУ: К140УД21, К140УД24 (высокоточные); К157УД1, К1408УД1 (мощные и высоковольтные); К140УД10, К544УД2 (быстродействующие).

Вычислительные схемы на ОУ

1. Инвертирующий усилитель (рис. 2.33).

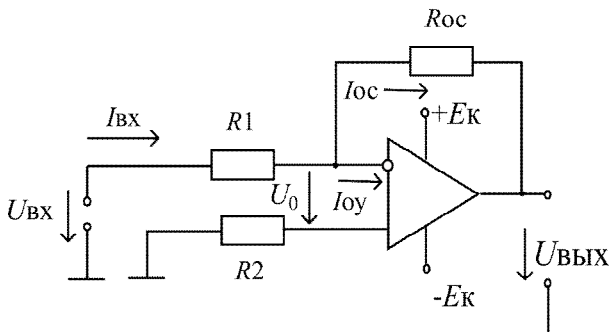


Рис. 2.33. Инвертирующий усилитель

Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного сигнала относительно входного и создается введением по инвертирующему входу ОУ с помощью резистора R_{oc} отрицательной обратной связи по напряжению. Неинвертирующий вход заземляется. На инвертирующий вход через резистор $R1$ подается входной сигнал. Если принять значение $R_{вхОУ} = \infty$ и входной ток ОУ $I_{OY} = 0$, то для узла 1 ток $I_{вх} = I_{oc}$, и тогда

$$U_{вх} - U_0 / R1 = U_{вых} - U_0 / R_{oc}.$$

При $K_{OY} \rightarrow \infty$ напряжение на входе ОУ $U_0 = U_{вых} / K_{OY} \rightarrow 0$, и тогда имеем соотношение

$$U_{\text{вх}} / R_1 = - U_{\text{вых}} / R_{\text{ос}}.$$

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя с параллельной обратной связью будет определяться как

$$K_{\text{Уи}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = - R_{\text{ос}} / R_1,$$

т. е. только параметрами пассивной части схемы.

2. Неинвертирующий усилитель (рис. 2.34).

Неинвертирующий усилитель содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению и не изменяет знак выходного сигнала относительно входного.

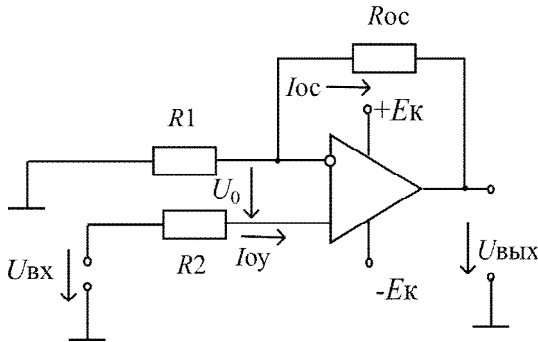


Рис. 2.34. Неинвертирующий усилитель

Входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Полагая, что напряжение $U_0 = 0$ и ток $I_{\text{ОУ}} = 0$ получим

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot (R_1 + R_{\text{ос}}) / R_1.$$

Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя будет определяться как

$$K_{\text{Уи}} = 1 + R_{\text{ос}} / R_1.$$

Неинвертирующий и инвертирующий усилители широко используют в качестве высокостабильных усилителей различного назначения [6].

3. Сумматоры

Для суммирования нескольких напряжений используют схемы, построенные на основе операционных усилителей в инвертирующем и неинвертирующем включении, которые называют сумматорами.

Сумматоры делятся на инвертирующие и неинвертирующие. Неинвертирующий сумматор (рис. 2.35) реализуется на основе схемы неинвертирующего усилителя путем добавления к входу параллельных ветвей, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения. Входные напряжения через резисторы R подаются на неинвертирующий вход усилителя, который в этой схеме является суммирующей точкой.

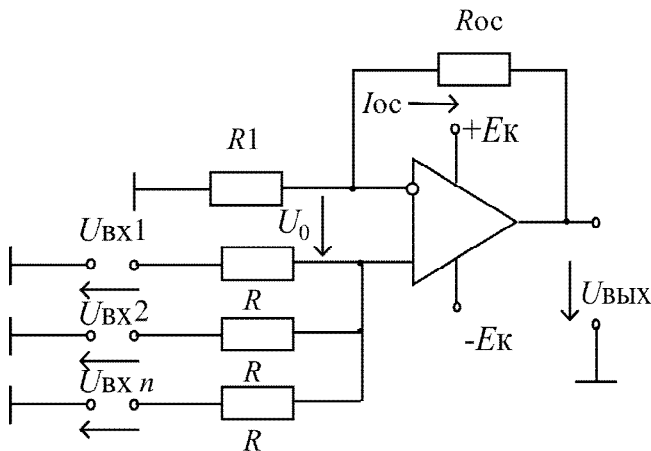


Рис. 2.35. Неинвертирующий сумматор

При напряжении $U_0 = 0$, $U_n = U_n = [R_1 / (R_1 + R_{oc})] U_{\text{ВЫХ}}$.

Тогда $U_1 - U_n / R + U_2 - U_n / R + \dots + U_n - U_n / R = 0$.

Исходя из этого, для неинвертирующего усилителя выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = [(R_1 + R_{oc}) / n \cdot R_1] (U_1 + U_2 + \dots + U_n),$$

где n – количество входов.

Инвертирующий сумматор (рис. 2.36) выполняется по типу инвертирующего усилителя с числом параллельных ветвей на входе, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения.

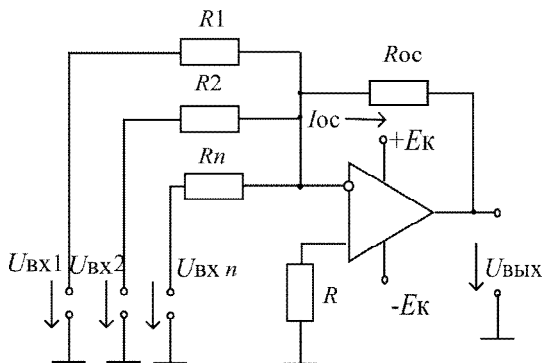


Рис. 2.36. Инвертирующий сумматор

Для инвертирующего сумматора сопротивления резисторов будут равны

$$R_{oc} = R1 = R2 = \dots = R_n.$$

При входном токе $I_{BX OY} = 0$ получаем

$$I_{oc} = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Тогда выходное напряжение будет равно

$$U_{ВЫХ} = - (R_{oc}/R1) U_1 + (R_{oc}/R2) U_2 + \dots + (R_{oc}/R_n) U_n.$$

4. Вычитатель (рис. 2.37).

Для вычитания входных напряжений используется схема вычитателя (разностный усилитель) на ОУ.

Если $R1 = R2$ и $R_{oc} = R$, то $U_{вых} = R_{oc}/R1 (U_{ex2} - U_{ex1})$

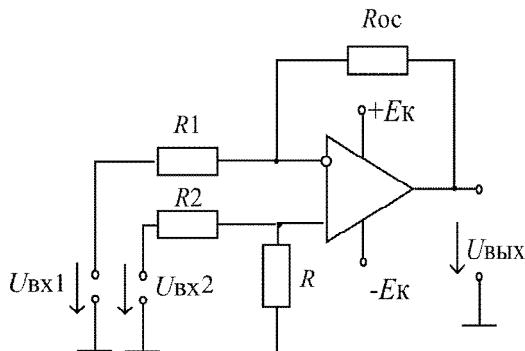


Рис. 2.37. Вычитатель

5. Интегратор (рис. 2.38).

Интегратор создают заменой в схеме инвертирующего усилителя резистора R_{oc} конденсатором $C1$.

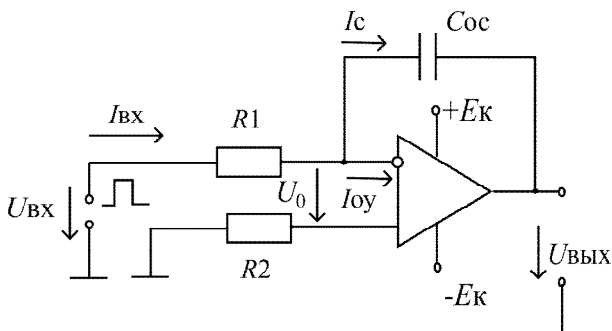


Рис. 2.38. Интегратор

Выходное напряжение интегратора пропорционально интегралу от входного сигнала. Так как ток $I_{вх.} = I_c$ или $U_{вх.} / R1 = -C1 (dU_{вых.} / dt)$, то выходное напряжение равно:

$$U_{вых} = -1 / R1C1 \int U_{вх} dt + U_{вых0},$$

где $U_{вых0}$ – выходное напряжение при $t = 0$.

Если $t = 0$ и $U_{вых0} = 0$, то тогда $U_{вых} = -1/t \int U_{вх} dt$, где $t = R1C1$ – постоянная времени.

Временные зависимости $U_{вх}$ и $U_{вых}$ показаны на рисунке 2.39.

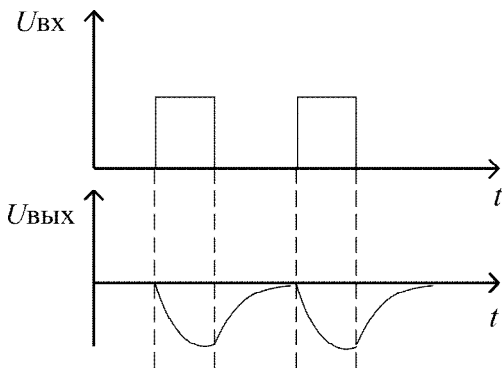


Рис. 2.39. Зависимости $U_{вх}$ и $U_{вых}$ от времени t для интегратора.

6. Дифференциатор (рис. 2.40).

Если в схеме интегратора поменять местами сопротивление $R1$ и конденсатор $C1$, то получим схему дифференциатора.

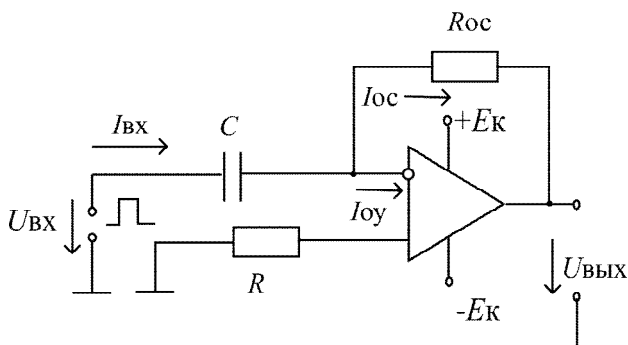


Рис. 2.40. Дифференциатор

Входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ и формула выполняемой операции определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R1C1 (dU_{\text{ВХ}} / dt) = -t (dU_{\text{ВХ}} / dt).$$

Временные зависимости $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ показаны на рисунке 2.41.

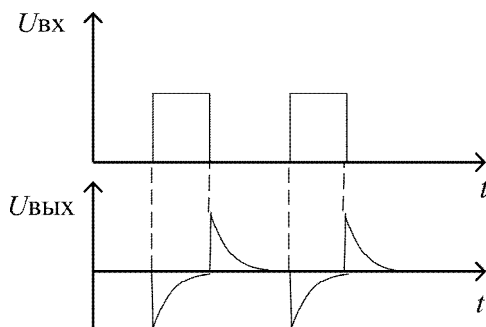


Рис. 2.41. Зависимости $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ от времени t для дифференциатора

7. Компаратор на ОУ (рис. 2.42).

Компараторы играют очень важную роль при аналого-цифровом преобразовании. Компаратором называют устройство, предназначенное для сравнения изменяющегося аналогового входного сигнала с опорным напряжением.

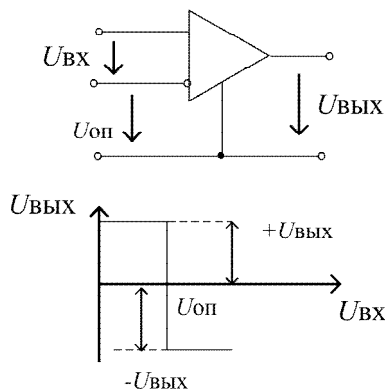


Рис. 2.42. Компаратор на ОУ

Функцию сравнения двух напряжений выполняет операционный усилитель (см. рис. 2.42), если на один из его входов подать опорное напряжение, а на другой – входной сигнал. Компараторы выпускаются в интегральном исполнении, а также являются составной частью микросхем аналогово-цифровых преобразователей (АЦП).

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные свойства УПТ.
2. Перечислите основные свойства ОУ.
3. Назовите примеры применения ОУ на ИМС в вычислительных устройствах.
4. Какие меры применяют в УПТ для устранения дрейфа нуля? Принцип работы балансной (дифференциальной) схемы УПТ.
5. Чем отличается неинвертирующий и инвертирующий усилители, построенные на ОУ?
6. Как построить неинвертирующий и инвертирующий сумматор на ОУ? Приведите основные соотношения для таких схем.
7. Как построить дифференциатор и интегратор на ОУ?
8. Как строится вычитатель на ОУ?

2.6. Избирательные усилители

Виды и особенности избирательных усилителей (ИУ)

Избирательные усилители (ИУ) предназначены для усиления сигналов в некоторой узкой полосе частот [6]. Амплитудно-частотные

характеристики (рис. 2.43) должны обеспечивать требуемое усиление в заданной полосе частот и достаточно крутой спад усиления вне этой полосы.

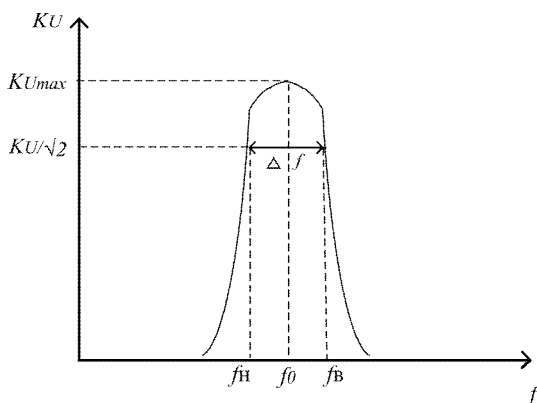


Рис. 2.43. АЧХ ИУ

Полоса пропускания ИУ ($\Delta f = f_v - f_n$) определяется на уровне $K_{um}/\sqrt{2}$, где K_{um} — коэффициент усиления при резонансной частоте f_0 . Селективность (избирательность) усилительных свойств оценивают добротностью $Q = f_0 / \Delta f$.

Избирательные усилители широко распространены в радиоприемных и телевизионных устройствах, а также многоканальных системах связи. Они предназначены для настройки приемного устройства на фиксируемую частоту принимаемой станции, не пропуская сигнала других устройств. Резкая зависимость K_u ИУ от частоты f достигается, как правило, включением специальных фильтров в цепь усиления или в цепь обратной связи. В связи с этим ИУ подразделяются на высокочастотные и низкочастотные.

Высокочастотные избирательные усилители создают введением LC-фильтра в цепь нагрузки усилительного каскада (рис. 2.44).

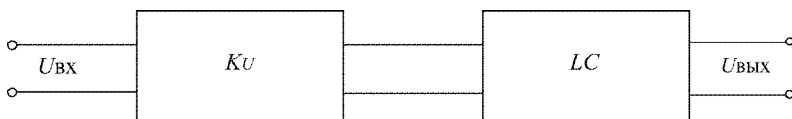


Рис. 2.44. Структурная схема высокочастотного ИУ

Низкочастотные узкополосные усилители создают включением в цепь обратной связи RC -фильтров (рис. 2.45).

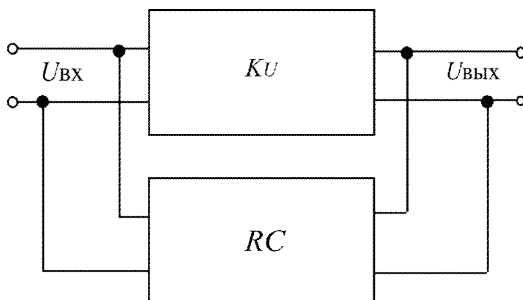


Рис. 2.45. Структурная схема низкочастотного ИУ

Высокочастотные ИУ

Схема резонансного усилителя представлена на рисунке 2.46. Она похожа на схему однокаскадного усилителя с ОЭ, но в цепь коллектора вместо R_k включен колебательный LC -контур.

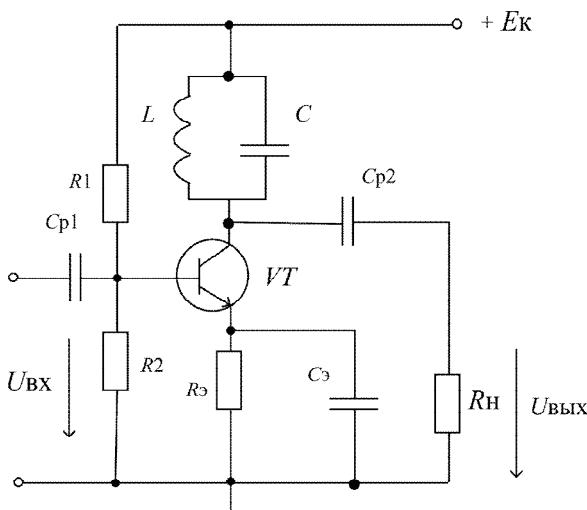


Рис. 2.46. Принципиальная электрическая схема высокочастотного ИУ

Назначение элементов:

1) $R1$, $R2$, VT , $Rэ$, $Cэ$ – элементы однокаскадного усилителя с общим эмиттером: $R1/R2$ – делитель напряжения, который обеспечива-

ет требуемую работу транзистора в режиме покоя, т. е. в отсутствие входного сигнала; R_e и C_e – элементы эмиттерной температурной стабилизации; VT – транзистор (усилительный элемент);

2) колебательный LC -контур в коллекторной цепи транзистора выполняет роль LC -фильтра, т. е. выделяет резонансную частоту и соответствующую полосу пропускания на высоких частотах;

3) C_{p1}, C_{p2} – разделительные конденсаторы, через которые осуществляется связь с предыдущим или последующим каскадом.

На резонансной частоте $f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ сопротивление колебательного контура велико, в связи с чем коэффициент усиления максимален. При отклонении частоты влево или вправо от резонансной сопротивление контура уменьшается ввиду увеличения шунтирующего действия его индуктивности или емкости. Это вызывает уменьшение коэффициента усиления каскада. ИУ характеризуется добротностью Q .

На рисунке 2.47 показаны АЧХ избирательных усилителей с различными добротностями Q . Так как $Q = f_0 / \Delta f$, то $Q1 > Q2 > Q3$.

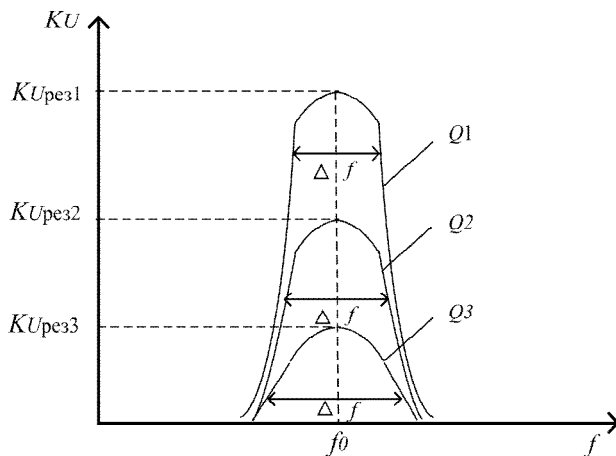


Рис. 2.47. АЧХ избирательных усилителей с различными добротностями Q

При увеличении добротности Q возрастает K_U усилителя на резонансной частоте и уменьшается полоса его пропускания, т. е. ИУ будет обладать лучшими избирательными свойствами.

Низкочастотные ИУ

В качестве RC -фильтров в избирательных усилителях могут использоваться различные RC -цепи, у которых коэффициент передачи $\beta \gg 0$ в диапазоне полосы пропускания от f_H до f_B .

Широкое применение в этих усилителях нашел двойной Т-образный мост (рис. 2.48).

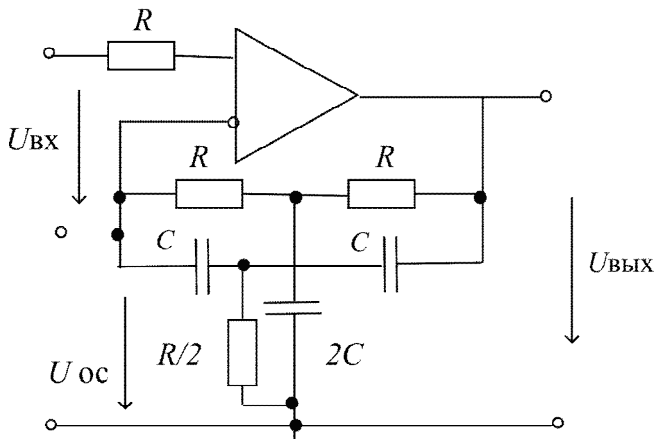


Рис. 2.48. Принципиальная электрическая схема низкочастотного ИУ на ОУ с двойным Т-образным мостом

Значение коэффициента передачи $b = U_{oc} / U_{вых}$ резко зависит от частоты. При $f \ll 0$; $\beta \ll 1$, т. к. на очень низких частотах сопротивления конденсаторов становятся малыми, и все напряжение передается на вход усилителя через «нижний» одинарный Т-образный мост ($C, R/2, C$).

На квазирезонансной частоте $f_0 = 1/(RC)$; $\beta = 0$, т. к. на этой частоте каждый из одинарных Т-образных мостов имеет равные по модулю и противоположные по фазе коэффициенты передачи β и их выходные токи взаимно компенсируются, так что $U_{oc} = 0$.

Коэффициент усиления избирательного контура с двойным Т-образным мостом в цепи обратной связи определяется через параметры усилителя и цепи обратной связи: $K_{oc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{K}{1 + \beta K}$.

Таким образом, при частотах $f=0$ и $f=\infty$, когда $\beta \gg 1: K_{oc} = \left| \frac{K}{1+K} \right| \gg 1$, а на квазирезонансной частоте $\beta = 0$, $K_{oc} = K \gg 1$.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем отличается АЧХ избирательного усилителя от АЧХ усилителя низкой частоты?
2. Чем отличаются низкочастотные ИУ от высокочастотных ИУ?
3. Как определить добротность ИУ?
4. Объясните, почему в ИУ максимальное усиление получается на резонансной частоте?
5. Принцип работы высокочастотного ИУ.
6. Принцип работы низкочастотного ИУ.

2.7. Генераторы гармонических колебаний

Генератором гармонических колебаний называют устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний синусоидальной формы требуемой частоты и мощности [3, 7].

Классификация генераторов:

- 1) в зависимости от генерируемой частоты:
 - а) низкочастотные (0,01...100 кГц);
 - б) высокочастотные (0,1...300 МГц);
 - в) сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц).
- 2) по способу возбуждения колебаний:
 - а) с независимым возбуждением;
 - б) автогенераторы или генераторы с самовозбуждением.

В структурную схему автогенератора (рис. 2.49) входят два блока: усилитель с коэффициентом усиления K_U и звено положительной обратной связи с коэффициентом передачи β .

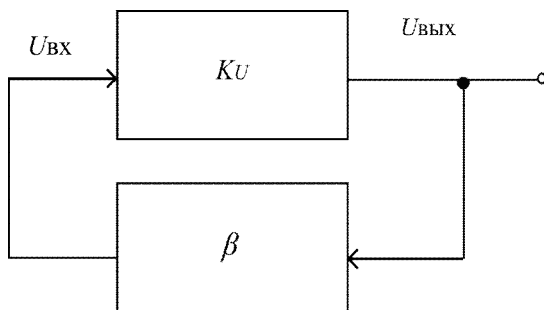


Рис. 2.49. Структурная схема автогенератора

Коэффициент усиления K_U усилителя и коэффициент передачи звена обратной связи β принимаются комплексными, т. е. учитываются их зависимость от частоты. В качестве усилителя в автогенераторах могут применяться различные усилители: на транзисторах, на интегральных микросхемах и т. д.

Звеном обратной связи являются частотно-зависимые цепи (LC -контуры и RC -четырёхполюсники). Входным сигналом для усиления является часть выходного напряжения усилителя, передаваемая звеном положительной обратной связи на вход усилителя.

Стационарный устойчивый режим в автогенераторе, при котором амплитуды входных и выходных напряжений имеют неизменные значения, будет возможен при выполнении условия, называемого *условием самовозбуждения*: $K_U \beta = 1$, которое следует из соотношений

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_U U_{\text{ВХ}}$$

$$U_{\text{ВХ}} = \beta U_{\text{ВЫХ}}$$

Тогда $U_{\text{ВЫХ}} = \beta K_U U_{\text{ВЫХ}}$.

Условие самовозбуждения можно представить в виде:

$$|K_U| e^{i\varphi} |\beta| e^{i\psi} = 1,$$

где $|K_U|$, $|\beta|$ – модули коэффициентов усиления и передачи соответственно;

φ , ψ – аргументы этих коэффициентов.

Это равенство выполняется при следующих условиях:

1. $|K_U| |\beta| = 1$ – условие баланса амплитуд;
 2. $\varphi + \psi = 2\pi n$ – условие баланса фаз,
- где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$;
- φ – фазовый сдвиг выходного напряжения усилителя;
- ψ – фазовый сдвиг выходного напряжения звена обратной связи.

Условие баланса амплитуд соответствует тому, что потери энергии в автогенераторе восполняются звеном положительной обратной связи от источника питания автогенератора. Для получения стационарных устойчивых колебаний условие баланса амплитуд должно удовлетворять соотношению: $|K_U| \cdot |\beta| \geq 1$. Физический смысл неравенства $|K_U| \cdot |\beta| \geq 1$ заключается в том, что сигнал, усиленный усилителем в $|K_U|$ раз и ослабленный звеном обратной связи в $|\beta|$ раз, возникает вновь на входе усилителя в той же фазе, но с большей амплитудой.

Условие баланса фаз означает, что сумма фазовых сдвигов выходных напряжений усилителя и звена обратной связи в автогенераторе равна нулю или целому числу 2π , что свидетельствует о наличии в данном устройстве положительной обратной связи.

Для получения синусоидального (гармонического) напряжения необходимо, чтобы условия самовозбуждения генератора выполнялись только для некоторой частоты. С этой целью цепь положительной обратной связи (ПОС) должна обладать избирательными свойствами. Такие свойства имеют колебательный LC -контур и RC -цепи.

2.7.1. LC -автогенератор

В данном автогенераторе усилитель собран на полевом транзисторе и включен по схеме с общим истоком (рис. 2.50). Звеном обратной связи является катушка L_c , включенная в стоковую цепь транзистора и индуктивно связанная с катушкой L_k резонансного контура $L_k C_k$. Первоначально колебания в автогенераторе возникают из-за флуктуации тока в колебательном контуре или при подаче напряжения питания. По этим причинам при условии, что эквивалентное активное сопротивление контура $R_{э\kappa\text{в}} < \sqrt{L_k / C_k}$, появляются слабые колебания с частотой $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_k C_k}$, которые при отсутствии положительной обратной связи прекратились бы из-за потерь энергии в контуре.

Но при наличии положительной обратной связи этого не происходит, т. к. появившееся напряжение на контуре усиливается транзистором. Эти колебания через катушку L_c индуктивно связанную с катушкой L_k , вновь возвращаются в колебательный контур. Размах колебаний постепенно возрастает, что соответствует условию $|K_U| |\beta| > 1$.

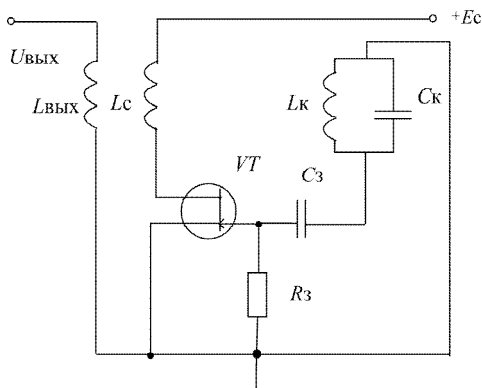


Рис. 2.50. Схема LC-автогенератора

По мере роста амплитуды напряжение в цепи затвора транзистора из-за нелинейности его амплитудной характеристики (участок ab на рисунке 2.51, б) начинает уменьшаться и соблюдается условие $|K_U| |\beta| = 1$.

При этом появляются колебания с постоянной и автоматически поддерживаемой на требуемом уровне амплитудой, что соответствует стационарному режиму работы автогенератора.

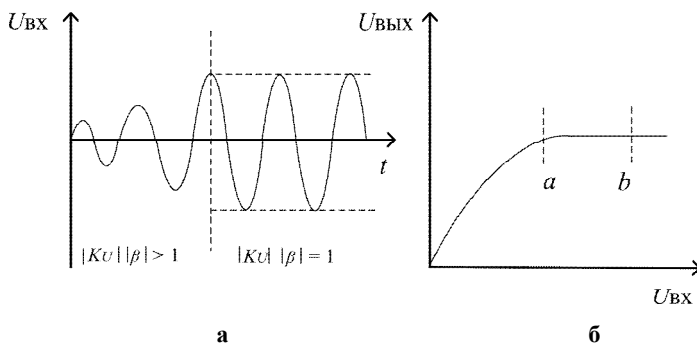


Рис. 2.51. Временная диаграмма автогенератора (а) и амплитудная характеристика транзистора (б)

С помощью звена R_3C_3 осуществляется создание отрицательного смещения U_{30} относительно истока.

Рассмотренная схема, в которой LC -контур включен последовательно с транзистором, имеет существенное преимущество, заключающееся в том, что элементы LC -контура находятся под низким напряжением. Но такой генератор обладает низким КПД.

Высоким КПД и большей мощностью генерируемых колебаний обладает автогенератор, где LC -контур включен параллельно с транзистором по отношению к источнику питания (рис. 2.52). Такой генератор называется *генератором с параллельным питанием*.

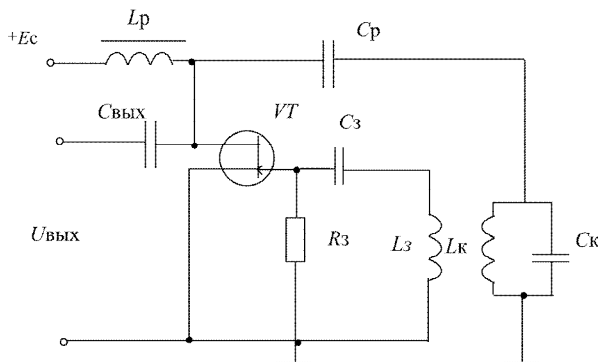


Рис. 2.52. Схема LC -автогенератора с параллельным подключением LC -контура (генератор с параллельным питанием)

Скачки напряжения и тока, появляющиеся в контуре $L_кC_к$ при подключении к генератору источника питания E_c , через обмотку L_3 передаются в цепь затвора полевого транзистора VT . Тогда за счет взаимной индукции M между усилителем и колебательным контуром действует положительная обратная связь (ПОС). Конденсатор C_p предотвращает протекание через контур постоянной составляющей коллекторного тока, а дроссель L_p уменьшает шунтирование контура по переменному току внутренним сопротивлением источника питания E_c .

Баланс амплитуд в таком автогенераторе с трансформаторной связью достигается выбором необходимого коэффициента взаимной индукции M (т. е. числа витков катушки L_3), а баланс фаз – правильным подключением концов катушки L_3 (при отсутствии генерации следует поменять концы катушки, подключаемые к затвору транзистора и общей шине).

Для построения LC -генераторов гармонических колебаний удобно использовать интегральные усилители, например, операционные (рис. 2.53).

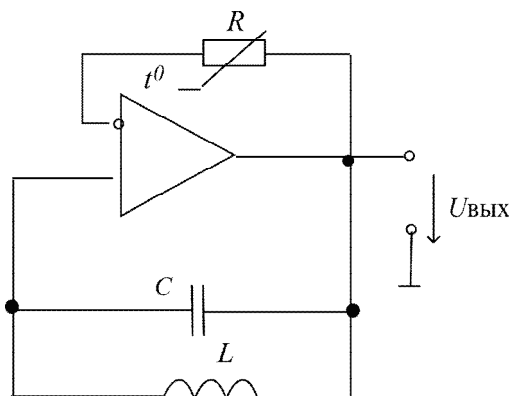


Рис. 2.53. Схема LC -автогенератора на ОУ

Колебательный LC -контур включается между выходом ОУ и неинвертирующим входом, обеспечивая нужную ПОС. В цепь отрицательной обратной связи (ООС) для стабилизации амплитуды генерируемых колебаний включают терморезистор R с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКР). Увеличение амплитуды колебаний вызывает уменьшение сопротивления терморезистора. При этом увеличивается глубина ООС, приводящая к уменьшению амплитуды колебаний.

В LC -генераторах, ввиду зависимости L и C колебательного контура и параметров транзистора от температуры наблюдается зависимость от температуры t° и частоты f . В условиях постоянства t° нестабильность частоты вызвана изменениями дифференциальных параметров транзистора в зависимости от изменения положения рабочей точки покоя усилительного каскада, что обуславливает необходимость его стабилизации.

Нестабильность частоты генераторов оценивают коэффициентом относительной нестабильности, который определяется по формуле

$$\delta_f = \Delta f / f \cdot 100 \%,$$

где Δf – абсолютное отклонение частоты от номинального значения f .

Мерами, повышающими стабильность частоты генератора, являются:

1) увеличение температурной стабилизации выбранного режима покоя усилительных каскадов;

2) применение специальных средств, компенсирующих температурные изменения частоты (например, введение в колебательный контур конденсаторов с зависимой от температуры емкостью).

При использовании в генераторах кварцевого резонатора (КР – колебательная система+пьезоэлемент) $\delta_f = 10^{-3} \dots 10^{-5} \%$.

2.7.2. RC-автогенераторы

Для получения гармонических колебаний низкой частоты (от нескольких сотен КГц до долей Гц) применяют автогенераторы, у которых в качестве звеньев обратной связи используются RC-четырёхполосники. Такие автогенераторы называются RC-автогенераторами. Применение RC-четырёхполосников вызвано тем, что LC-контурные на таких частотах становятся громоздкими, а добротность их не удовлетворяет необходимым требованиям. RC-автогенераторы на низких частотах обладают более высокой стабильностью, имеют меньшие габариты, массу и стоимость, чем LC- автогенераторы.

RC-автогенератор содержит усилитель и звено обратной связи в виде частотно-зависимой RC-цепи. Такие цепи представлены на рисунке 2.54:

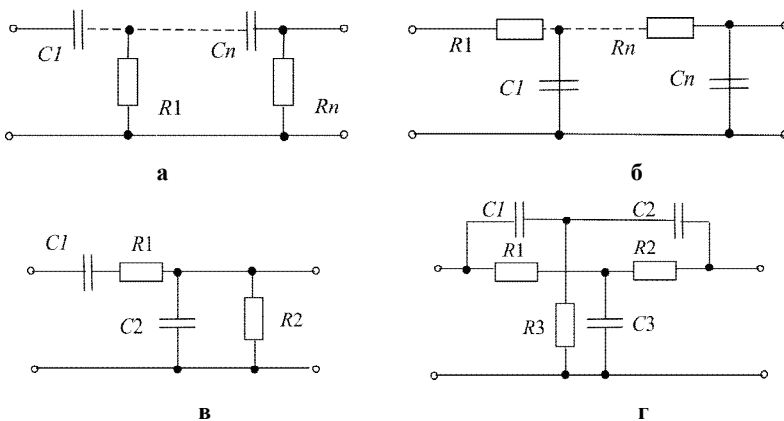


Рис. 2.54. Виды звеньев обратной связи: а) и б) Г-образные RC-цепи; в) мост Вина; г) двойной Т-образный мост

Например, RC -автогенератор с T -образным RC -звеном обратной связи представляет собой однокаскадный усилитель, охваченный положительной обратной связью (рис. 2.55).

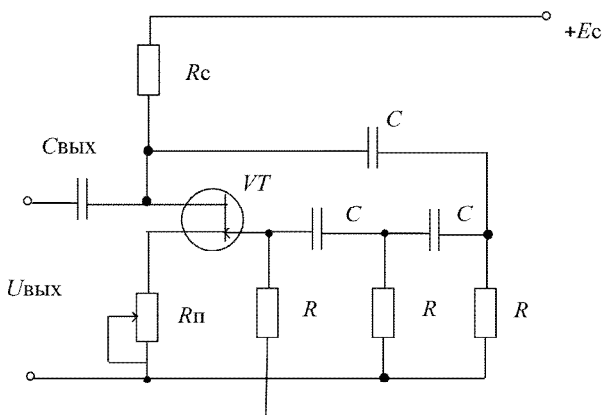


Рис. 2.55. RC -автогенератор с T -образным звеном обратной связи

Следует отметить, что в однокаскадном усилителе с ОЭ без обратной связи $U_{вх}$ и $U_{вых}$ сдвинуты по фазе на 180° . Т. е. если $U_{вых}$ усилителя подать на его вход, то получится 100%-ная отрицательная обратная связь (ООС). Для соблюдения баланса фаз напряжение $U_{вых}$ прежде чем подать его на вход, необходимо сдвинуть на 180° . Т. к. сопротивление $R_{вх}$ усилителя велико, а $R_{вых}$ – мало, то фазовый сдвиг на 180° можно осуществить с помощью трех одинаковых RC -звеньев, каждое из которых изменяет фазу на 60° .

Повысить частоту генерации в автогенераторе можно увеличением количества звеньев или при смене мест резисторов и конденсаторов в RC -цепи.

Недостатки RC -автогенератора:

1) цепь обратной связи сильно шунтирует конденсатор усиления, вследствие чего снижается K_U и нарушается условие баланса амплитуд;

2) генерируемые колебания имеют значительное искажение формы, вызванное тем, что условия самовозбуждения выполняются для гармоник с частотой, близкой к f_0 .

RC -генератор с мостом Вина легко выполнить на интегральном ОУ, включив избирательный мост Вина между выходом и

неинвертирующим входом (рис. 2.56). С помощью переменного резистора $R4$ можно изменять коэффициент усиления усилителя, добиваясь наименьших нелинейных искажений генерируемых колебаний.

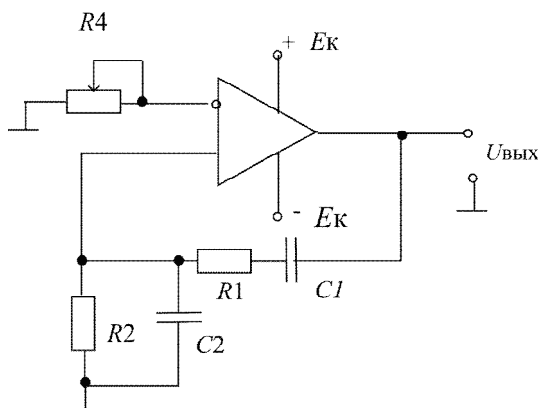


Рис. 2.56. Схема RC -автогенератора с мостом Вина на операционном усилителе

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию генераторов гармонических колебаний.
2. Назовите условия самовозбуждения автогенератора.
3. Какими причинами может быть вызвана нестабильность частоты автогенератора? Как можно повысить стабильность частоты автогенератора?
4. Принцип работы LC -автогенератора.
5. Принцип работы RC -автогенератора с Т-образным звеном обратной связи.
6. Перечислите виды звеньев цепи обратной связи в RC -автогенераторах.

Раздел 3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

3.1. Выпрямители переменного тока

3.1.1. Структура, классификация и основные параметры выпрямителей

Для получения электрической энергии нужного вида часто приходится преобразовывать энергию переменного тока в энергию постоянного тока (процесс выпрямления), либо энергию постоянного тока в энергию переменного тока (процесс инвертирования). Устройства, с помощью которых осуществляются такие преобразования, называются соответственно выпрямителями и инверторами. Выпрямители и инверторы являются источниками вторичного электропитания (ИВЭ).

Классификация выпрямителей

Выпрямители классифицируются по нескольким признакам:

- 1) по возможности управления:
 - а) неуправляемые;
 - б) управляемые;
- 2) по числу фаз первичного источника питания:
 - а) однофазные (выпрямители малой и средней мощности);
 - б) многофазные, обычно 3-фазные (выпрямители большой мощности);
- 3) по форме выпрямленного напряжения:
 - а) однополупериодные;
 - б) двухполупериодные.

Параметры выпрямителей

- 1) средние значения выпрямленного тока и напряжения $I_{н ср}$ и $U_{н ср}$;
- 2) мощность нагрузочного устройства $P_{н ср} = U_{н ср} \cdot I_{н ср}$;
- 3) амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения $U_{осн.г.}$;
- 4) коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $p = U_{осн.г.} / U_{н ср}$;
- 5) КПД выпрямителя:

$$\eta = P_{н ср} / (P_{н ср} + P_{тр} + P_{д}),$$

где $P_{тр}$ – потери в трансформаторе;

$P_{д}$ – потери в диодах.

Рассмотрим структурную схему однофазного выпрямителя (рис. 3.1), в которую входят: Т – трансформатор, В – вентиль (вентильная группа), СФ – сглаживающий фильтр, СТ – стабилизатор, R_n – сопротивление нагрузки.

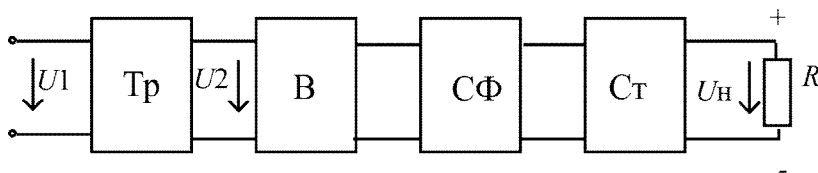


Рис. 3.1. Структурная схема однофазного выпрямителя.

Для выпрямления однофазного переменного напряжения применяют 3 основных типа выпрямителей:

- 1) однополупериодный;
- 2) двухполупериодный мостовой;
- 3) двухполупериодный с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.

3.1.2. Однофазные схемы выпрямления

Однополупериодный выпрямитель

Однополупериодный выпрямитель состоит из трансформатора (Т), к вторичной обмотке которого последовательно подсоединены диод VD и нагрузочный резистор R_n (рис. 3.2). Для упрощения анализа работы выпрямителей транзистор и диод считают идеальными.

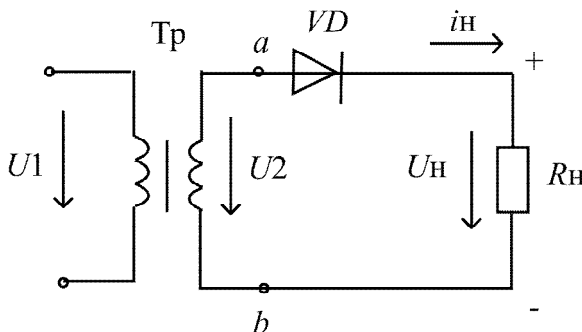


Рис. 3.2. Схема однополупериодного выпрямителя

Временные диаграммы выпрямителя показаны на рисунке 3.3. В первый полупериод от 0 до $1/2T$ диод открыт, т. к. потенциал точки «а», выше потенциала точки «b», и через нагрузку протекает ток i_n . В интервале времени $1/2T - T$ диод закрыт, т. к. потенциал точки «b» выше потенциала точки «а», т. е. к диоду прикладывается обратное напряжение U_2 . Ток в нагрузке отсутствует, и коэффициент пульсаций будет равен $p = 1,57$.

Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{нсп}$ равно $U_{нсп} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \gg 0,45U_2$, а среднее значение выпрямленного тока $I_{нсп} = 0,45 \frac{U_2}{R_n}$.

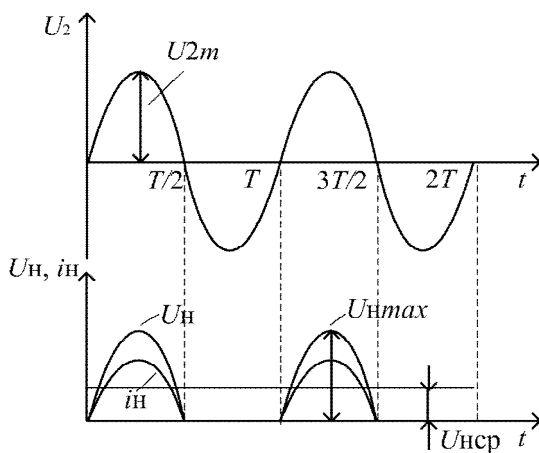


Рис. 3.3. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота, а недостатком – то, что выпрямленное напряжение сильно зависит от сопротивления нагрузки и имеет большой коэффициент пульсаций.

Двухполупериодный мостовой выпрямитель

Он состоит из трансформатора (Т) и четырех диодов (VD1-VD4), подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме (рис. 3.4). Каждая пара диодов VD1, VD3 и VD2, VD4 работает поочередно.

Временные диаграммы работы этого выпрямителя показаны на рисунке 3.5.

В первый полупериод ($0-1/2T$) открыты $VD1$ и $VD3$, когда потенциал точки «a» выше потенциала точки «b». При этом в нагрузочном резисторе R_n появляется ток I_n . В этом интервале диоды $VD2$ и $VD4$ закрыты.

В следующий полупериод ($1/2T - T$) потенциал точки «b» выше потенциала точки «a», тогда диоды $VD2$, $VD4$ открыты, а $VD1$ и $VD3$ закрыты.

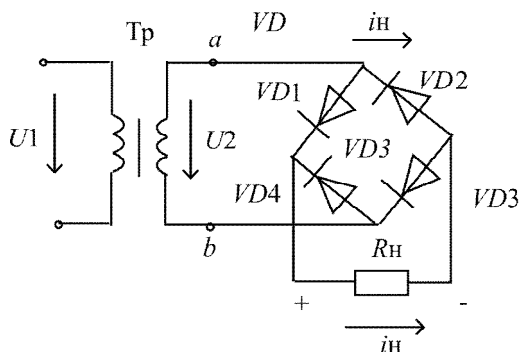


Рис. 3.4. Схема двухполупериодного мостового выпрямителя

В оба полупериода ток через R_n имеет одно и то же направление. Коэффициент пульсаций $p = 0,67$.

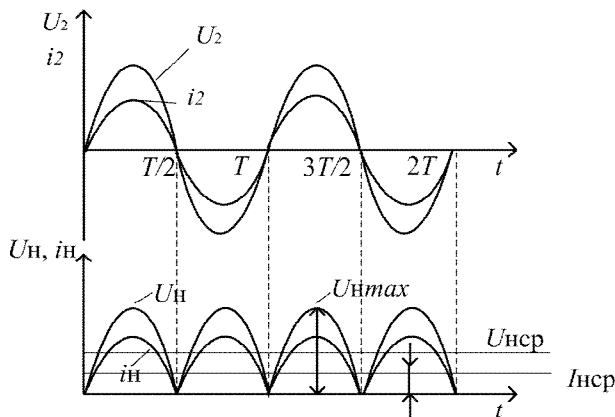


Рис. 3.5. Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя

Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей, включенных на один и тот же нагрузочный резистор (рис. 3.6). В каждый из полупериодов напряжение на вторичной обмотке трансформатора работает либо верхняя, либо нижняя часть выпрямителя, т. е. открыт либо диод $VD1$, либо диод $VD2$.

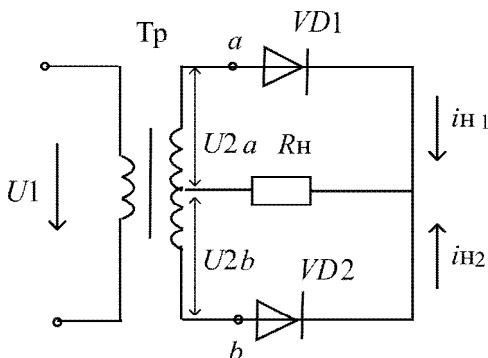


Рис. 3.6. Схема двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

Временные диаграммы данного выпрямителя показаны на рисунке 3.7.

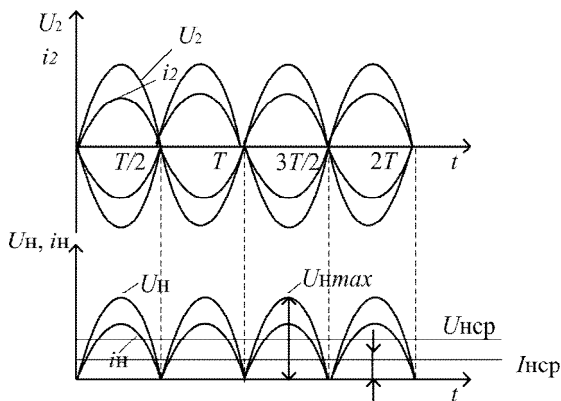


Рис. 3.7. Временные диаграммы двухполупериодного выпрямителя

Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{\text{нсп}}$ равно

$$U_{\text{нсп}} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \gg 0,9U_2, \text{ а среднее значение выпрямленного тока}$$

$$I_{\text{нсп}} = 0,9 \frac{U_2}{R_n}.$$

Коэффициент пульсаций схемы такой же, как в мостовой схеме: $p = 0,67$. Недостатками двухполупериодной схемы с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора является высокое обратное напряжение, прикладываемое к диодам, и усложненная конструкция трансформатора.

Двухполупериодные выпрямители применяют для питания нагрузочных устройств малой и средней мощностей.

К выпрямителям большой и средней мощности относятся трехфазные выпрямители с нейтральным выводом и мостовые [1, 12].

3.1.3. Трехфазные схемы выпрямления

Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом

В состав трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом входят: трехфазный трансформатор, обмотки которого соединены звездой; 3 диода, включенные в каждую из фаз трансформатора; сопротивление R_n (рис. 3.8, а).

Диоды работают поочередно, каждый в течение трети периода, когда потенциал начала одной из фазных обмоток (например, a) более положителен, чем двух других (b и c). Временные диаграммы показаны на рисунке 3.8, б. Выпрямленный ток в резисторе R_n создается токами каждого диода, имеет одинаковое направление и равен сумме выпрямленных токов каждой из фаз: $i_n = i_a + i_b + i_c$. Коэффициент пульсаций $p = 0,25$.

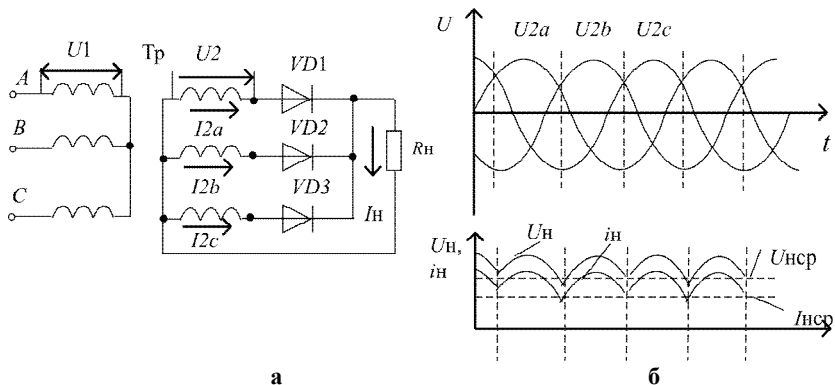


Рис. 3.8. Схема (а) и временные диаграммы (б) трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом

Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{нсп}$ равно

$$U_{нсп} = \frac{3\sqrt{2}U_2}{\pi} \gg 1,17U_2, \text{ а среднее значение выпрямленного тока}$$

$$I_{нсп} = \frac{3\sqrt{2}U_2}{\pi R_n} \gg 0,827I_2. \text{ Коэффициент пульсаций } p = 0,25.$$

Достоинством схемы является высокая надежность, а недостатком – подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током, что снижает коэффициент полезного действия выпрямителя.

Трехфазный мостовой выпрямитель

Трехфазный мостовой выпрямитель содержит мост из 6 диодов. Диоды $VD1, VD3, VD5$ – образуют одну группу, а $VD2, VD4, VD6$ – другую. Общая точка первой группы диодов образует положительный полюс на нагрузочном резисторе R_n , а общая точка второй группы – отрицательный полюс (рис. 3.9).

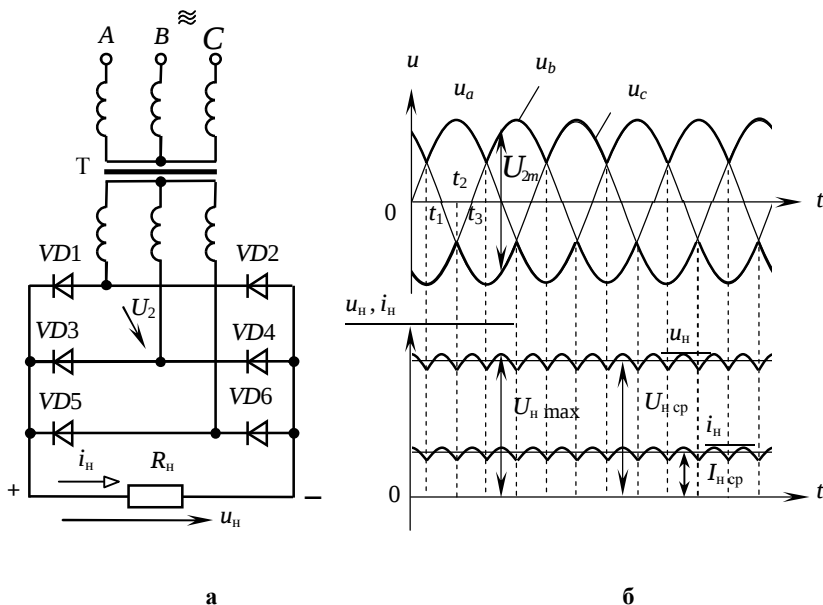


Рис. 3.9. Схема (а) и временные диаграммы (б) трехфазного мостового выпрямителя

В каждый момент времени ток в резисторе R_n и двух диодах появляется тогда, когда к этим диодам приложено наибольшее напряжение. Например, в интервале времени t_1-t_2 ток возникает в цепи $VD1-R_n-VD4$, т. к. в данный интервал времени к этим диодам приложено напряжение U_{ab} , которое больше других линейных напряжений. Временные диаграммы показаны на рисунке 4.9. Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{нср}$ равно $U_{нср} = \frac{3\sqrt{6}U_2}{\pi} \gg 2,34U_2$.

В такой схеме коэффициент пульсаций $p = 0,057$.

3.1.4. Сглаживающие фильтры

Сглаживающим фильтром называют устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.

Основным параметром, характеризующим эффективность сглаживающего фильтра (СФ), является коэффициент сглаживания $q = p_{вх}/p_{вых}$, где $p_{вх}$ – коэффициент пульсаций на входе фильтра (т. е.

для схемы выпрямителя без фильтра), а $p_{\text{вых}}$ – коэффициент пульсаций на выходе фильтра (т. е. для схемы выпрямителя с фильтром).

Сглаживающие фильтры различаются по следующим признакам:

1) в зависимости от типа фильтрующего элемента:

- а) емкостные;
- б) индуктивные;
- в) электронные фильтры.

2) по количеству фильтрующих звеньев:

- а) однозвенные;
- б) многозвенные.

Емкостные фильтры

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, который включают параллельно нагрузочному резистору $R_{\text{н}}$. Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром показана на рисунке 3.10.

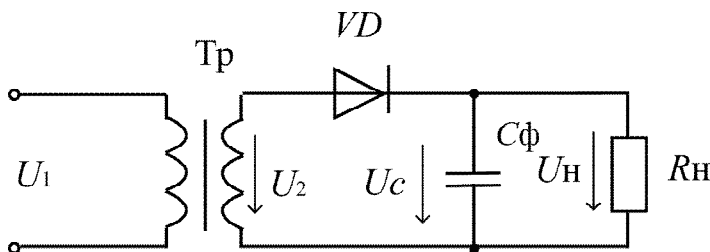


Рис. 3.10. Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

На временных диаграммах (рис. 3.11) видно, что в интервале t_1 – t_2 , конденсатор через открытый диод заряжается до амплитудного значения U_2 , так как в этот период $U_2 > U_c$. Когда $U_2 < U_c$, конденсатор разряжается на нагрузочный резистор $R_{\text{н}}$, заполняя разрядным током паузу в нагрузочном токе $i_{\text{н}}$, которая имеется в однополупериодном выпрямителе без фильтра.

После этого диод вновь открывается, СФ заряжается и процессы зарядки и разрядки СФ повторяются. Подобные СФ применяются с высокоомным сопротивлением $R_{\text{н}}$.

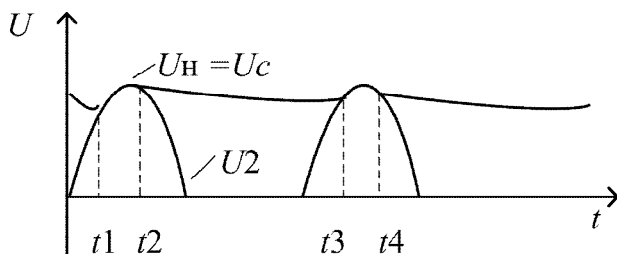


Рис. 3.11. Временные диаграммы выпрямителя с емкостным фильтром

Индуктивные фильтры

Они состоят из дросселя L_ϕ , который включают последовательно с нагрузкой R_H (рис. 3.12). Так как ток в цепи с дросселем во время переходного процесса при положительной полуволне U_2 , зависит от постоянной времени $\tau = L_\phi / R_H$, то длительность импульса увеличивается с ростом τ , что видно на временных диаграммах (рис. 3.13).

Емкостные и индуктивные фильтры являются однозвенными фильтрами.

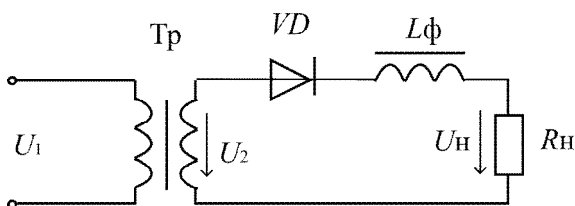


Рис. 3.12. Схема включения индуктивного фильтра

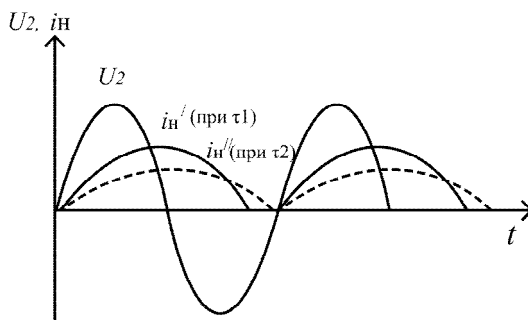


Рис. 3.13. Временные диаграммы выпрямителя с индуктивным фильтром

К многозвенным фильтрам относятся LC или RC -фильтры, которые обеспечивают большее уменьшение r и включены Г-образно или П-образно (рис. 3.14 и 3.15).

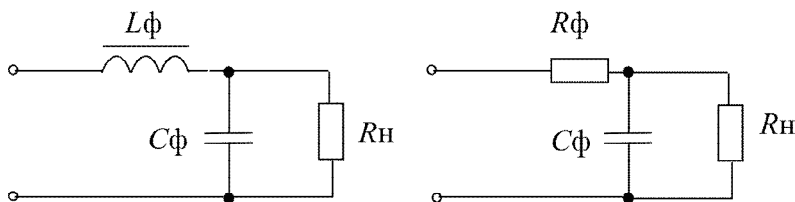


Рис. 3.14. Г-образные LC - и RC -фильтры

Коэффициент сглаживания LC - фильтра: $q = \omega_{\text{осн}}^2 L_{\phi} C_{\phi} - 1$.

В маломощных усилителях, где сопротивление $R_{\text{н}}$ составляет единицы кОм, вместо катушки включают резистор R_{ϕ} , что уменьшает массу, габариты и стоимость фильтра, однако при этом коэффициент сглаживания, определяемый как $q = (0,5, 0,9)\omega_{\text{осн}} R_{\phi} C_{\phi}$, будет меньше, чем у LC -фильтра.

В П-образных фильтрах коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов составных звеньев ($q_n = q_c q_c$).

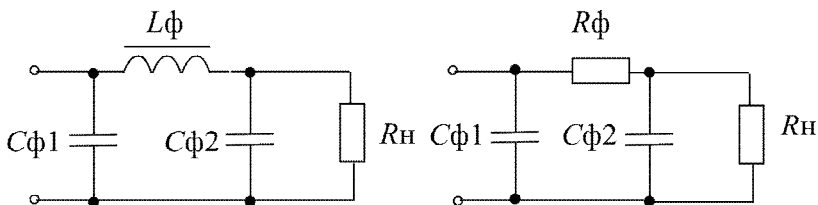


Рис. 3.15. П-образные LC -фильтр и RC -фильтр

Электронные фильтры

Электронные фильтры (ЭФ) – это фильтры, в которых вместо индуктивных катушек включают транзисторы, что позволяет избавиться от переходных процессов и уменьшить габариты и массу выпрямителей.

Применение транзисторов в фильтрах основано на различии сопротивлений для постоянной и переменной составляющих коллекторного тока.

Из выходной характеристики транзистора (рис. 3.16) видно, что сопротивление $R_{\text{кз}}$ постоянному току (статическое сопротивление)

$R_{ст} = U_{к0}/I_{к0}$ на 2–3 порядка меньше сопротивления переменному току (динамическое сопротивление) $R_{дин} = \Delta U_{к}/\Delta I_{к}$. Электронные фильтры снижают пульсации в 3–5 раз.

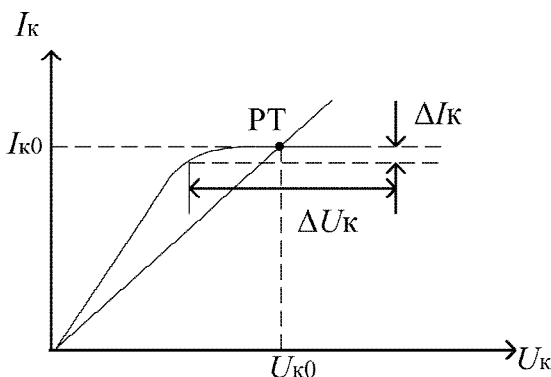


Рис. 3.16. Выходная характеристика транзистора

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию выпрямителей.
2. Назовите основные параметры усилителей.
3. Объясните принцип работы однополупериодного выпрямителя.
4. Объясните принцип работы двухполупериодного мостового выпрямителя.
5. Объясните принцип работы двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.
6. Назовите основные элементы схемы трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом.
7. Принцип работы трехфазного мостового выпрямителя.
8. Классификация сглаживающих фильтров.

3.2. Стабилизаторы напряжения и тока

Стабилизатор напряжения (или тока) – это устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (или тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности.

Классификация стабилизаторов

Стабилизаторы классифицируют по следующим признакам:

- 1) по стабилизируемой величине:

а) стабилизаторы напряжения;

б) стабилизаторы тока;

2) по способу стабилизации:

а) параметрические (ПС);

б) компенсационные (КС).

Основные параметры стабилизаторов

1. Коэффициент стабилизации по напряжению для стабилизаторов напряжения:

$$K_{\text{ст.}U} = \frac{DU_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{DU_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}},$$

где $\Delta U_{\text{вх}}$, $\Delta U_{\text{вых}}$ – приращения напряжений, $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$ – номинальные значения.

2. Коэффициент стабилизации тока для стабилизаторов тока:

$$K_{\text{ст.}I} = \frac{DU_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{DI_{\text{н}} / I_{\text{н}}},$$

где $I_{\text{н}}$ – номинальный ток, а $DI_{\text{н}}$ – приращение тока.

3. Внутреннее сопротивление стабилизатора $R_{\text{ст}}$.

4. Коэффициент полезного действия:

$$\eta_{\text{ст}} = P_{\text{н}} / (P_{\text{н}} + P_{\text{п}}),$$

где $P_{\text{н}}$ – полезная мощность в нагрузочном устройстве; $P_{\text{п}}$ – мощность потерь.

3.2.1. Параметрические стабилизаторы (ПС)

В данных стабилизаторах используется полупроводниковый стабилитрон VD , который включают параллельно $R_{\text{н}}$. Последовательно со стабилитроном включают балластный резистор $R_{\text{б}}$ для создания требуемого режима работы (рис. 3.17).

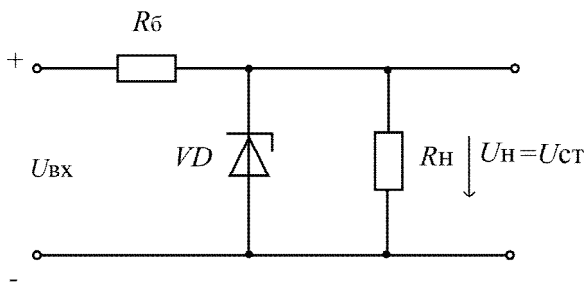


Рис. 3.17. Параметрический стабилизатор напряжения

При изменении напряжения $U_{вх}$ под действием колебания напряжения питающей сети или изменения сопротивления нагрузки $R_н$, напряжение $U_н$ изменяется незначительно, т. к. оно определяется напряжением стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона, которое мало изменяется при изменении протекающего через него тока, что видно на ВАХ стабилитрона (рис. 3.18).

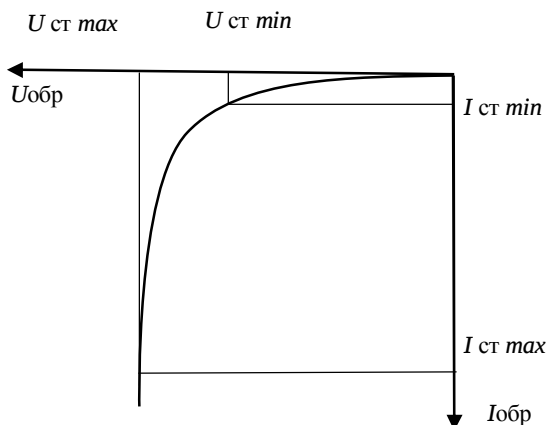


Рис. 3.18. Обратная ветвь ВАХ стабилитрона

В параметрическом стабилизаторе тока используется нелинейный элемент (это может быть полевой или биполярный транзистор), который включают последовательно с нагрузочным устройством (рис. 3.19).

ВАХ нелинейного элемента показывает, что при изменении напряжения от $U_{вх1}$ до $U_{вх2}$ напряжение на нагрузочном элементе изменяется от $U_{нэ1}$ до $U_{нэ2}$, а нагрузочный ток $I_н$ практически не меняется.

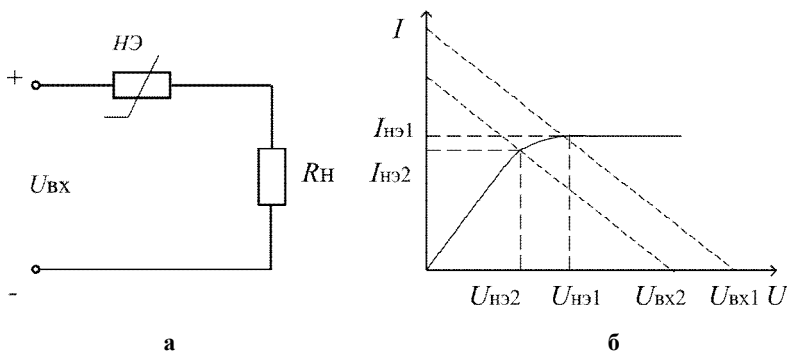


Рис. 3.19. Схема параметрического стабилизатора тока (а) и ВАХ нелинейного элемента (б)

3.2.2. Компенсационные стабилизаторы (КС)

Компенсационные стабилизаторы (КС) постоянных напряжения и тока, являются системами автоматического регулирования, в которых благодаря наличию отрицательной обратной связи обеспечивается постоянство напряжения U_n и тока I_n на нагрузочном устройстве с высокой степенью точности.

Компенсационные стабилизаторы подразделяются на стабилизаторы непрерывного действия и импульсные.

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия представлена на рисунке 3.20.

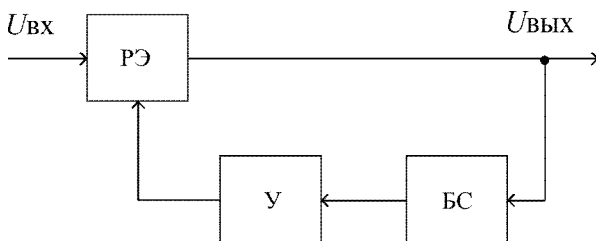


Рис. 3.20. Структурная схема КС напряжения непрерывного действия: БС – блок сравнения; У – усилитель постоянного тока; РЭ – регулирующий элемент

В блок сравнения (БС) входят источник опорного напряжения (параметрический стабилизатор, образованный элементами VD , $R1$, и резистивный делитель ($R3$, $R4$) (рис. 3.21).

Усилитель постоянного тока (У) образован маломощным транзистором $VT2$ и $R2$.

Регулирующий элемент (РЭ) – мощный транзистор $VT1$.

В данном КС происходит непрерывное сравнение U_n с опорным напряжением $U_{оп}$.

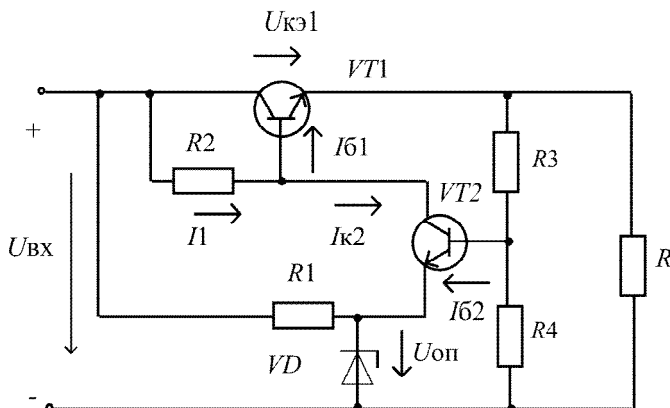


Рис. 3.21. Принципиальная электрическая схема КС напряжения непрерывного действия

Изменение U_n приводит к изменению напряжения на эмиттерном переходе $VT2$, изменению тока базы $I_{Б2}$ и тока коллектора $I_{К2}$. Но $I_{К2} + I_{Б1} = I_1 \gg \text{const}$, поэтому изменение $I_{К2}$ вызывает противоположное изменение тока $I_{Б1}$, который управляет падением напряжения на регулирующем транзисторе $VT1$.

Пусть U_n уменьшилось, тогда уменьшится $DU = U_{бэ2}$ и соответственно $I_{Б2}$ и $I_{К2}$. Ток базы регулирующего транзистора $I_{Б1}$ увеличивается, транзистор $VT1$ откроется и $U_{КЭ1}$ уменьшится. Это поддержит U_n в заданных пределах, так как $U_n = U_{вх} - U_{КЭ1}$.

Импульсные стабилизаторы постоянного напряжения (ИСПН) имеют высокий КПД (0,8...0,85), меньшие габариты и массу. Как и КС непрерывного действия, ИСПН является устройством, в котором применяется отрицательная обратная связь, ослабляющая изменение напряжения $U_{вых}$ или тока I_n .

Отличием ИСПН от компенсационного стабилизатора является работа РЭ-транзистора, который работает в режиме ключа, что дает возможность получить с его выхода однополярные импульсы прямоугольной формы $U_{кл}$ (рис. 3.22).

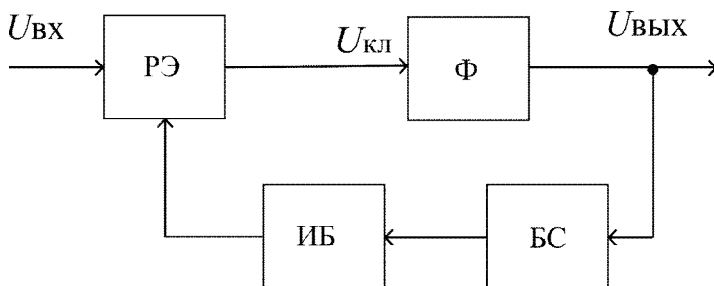


Рис. 3.22. Структурная схема ИСПН:
 Ф – сглаживающий фильтр; РЭ – регулирующий элемент; БС – блок сравнения;
 ИБ – импульсный блок

В БС напряжение $U_{\text{вых}}$ сравнивается с опорным, получающееся при этом разностное напряжение воздействует на ИБ, который вырабатывает управляющие импульсы разной длительности и частоты следования, которые управляют работой РЭ.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные параметры стабилизаторов напряжения и тока.
2. Как определяются основные параметры стабилизаторов напряжения и тока?
3. Объясните принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.
4. Объясните принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия.
5. Объясните принцип работы стабилизатора тока.
6. Объясните принцип работы импульсного стабилизатора напряжения.

3.3. Управляемые выпрямители одно- и трехфазного тока

Управляемые выпрямители – это устройства, которые позволяют плавно изменять значения выпрямленного напряжения [3, 6, 14].

Схема простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре показана на рисунке 3.23.

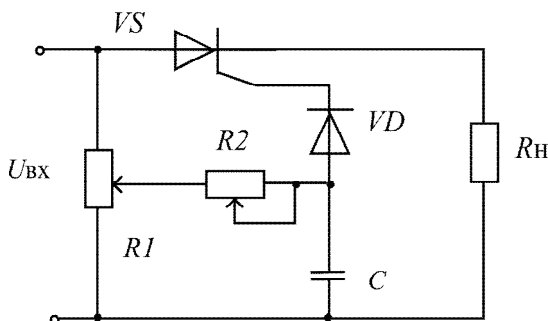


Рис. 3.23. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре

Управление напряжением на выходе такой схемы сводится к управлению во времени моментом отпирания тиристора. Этот процесс осуществляется за счет сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением, подаваемым на управляющий электрод тиристора. Такой сдвиг называют углом управления и обозначают α , а способ управления называют фазовым (рис. 3.24).

Управление величиной α осуществляют с помощью фазовращающей $R2C$ -цепи. Резистором $R1$ изменяют напряжение, подаваемое на управляющий электрод тиристора. Диод $VD1$ обеспечивает подачу на управляющий электрод положительных импульсов.

Оптимальной формой управляющих сигналов является короткий импульс с крутым фронтом, который обеспечивает четкое отпирание тиристора. Для формирования таких импульсов и их сдвига во времени используются импульсно-фазовые системы управления.

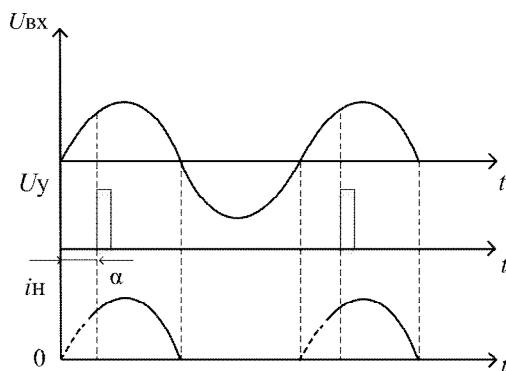


Рис. 3.24. Временные диаграммы входного напряжения $U_{ВХ}$, напряжения управления U_y и тока на нагрузке i_H для однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя

Однофазный двухполупериодный выпрямитель представлен на рисунке 3.25. В такой схеме тиристоры работают поочередно, на управляющие электроды тиристоров сигналы управления подаются от импульсно-фазового блока управления.

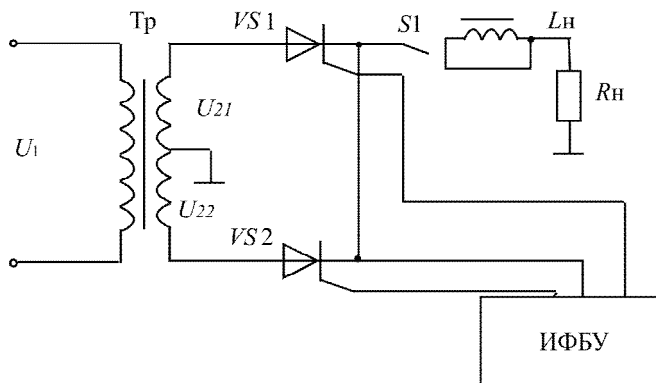


Рис. 3.25. Схема однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя

Временные диаграммы представлены на рисунке 3.26.

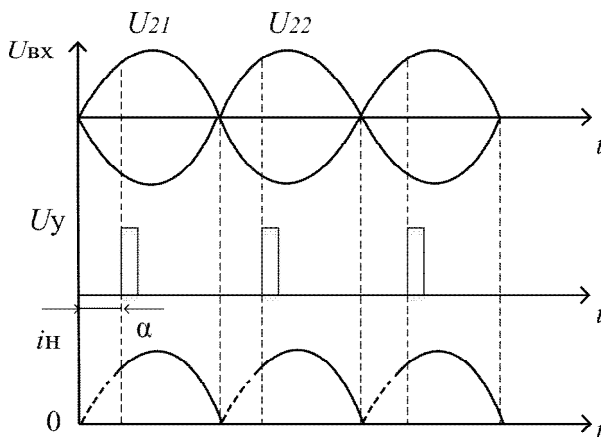


Рис. 3.26. Временные диаграммы входного напряжения $U_{вх}$, напряжения управления U_y и тока на нагрузке i_n для однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя

Основными характеристиками управляемого выпрямителя являются:

а) характеристика управления, которая выражает зависимость выпрямленного напряжения от угла управления $U_n = f(\alpha)$ (рис. 3.27);

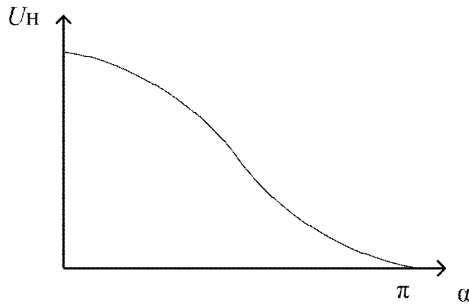


Рис. 3.27. Характеристика управления

б) внешние характеристики, которые определяют зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока при фиксированных значениях угла α (рис. 3.28).

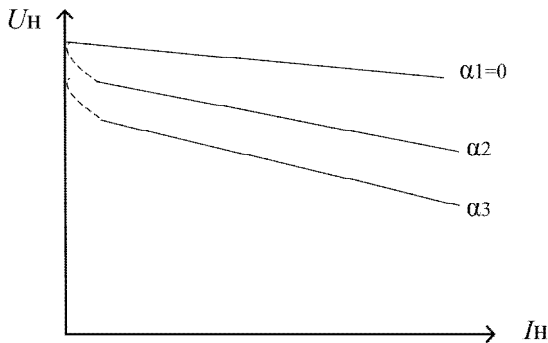


Рис. 3.28. Внешние характеристики

Трехфазные управляемые выпрямители [3, 12] являются выпрямителями средней и большой мощности. Различают схему трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом и схему трехфазного мостового выпрямителя.

Трехфазный выпрямитель с нулевым (или нейтральным) выводом (рис. 3.29) обычно работает на активно-индуктивную нагрузку. Длительность работы тиристоров определяется углом управления α , значение которого задается импульсно-фазовым блоком управления (ИФБУ). Изменение угла α приводит к изменению средних значений выпрямленного напряжения $U_{\text{нр}}$ и $I_{\text{нр}}$ тока. Это видно на временных диаграммах при индуктивной нагрузке $L_n = 0$ (рис. 3.30).

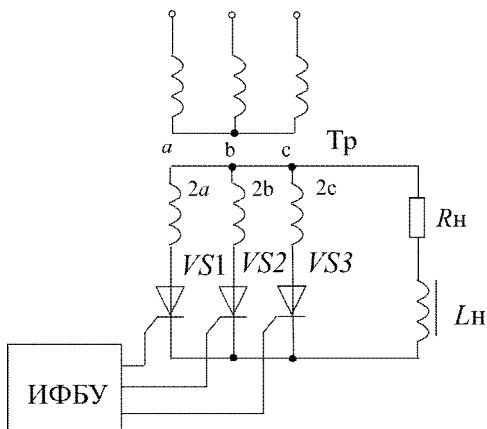


Рис. 3.29. Схема трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом

При угле управления $\alpha < \pi/6$ выпрямленный ток i_n имеет непрерывный характер, и каждый тиристор открыт в течение времени, соответствующего углу $2\pi/3$. При угле управления $\alpha > \pi/6$ в выпрямленном токе i_n появляются паузы.

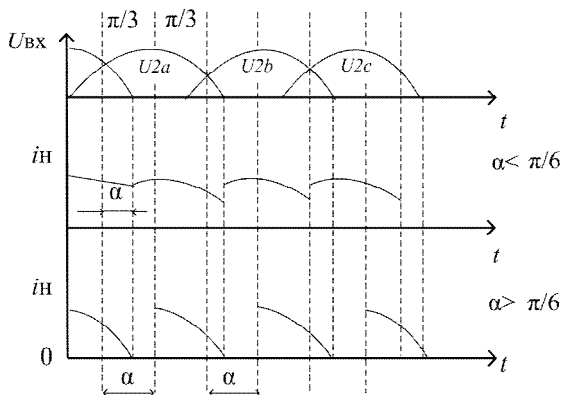


Рис. 3.30. Временные диаграммы трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

Характеристика управления трехфазного выпрямителя показана на рисунке 3.31, откуда видно, что при $L_n = 0$ напряжение $U_{н\text{ср}}$ равно нулю при $\alpha = 150^\circ$. При $L_n = \infty$, напряжение на нагрузочном устройстве становится равным нулю при угле управления $\alpha = 90^\circ$.

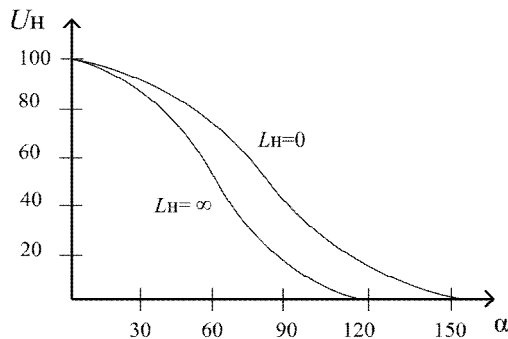


Рис. 3.31. Характеристика управления трехфазного выпрямителя

Характеристики управления при $L_n \rightarrow 0$ и $L_n \rightarrow \infty$ располагаются между этими двумя предельными характеристиками. Нагрузочный ток i_n при $L_n = \infty$ будет сглаживаться и иметь непрерывный характер при $\alpha > \pi/6$.

В схему трехфазного мостового управляемого выпрямителя входят шесть тиристоров (рис. 3.32). Тиристоры $VS1, VS2, VS3$ объединены в катодную группу, а тиристоры $VS4, VS5, VS6$ – в анодную группу.

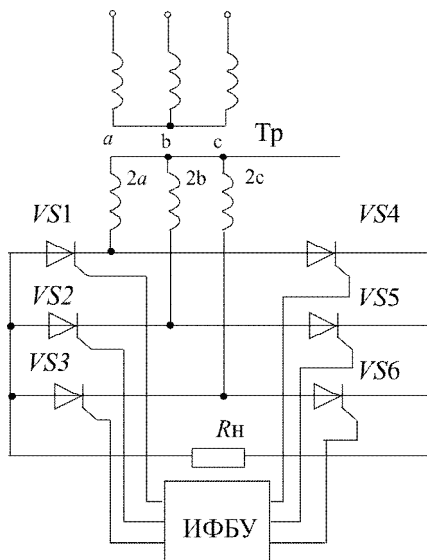


Рис. 3.32. Схема трехфазного мостового выпрямителя

Так же, как и в неуправляемом выпрямителе, здесь одновременно работают два тиристора: один из анодной группы, другой – из катодной. При этом управляющий сигнал, подаваемый на тиристор катодной группы, опережает на 180° сигнал, поступающий на тиристор анодной группы.

Характеристики управления выглядят так же, как для выпрямителя с нулевым выводом. Отличие лишь в том, что предельным углом управления, при котором $U_{\text{нсп}} = 0$, является угол $\alpha = 120^\circ$. Внешние характеристики трехфазных управляемых выпрямителей имеют такой же вид, как внешние характеристики неуправляемых выпрямителей.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию управляемых выпрямителей.
2. Как изменится среднее значение выпрямленного напряжения при увеличении угла управления?
3. Объясните характеристики управляемого выпрямителя.
4. Как осуществляется управление выпрямленным напряжением на нагрузке?
5. Принцип работы трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом.
6. Принцип работы трехфазного мостового выпрямителя.

3.4. Инверторы. Импульсные источники питания

Источники вторичного электропитания, которые преобразуют постоянное напряжение в переменное напряжение, называют инверторами [7, 12].

Классификация инверторов проводится по следующим признакам:

1) по типу коммутирующих приборов:

- а) тиристорные;
- б) транзисторные;

2) по принципу коммутации;

- а) ведомые сетью;
- б) автономные;

3) по роду преобразуемой величины:

- а) инверторы тока;
- б) инверторы напряжения;

4) по числу фаз:

- а) однофазные;
- б) трехфазные.

3.4.1. Инверторы, ведомые сетью

Схема тиристорного инвертора представляет собой однофазный двухполупериодный инвертор с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рис. 3.33).

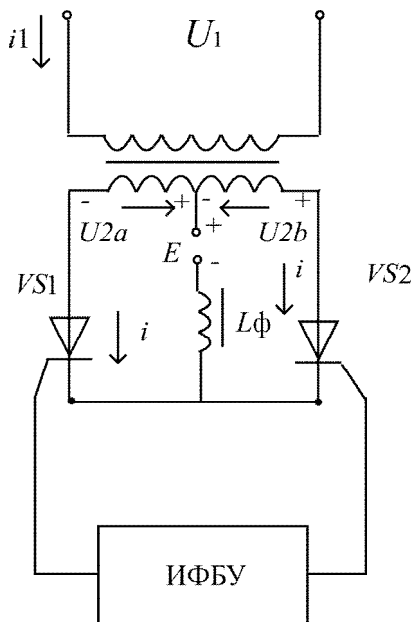


Рис. 3.33. Схема тиристорного инвертора

Запирание и отпирание тиристоров происходит под воздействием напряжения вторичной обмотки трансформатора, которое создается сетью переменного тока. Поэтому такой инвертор называют инвертором, ведомым сетью.

Для передачи электроэнергии, вырабатываемой источником E , в сеть переменного тока необходимо, чтобы ток i_1 , потребляемый от сети, и напряжение U_1 находились в противофазе. Подобный сдвиг возможен в том случае, когда тиристоры будут открываться поочередно при отрицательной полярности напряжений U_{2a} и U_{2b} (рис. 3.34). При этом происходит поочередное подключение вторичных обмоток трансформатора к источнику E .

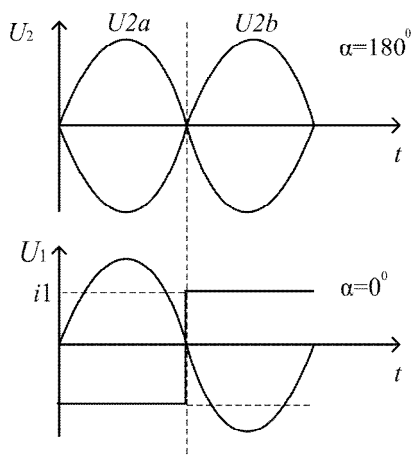


Рис. 3.34. Временные диаграммы напряжений и тока инвертора, ведомого сетью

Следует отметить, что, если один тиристор будет отпираться точно при угле управления $\alpha = 180^\circ$, то другой тиристор не успеет закрыться. В этом случае запирающийся тиристор создаст короткое замыкание по цепи: вторичная обмотка трансформатора – источник E . Это явление называют срывом инвертирования или опрокидыванием инвертора. Чтобы исключить этот процесс, необходимо сделать угол $\alpha < 180^\circ$ на угол β , который называется углом опережения отпирания (рис. 3.35).

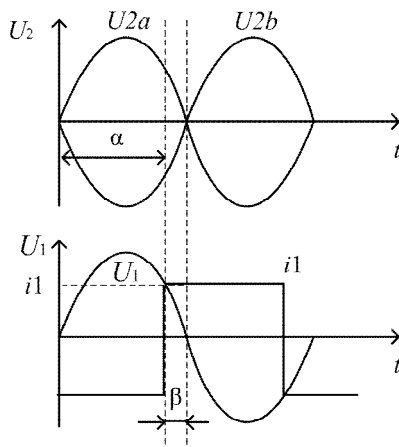


Рис. 3.35. Временные диаграммы напряжений и тока инвертора, ведомого сетью, при $\alpha < 180^\circ$ на угол β

3.4.2. Автономные инверторы

Автономные инверторы (АИ) осуществляют преобразование постоянного тока в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работают на автономную нагрузку.

АИ подразделяются на следующие виды:

- автономные инверторы тока (АИТ);
- автономные инверторы напряжения (АИН);
- автономные резонансные инверторы (АРИ).

В АИТ источник питания работает в режиме источника тока, что достигается включением в цепь дросселя L_0 (рис. 3.36).

Тиристоры $VS1$ и $VS2$ открываются поочередно запускающими импульсами, поступающими от ИФБУ с входов «Вх1» и «Вх2».

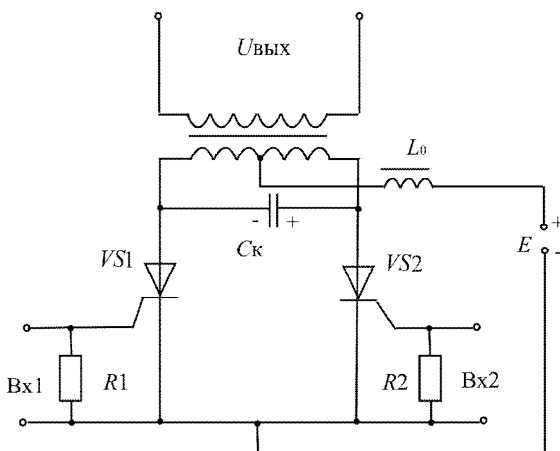


Рис. 3.36. Схема автономного инвертора тока

3.4.3. Импульсные источники питания

Импульсные, или ключевые источники электропитания в настоящее время получили широкое распространение. Их основными достоинствами являются:

- высокий коэффициент полезного действия;
- малые габариты и масса;
- высокая удельная мощность.

Все перечисленные свойства эти источники питания получили благодаря применению ключевого режима при работе силовых элементов,

когда потери в транзисторе оказываются достаточно малыми. Это приводит к тому, что средняя мощность, рассеиваемая в ключевом транзисторе, оказывается намного меньше, чем в линейном регуляторе.

Улучшение массогабаритных характеристик источника питания обусловлено, прежде всего, тем, что из схемы источника питания исключается силовой трансформатор, работающий на частоте 50 Гц. Вместо него в схему вводится высокочастотный трансформатор или дроссель, габариты и масса которого намного меньше низкочастотного силового трансформатора.

К недостаткам импульсных источников электропитания обычно относят:

- сложность схемы;
- наличие высокочастотных шумов и помех;
- увеличенные пульсации выходного напряжения;
- большое время выхода на рабочий режим.

Обобщенная структурная схема импульсного источника питания приведена на рисунке 3.37. Она состоит из четырех основных блоков:

- сетевого выпрямителя с емкостным фильтром;
- высокочастотного инвертора выпрямленного напряжения сети;
- устройства управления высокочастотным инвертором (обычно это специализированная микросхема управления);
- выходного высокочастотного выпрямителя с емкостным фильтром.

Высокочастотный инвертор и устройство управления совместно образуют импульсный преобразователь, который может быть индуктивным и емкостным.

Рассмотрим работу ключевого источника питания, пользуясь обобщенной структурной схемой, приведенной на рисунке 3.37.

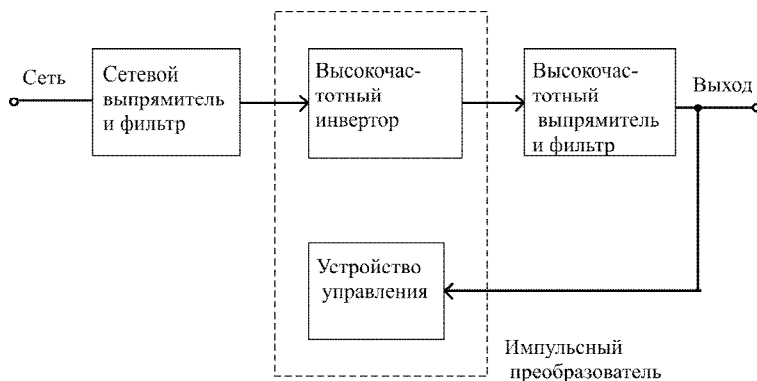


Рис. 3.37. Структурная схема импульсного источника питания

Гармоническое напряжение сети (50 или 60 Гц) выпрямляется сетевым выпрямителем и заряжает конденсатор фильтра, имеющий достаточно большую емкость, что обеспечивает низкие пульсации выпрямленного напряжения.

Это напряжение поступает на вход импульсного преобразователя, который преобразует его в высокочастотные импульсы прямоугольной формы. Частота импульсного напряжения обычно лежит в пределах от 20 до 100 кГц. С увеличением частоты преобразования увеличивается удельная мощность, но одновременно растут потери в элементах преобразователя, что приводит к снижению КПД.

С выхода преобразователя напряжение поступает на высокочастотный выпрямитель с емкостным фильтром.

В большинстве случаев высокочастотный инвертор работает на фиксированной частоте, а регулирование выходного напряжения обеспечивается с помощью широтно-импульсной модуляции управляющих сигналов. Широтно-импульсное регулирование выполняется при помощи схемы управления, на вход которой подается выходное напряжение. Для обеспечения гальванического разделения выхода от силовой сети в трансформаторных схемах инверторов обычно используются различные типы устройств гальванической развязки: оптроны, трансформаторы, изолирующие усилители и др.

Выпрямители и инверторы используются также для создания схем для бесперебойного питания аппаратуры (рис. 3.38).



Рис. 3.38. Функциональная схема устройства для бесперебойного питания аппаратуры

Вопросы для самоконтроля

1. Классификация инверторов и принцип инвертирования.
2. Отличия процесса выпрямления и процесса инвертирования.
3. Принцип работы инвертора, ведомого сетью.
4. Принцип работы автономного инвертора.
5. Перечислите достоинства импульсного источника питания.

Раздел 4. ИМПУЛЬСНАЯ И ЦИФРОВАЯ ТЕХНИКА. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ

4.1. Представление информации в импульсной форме. Генераторы импульсов

Импульсная и цифровая техника использует импульсный режим работы, при котором кратковременное воздействие сигнала чередуется с паузой.

На базе импульсной техники выполняются системы управления и регулирования, устройства измерения, на ней основана цифровая вычислительная техника.

Импульсный сигнал характеризуется рядом параметров, которые можно рассмотреть на примере реального импульса напряжения прямоугольной формы (рис. 4.1):

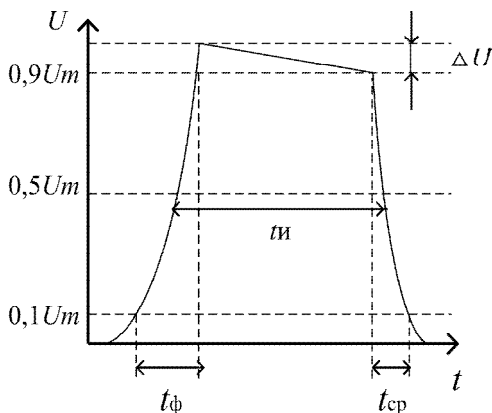


Рис. 4.1. Параметры сигнала прямоугольной формы

Параметры импульсного сигнала:

- 1) амплитуда импульса U_m ;
- 2) длительность импульса t_n , измеряют на уровне $0,5U_m$, иногда на уровне $0,1U_m$ в зависимости от формы сигнала;
- 3) длительность фронта импульса t_ϕ — определяется временем нарастания импульса от $0,1U_m$ до $0,9U_m$;
- 4) длительность среза импульса — определяется временем убывания импульса от $0,9U_m$ до $0,1U_m$;

5) спад вершины импульса ΔU .

Параметрами последовательности импульсов являются (рис. 4.2):

- 1) период повторения T ;
- 2) длительность паузы $t_{\Pi} = T - t_{\text{и}}$ – интервал времени между окончанием одного и началом другого импульса;
- 3) длительность импульса $t_{\text{и}}$;
- 4) частота повторения $f = 1/T$;
- 5) коэффициент заполнения γ , который характеризуется отношением длительности импульса к периоду их следования $\gamma = t_{\text{и}} / T$;
- 6) скважность $q = T / t_{\text{и}} = 1/\gamma$.

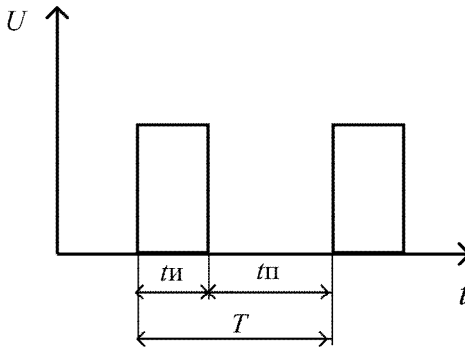


Рис. 4.2. Параметры последовательности импульсных сигналов

Сигнал прямоугольной формы имеет два фиксированных уровня напряжения: уровень высокого напряжения соответствует уровню логической «1», и уровень низкого напряжения – логического «0». На таком виде сигналов основана работа цифровых вычислительных устройств.

Простейшие формирователи импульсных сигналов

Диодные и транзисторные ключи

В состав многих импульсных устройств входят электронные ключи, основу которых составляет активный элемент (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор), работающий в режиме ключа. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: «Включено», «Выключено».

В реальных ключах токи и уровни $U_{\text{вых}}$ зависят от типа и параметров активных элементов. Ключи могут собираться на диодах и на транзисторах.

Ключевая схема на биполярном транзисторе показана на рисунке 4.3.

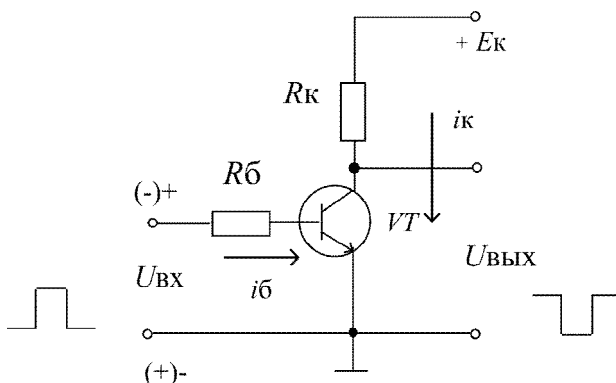


Рис. 4.3. Ключевая схема на биполярном транзисторе

Транзистор выполняет функцию ключа в последовательной цепи с резистором R_k и источником питания E_k . Входная (управляющая) цепь отделена от выходной (управляемой) цепи. Состояние ключа, т. е. открыт он или закрыт, определяется по выходной характеристике транзистора (рис. 4.4).

Первое состояние определяется точкой А1 на линии нагрузки, которая строится так же, как и для усилительного каскада.

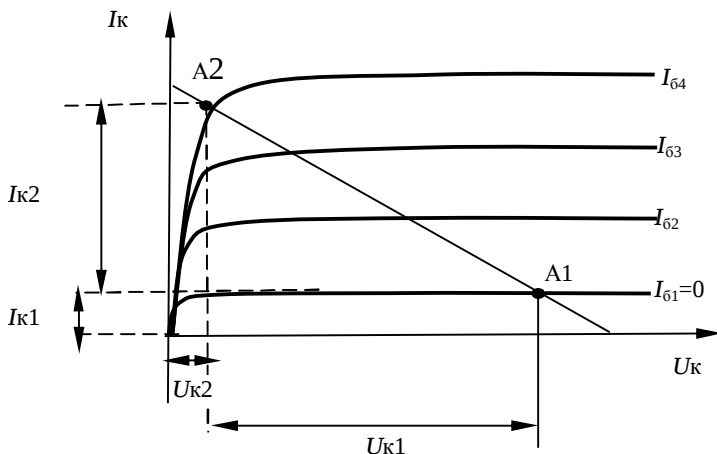


Рис. 4.4. Выходная характеристика транзистора

Это состояние называют режимом отсечки, который осуществляется подачей на его вход напряжения отрицательной полярности, т. е. при отрицательных потенциалах базы. При токе $I_b = 0$, транзистор закрыт, коллекторный ток I_{k1} равен начальному коллекторному току, а напряжение $U_k = U_{k1} \approx E_k$.

Второе состояние определяется точкой А2 и называется режимом насыщения. Он реализуется при положительных потенциалах базы. При этом ток базы определяется сопротивлением резистора R_b и ток $I_2 = U_{bx} / R_b$, т. к. сопротивление открытого эмиттерного перехода мало, потому что транзистор открыт. Коллекторный переход так же открыт, ток $I_{k2} \approx E_k / R_k$, $U_{k2} \approx 0$. Т. е. повышению U_{bx} (потенциала базы) соответствует понижение $U_{вых}$ (потенциала коллектора), и наоборот. Такой ключ называют инвертирующим. Электронные ключи используют в устройствах формирования импульсов.

К простейшим устройствам формирования импульсов относят:

- 1) ограничители;
- 2) линейные цепи, включаемые на выходе электронных ключей.

Для ограничения сверху применяют диодные ключи или транзисторные ключи, работающие только в режиме отсечки или только в режиме насыщения. На диаграммах (рис. 4.5) показано, как происходит ограничение синусоидального напряжения с помощью параллельного диодного ключа с ненулевым уровнем включения ключа.

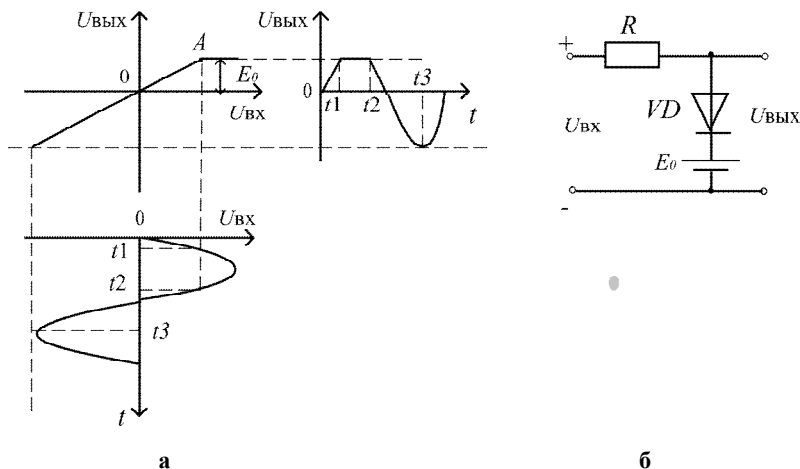


Рис. 4.5. Диаграмма работы диодного ключа: а – временные диаграммы и передаточная характеристика диодного ключа; б – схема включения диодного ключа

При положительной полярности напряжения $U_{\text{вх}}$ VD открыт (ключ замкнут), напряжение $U_{\text{вых}} = 0$, при отрицательной полярности напряжения $U_{\text{вх}}$ VD закрыт (ключ разомкнут), $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$. Уровень ограничения равен уровню включения ключа.

Аналогично получают ограничение снизу. Для двухстороннего ограничения используют двойные ключи.

Таким образом, ограничители позволяют сформировать трапецеидальное напряжение или прямоугольное, если амплитуда напряжения $U_{\text{вх}}$ значительно больше уровня ограничения, а также сгладить вершины импульсов, искаженных помехой.

Линейные цепи

Линейные цепи служат для формирования коротких импульсов. К ним относятся дифференцирующие цепи и интегрирующие цепи. Дифференцирующие цепи – это линейные четырехполюсники, у которых напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально производной от входного напряжения $U_{\text{вх}}$ по времени:

$$U_{\text{вых}} = \tau dU_{\text{вх}}/dt,$$

где τ – постоянная времени.

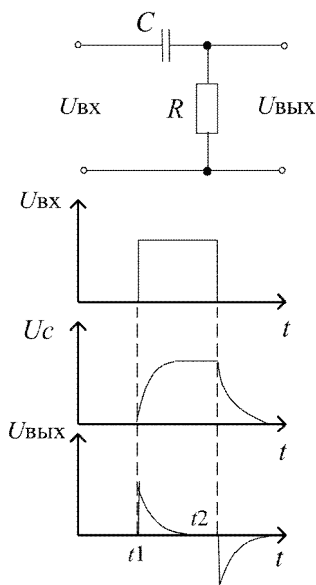


Рис. 4.6. Дифференцирующая цепь и временные диаграммы ее работы

На входе действует прямоугольный импульс напряжения (рис. 4.6). Конденсатор сначала заряжается, затем какое-то время находится в покое, затем разряжается, на выходе образуются короткие импульсы.

К линейным цепям относятся интегрирующие цепи, у которых $U_{\text{ВЫХ}}$ пропорционально интегралу по времени от $U_{\text{ВХ}}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = t \int U_{\text{ВХ}} dt.$$

При этом в схеме (рис. 4.7) C и R меняются местами.

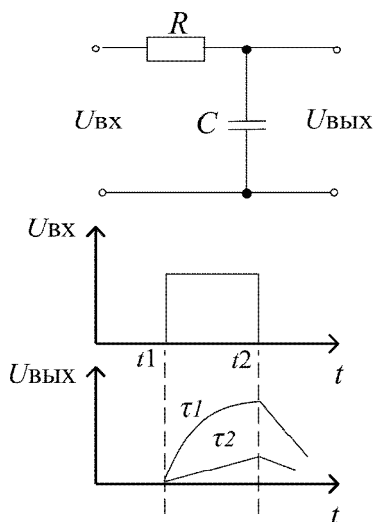


Рис. 4.7. Интегрирующая цепь и временные диаграммы ее работы

Мультивибраторы

Мультивибраторы предназначены для генерирования периодической последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы. Мультивибраторы обычно выполняют функцию задающего генератора, формирующего запускающие входные импульсы для последующих узлов и блоков.

Классификация мультивибраторов производится по следующим признакам:

1. по виду используемых элементов:

- а) мультивибраторы на транзисторах;
- б) мультивибраторы на ИМС.

2. по режиму работы:

а) автоколебательные;

б) ждущие.

Автоколебательные мультивибраторы

Подобно генераторам синусоидальных колебаний, автоколебательные мультивибраторы работают в режиме самовозбуждения. Для формирования импульсного сигнала внешнее воздействие не требуется. Процесс получения импульсного напряжения основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения. Автоколебательные мультивибраторы могут быть построены на транзисторах или на операционном усилителе (ОУ).

Автоколебательный мультивибратор на транзисторах.

В автоколебательном режиме (рис. 4.8) транзисторы поочередно переходят из открытого состояния в закрытое, и обратно. При включении источника коллекторного питания $+E_k$ один из транзисторов окажется открытым, а другой – закрытым. Если открыт, например, транзистор $VT1$, то конденсатор $C1$, зарядившийся во время установления процессов в схеме, начинает разряжаться по двум цепочкам: через сопротивления R_{k1} и $R1$ и коллектор – эмиттер транзистора $VT1$ и эмиттер – база транзистора $VT2$.

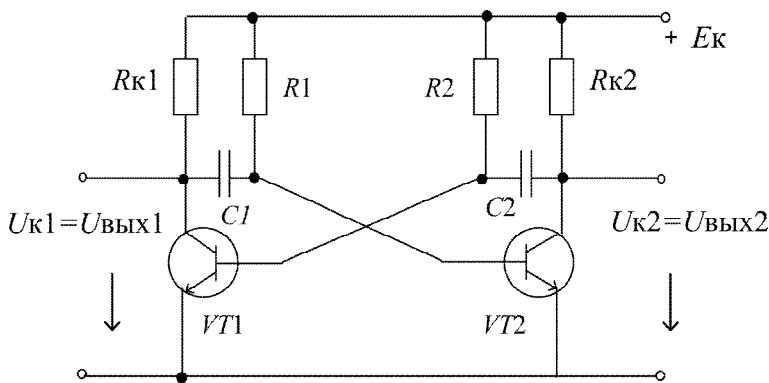


Рис. 4.8. Схема автоколебательного мультивибратора на транзисторах

Разрядный ток создает на резисторе $R1$ падение напряжения, убывающее по мере уменьшения этого тока по экспоненте. И это напряжение приложено к базе транзистора $VT2$ и поддерживает его в закрытом состоянии, т. е. $U_{бэ} VT2$ увеличивается по экспоненте.

В это же время конденсатор $C2$ заряжается от источника E_k через участок эмиттер – база открытого транзистора $VT1$ и резистор R_{k2} . По мере заряда конденсатора $C2$ ток, протекающий по R_{k2} уменьшается и потенциал коллектора $VT2$, увеличивается по экспоненте. Через время, когда конденсатор $C2$ зарядится, потенциал коллектора станет примерно равен E_k . Т. к. $R1 \gg R_{k2}$, то процесс разряда конденсатора $C1$ проходит значительно медленнее, чем процесс заряда конденсатора $C2$. Когда потенциал базы $VT2$ приблизится к нулю, при полной разрядке $C1$, $VT2$ приоткроется и начнет проводить ток. С этого момента, в результате действия положительной обратной связи, происходит лавинообразный процесс, в результате которого транзистор $VT2$ открывается, а транзистор $VT1$ закрывается, т. к. напряжение на конденсаторе $C2$ приложено обратно к базе – эмиттер $VT1$. Далее все процессы повторяются, но уже относительно открытого транзистора $VT2$ (временные диаграммы показаны на рисунке 4.9).

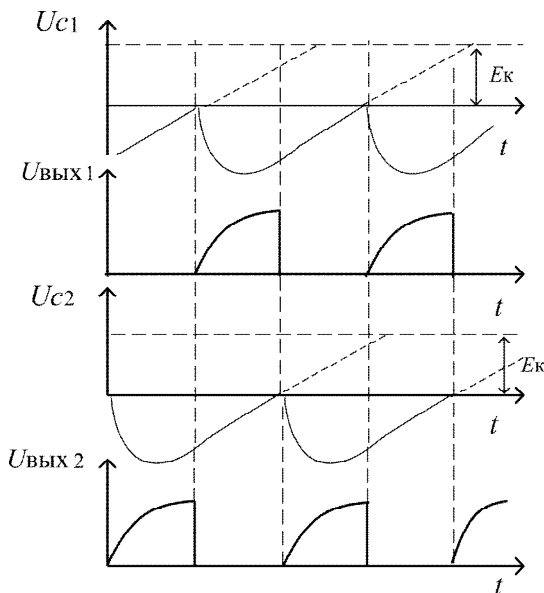


Рис. 4.9. Временные диаграммы автоколебательного мультивибратора на транзисторах

Таким образом, параметры элементов $C1$, $R1$, $C2$, $R2$ определяют длительность импульса соответственно на выходе 2 и выходе 1.

В симметричном мультивибраторе выделяют следующие параметры (для выхода 2):

- 1) период колебания $T \gg 1,4 R_1 C_1$;
- 2) амплитуда импульсов $U_m \gg \frac{E_k}{1,2...1,3}$;
- 3) длительность импульсов $\tau_{\text{и}} \gg 0,7 R_1 C_1$;
- 4) длительность переднего фронта $\tau_{\text{ф}} \gg 2 R_k C$.

Аналогично будут определяться параметры для выхода 1, но с использованием параметров C_2 , R_2 .

Автоколебательный мультивибратор на ОУ

Мультивибратор на ОУ относится к самовозбуждающимся генераторам (рис. 4.10).

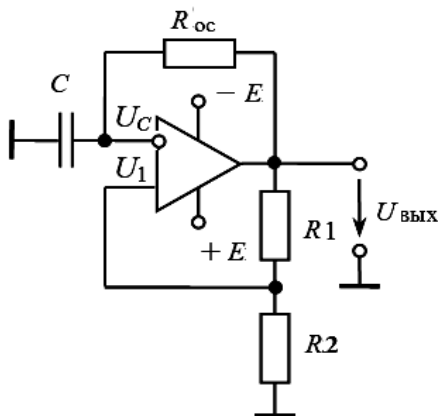


Рис. 4.10. Схема автоколебательного мультивибратора на ОУ

ОУ работает в импульсном режиме (на нелинейном участке амплитудной характеристики). Он сравнивает два сигнала: по неинвертирующему входу U_1 и по инвертирующему входу U_c (напряжение конденсатора C). В результате перезарядки конденсатора выходное напряжение скачком изменяется от $U_{\text{ВЫХ max}}$ до $U_{\text{ВЫХ min}} = -U_{\text{ВЫХ max}}$. Временные диаграммы показаны на рисунке 4.11.

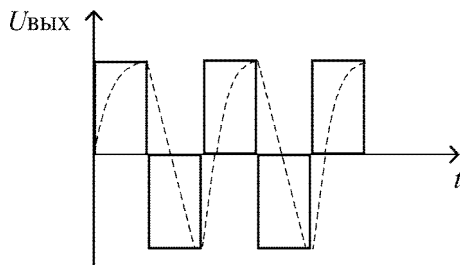


Рис. 4.11. Временные диаграммы автоколебательного мультивибратора на ОУ

При $R_1 = R_2$ длительность импульса $t_{и} \gg 1,1R_{oc}C$, а период импульса $T = 2t_{и} \gg 2,2R_{oc}C$. Изменяя величины сопротивления R_{oc} и конденсатора C , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

Ждущий мультивибратор

В ждущем режиме имеется одно состояние устойчивого равновесия и одно состояние квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под воздействием внешнего запускающего импульса, а обратный переход – самопроизвольно по истечении некоторого времени. Ждущие мультивибраторы называют еще одновибраторами.

Ждущий мультивибратор на транзисторах.

Схема ждущего мультивибратора с эмиттерной связью показана на рисунке 4.12.

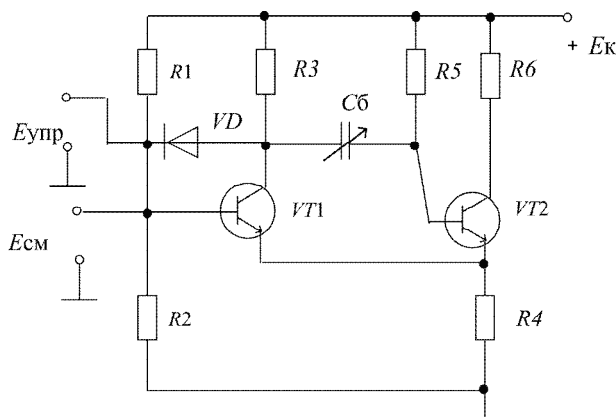


Рис. 4.12. Схема ждущего мультивибратора на транзисторах

В устойчивом состоянии схемы при отсутствии запускающих импульсов транзистор $VT2$ открыт положительным смещением от источника питания $+E_k$ через резистор $R5$. Протекающий через резистор ток вызывает падение напряжения на резисторе $R4$. Потенциал базы транзистора $VT1$ устанавливается делителем $R1, R2$. Сопротивления $R1, R2, R4$ выбирают такими, чтобы $U_{б1} < U_{з2}$, поэтому в устойчивом состоянии $VT1$ закрыт. Емкость C_6 оказывается подключенной левой обкладкой через $R3$ к источнику E_k , а правой через открытый переход эмиттер – база к резистору $R4$.

При поступлении на вход запускающего импульса положительной полярности транзистор $VT1$ открывается. При этом положительная обкладка конденсатора C_6 присоединяется через открытый $VT1$ к эмиттеру $VT2$, а отрицательная обкладка к его базе. Это приводит к запиранию транзистора $VT2$ и, следовательно, резкому увеличению потенциала на его коллекторе и прерыванию тока через коллектор – эмиттер транзистора $VT2$.

С моментом открывания транзистора $VT1$ начинается перезаряд емкости током, протекающим по цепи $+E_k, R5, C_6$, коллектор – эмиттер $VT1, R4$, "земля".

Напряжение $U_{б2}$ при этом постепенно возрастает и достигает порога отпирания транзистора $VT2$. Т. е. $U_{з2} > U_{б1}$, $VT1$ запирается, возвращая схему в исходное состояние (т. е. напряжение $U_{к2}$ скачком снижается, заканчивая формирование прямоугольного импульса на выходе схемы).

Таким образом, ждущий мультивибратор реагирует на поступление короткого запускающего импульса формированием одиночного прямоугольного импульса, длительность которого определяется параметрами времязадающей цепи мультивибратора ($R5, C$) с постоянной времени $t @ R5C$.

Ждущие мультивибраторы используют для расширения импульсов; для задержки сигнала на заданное время (запускающий импульс может быть задержан на время, равное длительности импульса ждущего мультивибратора; если к его выходу подключить устройство, реагирующее на период напряжения по окончании выходного импульса, то можно реализовать реле времени); для задания регулируемых интервалов времени (таймеры).

Автоколебательный и ждущий мультивибраторы могут быть построены на ИМС со своими особенностями работы.

Блокинг-генераторы

Блокинг-генераторы предназначены для формирования импульсов тока или напряжения прямоугольной формы преимущественно малой длительности. Они находят применение в схемах формирования пилообразного тока для формирования развертки электронного луча по экрану осциллографа. На основе блокинг-генератора выполняют формирователи управляющих импульсов в цифровых системах.

По принципу построения блокинг-генераторы представляют собой однокаскадные транзисторные усилители с глубокой положительной обратной связью, которая осуществляется импульсным трансформатором. Схема блокинг-генератора, выполненная на транзисторе с ОЭ, показана на рисунке 4.13. Цепь положительной обратной связи (ПОС) осуществлена с помощью вторичной обмотки ω_b трансформатора Тр, конденсатора C и резистора R , ограничивающего ток базы. Резистор R_6 создает контур разряда конденсатора на этапе закрытого состояния транзистора.

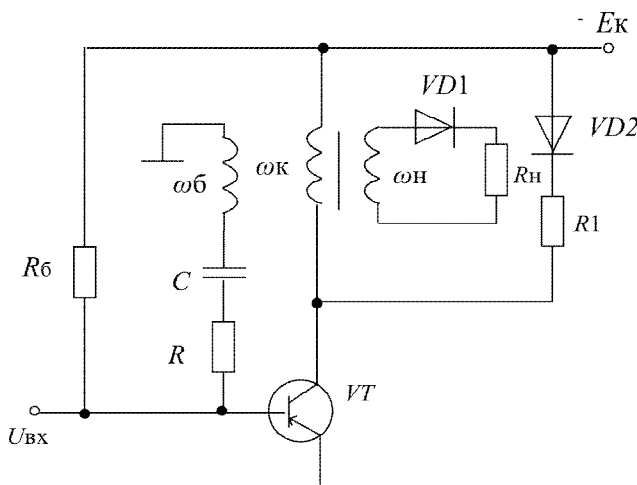


Рис. 4.13. Схема блокинг-генератора на транзисторе с ОЭ

Выходной сигнал снимают либо непосредственно с коллектора транзистора, либо с дополнительной нагрузочной обмотки ω_n трансформатора Тр, которая связана с коллекторной обмоткой ω_k трансформатора. Диод $VD1$ исключает прохождение в нагрузку

импульса напряжения отрицательной полярности, который возникает при запираании транзистора VT . Диод $VD2$ и сопротивление $R1$ выполняют функции защиты транзистора от перенапряжения.

В автоколебательном режиме в начальный момент времени транзистор VT закрыт, напряжение $U_k = -E_k$, напряжение на обмотке трансформатора, на базе транзистора U_b и на нагрузке U_n равны нулю. Закрытое состояние VT создается напряжением на конденсаторе C , который перезаряжается по цепи $\omega_b - C - R - R_b - (-E_k)$. Когда напряжение на C становится равным 0, то транзистор открывается и напряжение на коллекторе U_k уменьшается, что вызывает появление напряжения на коллекторной обмотке ω_k . Напряжение на ω_k трансформируется в ω_b с такой полярностью, которая приводит в результате ПОС к увеличению базового тока i_b , что вызывает увеличение коллекторного тока i_k , снижение напряжения на коллекторе и дальнейшее повышение напряжения на ω_k и ω_b . Процесс завершается переходом транзистора в режим насыщения и называется прямым блокинг-процессом.

Однако по мере заряда конденсатора, ток базы i_b уменьшается, вследствие чего уменьшается степень насыщения транзистора. Транзистор начинает закрываться и вместе с этим заканчивается формирование импульса напряжения.

Переход транзистора в закрытое состояние происходит за счет ПОС также лавинообразно и называется обратным блокинг-процессом.

Генераторы линейно изменяющегося напряжения

Генераторы линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) служат для создания развертки электронного луча по экрану осциллографа, получение временных задержек импульсных сигналов, модуляции импульсов по длительности и т. д.

Линейно изменяющееся напряжение (ЛИН) – это импульсное напряжение, которое в течение некоторого времени изменяется практически по линейному закону, а затем возвращается к исходному уровню (рис. 4.14).

Параметры ЛИН:

- 1) максимальное значение амплитуды U_m ;
- 2) длительность рабочего хода t_p ;
- 3) время обратного хода t_0 ;
- 4) коэффициент нелинейности ε .

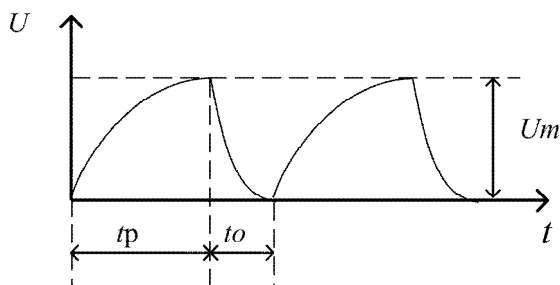


Рис. 4.14. Вид линейно изменяющегося напряжения

Формирование линейно изменяющегося напряжения (ЛИН) (или пилообразного) основано на чередовании во времени процессов заряда и разряда конденсатора. Схема ГЛИН показана на рисунке 4.15.

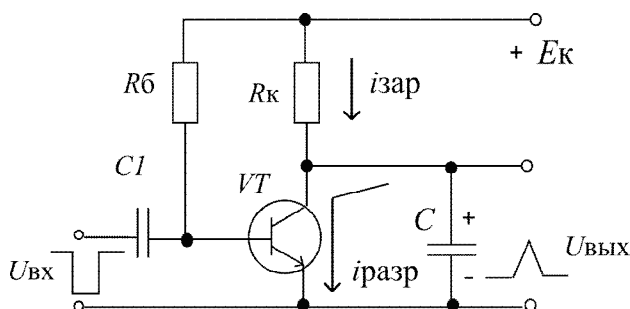


Рис. 4.15. Схема ГЛИН

На транзисторе VT собран ключ, управляемый прямоугольными импульсами отрицательной полярности. В исходном состоянии транзистор насыщен (ключ замкнут), что обеспечивается выбором соотношения сопротивлений резисторов $R_б$ и $R_к$.

При воздействии входного импульса длительностью t_p транзистор закрывается (ключ разомкнут) и конденсатор C заряжается от источника $+E_к$ через резистор $R_к$ (рис. 4.16). Напряжение на конденсаторе изменяется по экспоненте $U_c = E_к (1 - e^{-t/(RC)})$. По окончании входного импульса транзистор переходит в режим насыщения (ключ замкнут), и конденсатор быстро разряжается через промежуток коллектор-эмиттер. Используя начальный участок экспоненты, линейность которого достаточно высока, можно получить импульсы с малым коэффициентом нелинейности.

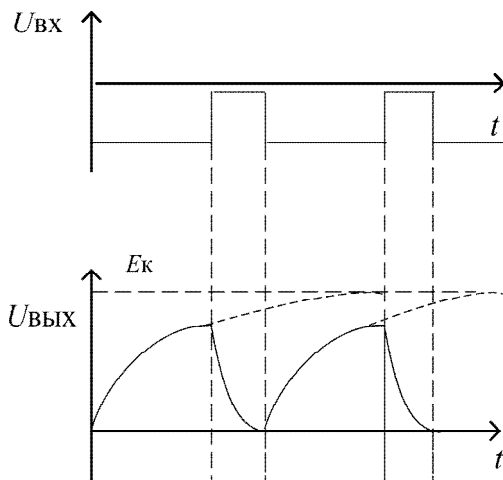


Рис. 4.16. Временные диаграммы $U_{вх}$ и $U_{вых}$ ГЛИН

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите виды и параметры импульсных сигналов.
2. С помощью каких элементов можно получить двухстороннее ограничение импульсных сигналов?
3. Объясните принцип работы автоколебательного мультивибратора на транзисторах. Приведите временные диаграммы его работы.
4. Принцип работы автоколебательного мультивибратора на ОУ.
5. Чем отличается ждущий мультивибратор от автоколебательного?
6. Особенности работы блокинг-генератора в различных режимах.
7. С помощью каких элементов в схеме автоколебательного мультивибратора на транзисторах можно установить требуемую длительность импульсов?
8. Объясните принцип работы ГЛИН.

4.2. Логические элементы

Простые и составные логические элементы

В цифровой и микропроцессорной технике применяется логическая (цифровая) информация. Переменная, отображающая эту информацию, может принимать два фиксированных значения: **1** или **0**.

Такие переменные называются **логическими (булевыми) переменными** по имени английского математика Дж. Буля. Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры Буля (алгебры логики).

В положительной логике принято, что высокий уровень сигнала соответствует логической единице (1), а низкий – логическому нулю (0).

Логическая функция выражает зависимость выходных логических сигналов от входных и также принимает значение **0** или **1**. Логическую функцию представляют в виде **таблицы состояний (таблицы истинности)**, где записываются возможные комбинации аргументов и соответствующие им функции.

Логические элементы (ЛЭ) применяются в автоматике, вычислительной технике и цифровых измерительных приборах. Их создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме, при котором уровни сигналов могут принимать только два значения **0** и **1**.

Все возможные логические функции ***n*** переменных можно образовать с помощью трех основных логических операций: **И**, **ИЛИ**, **НЕ**. Такой набор называют **логическим базисом** или функционально полным.

Существуют три основные логические операции между логическими сигналами:

- конъюнкция – операция логического умножения (логическое И);
- дизъюнкция – операция логического сложения (логическое ИЛИ);
- инверсия – операция логического отрицания (логическое НЕ).

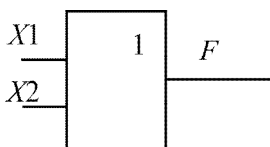
А также:

- операция И-НЕ (операция Шеффера);
- операция ИЛИ-НЕ (операция «стрелка Пирса»).

Логическая функция ***F*** выражает зависимость выходного логического состояния от входных переменных и принимает значения «0» или «1». Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности или таблицы переходов), где записываются комбинации входных сигналов и соответствующие им функции.

ЛЭ, реализующие эти три основные логические операции, называются элементами «ИЛИ», «И» и «НЕ» соответственно, условное обозначение которых и таблицы истинности показаны на рисунке 4.17:

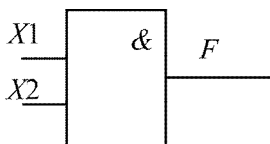
ИЛИ



$$F = X1 + X2$$

$X1$	$X2$	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

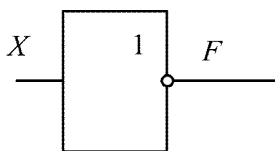
И



$$F = X1 X2$$

$X1$	$X2$	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

НЕ



$$F = \bar{X}$$

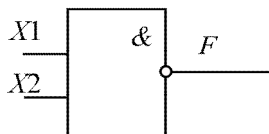
X	F
1	0
0	1

Рис. 4.17. Условное обозначение простых ЛЭ и правила выполнения логических операций (таблицы истинности)

В элементах «ИЛИ» выходной сигнал $F = 1$, если хотя бы на один из д входов подан сигнал «1». В элементах «И» $F = 1$, если одновременно на все д входов подан сигнал «1».

ЛЭ, реализующие операции Шеффера и «стрелка Пирса», называются элементами «И-НЕ», элементами «ИЛИ-НЕ», условное обозначение которых и таблицы истинности показаны на рисунке 4.18.

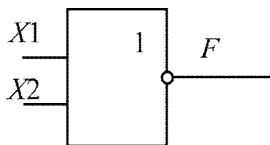
И-НЕ



$$F = \overline{X1 \times X2}$$

$X1$	$X2$	F
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

ИЛИ-НЕ



$$F = \overline{X1 + X2}$$

X1	X2	F
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Рис. 4.18. Условное обозначение составных ЛЭ и правила выполнения логических операций

Количество входов у ЛЭ может быть от 2 до 8 (кроме элемента НЕ). Тогда ЛЭ обозначаются соответственно количеству входов, например, элемент 2ИЛИ, 2И-НЕ, 3ИЛИ, 4И и др.

Основные параметры логических элементов:

- функциональные возможности элемента;
- быстродействие;
- потребляемая мощность;
- помехоустойчивость.

Функциональные возможности определяются коэффициентом разветвления по выходу **n** и коэффициентом объединения по входу **m**.

Показателем быстродействия является среднее время задержки $t_{з.с.}$ прохождения сигнала через элемент.

Потребляемая мощность зависит от серии микросхемы.

Помехоустойчивость характеризует меру невосприимчивости логических элементов к изменению своих состояний под воздействием напряжения помех.

Интегральные логические элементы являются основной элементной базой для построения цифровых устройств.

В зависимости от компонентов, на которых построены логические элементы (т. е. в зависимости от того, какая логика работы лежит в основе), различают следующие типы базовых логических элементов, использующих соответствующие логики:

1. Диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
2. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
3. Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
4. Интегрально-инжекционная логика (I^2L);
5. Логика на комплементарных полевых транзисторах (КМОП).

В 1-м типе используются диоды и биполярные транзисторы, во 2-м, 3-м и 4-м – только биполярные транзисторы, в 5-м – полевые транзисторы.

Элемент «ИЛИ» наиболее просто реализуется на диодах (рис. 4.19).

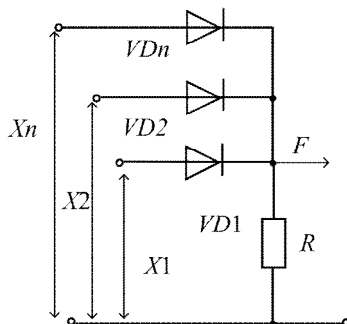


Рис. 4.19. Схемная реализация элемента «ИЛИ»

Значение $F = 1$ на выходе создается передачей входного сигнала вследствие отпираания одного из диодов. Остальные диоды находятся в закрытом состоянии.

Элемент «И» также реализуется на диодах (рис. 4.20).

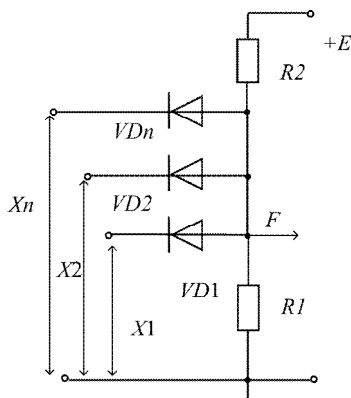


Рис. 4.20. Схемная реализация элемента «И»

При всех входных сигналах $F = 1$, на катоде диодов положительный потенциал относительно общей точки, и они закрыты. На выходе $F = 1$. При нулевом значении сигнала хотя бы на одном из входов, напряжение на выходе определяется падением напряжения на открытом диоде и близко к нулю ($F = 0$).

Элемент «НЕ» представляет собой ключевую схему на транзисторе, которую мы уже рассматривали (рис. 4.3).

Элемент «ИЛИ-НЕ» объединяет элементы «ИЛИ» и «НЕ» с очередностью проведения операций (рис. 4.21).

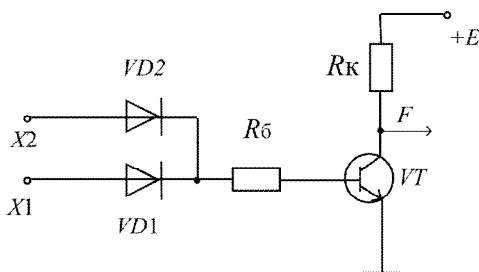


Рис. 4.21. Схемная реализация элемента «ИЛИ-НЕ»

Входным сигналам, равным 1, соответствует $F = 0$ на выходе, а при нулевых сигналах на входе, на выходе $F = 1$.

В элементе «И-НЕ» (рис. 4.22) единичным сигналам на всех входах соответствует «0» на выходе. При «0» на одном из входов создается логическая «1» на выходе. При «1» на обоих входах диоды $VD1$, $VD2$ закрыты. В схеме образуется цепь $+E_k - R_6 - VD - VD$, которая обеспечивает протекание тока базы транзистора $I_6 = E_k/R_6$.

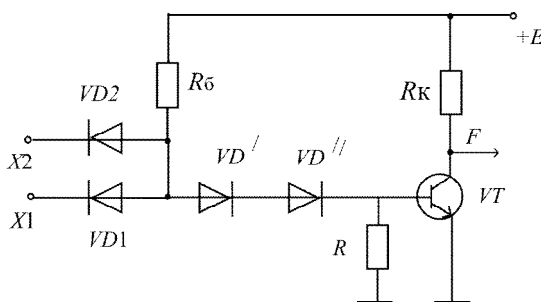


Рис. 4.22. Схемная реализация элемента «И-НЕ»

Транзистор открыт и насыщен, $F = 0$. При логическом «0» на одном из входов (например, $X1$) открывается $VD1$. Образуется цепь: $+E_k - R_6 - VD1 - X1$. При этом цепь $VD - VD$ – эмиттерный переход транзистора оказывается шунтированной цепью с проводящим диодом: $I_6 = 0$, транзистор закрыт, $F = 1$.

Назначение диодов $VD - VD$ т. к. потенциал логического «0» реально больше нуля, то при отсутствии VD и VD это может привести

к отпиранию транзистора. При введении $V_{D\Phi}$ и $V_{D\Phi}$ напряжение между общей точкой диодов и эмиттером транзистора будет приложено к диодам, а $U_{63} = 0$.

Следует отметить, что существуют комбинированные логические элементы, которые позволяют осуществлять более сложные логические операции.

Например, элемент «2И–ИЛИ–НЕ» (рис. 4.23) позволяет выполнять функцию $F = \overline{X1 \times X2 + X3 \times X4}$.

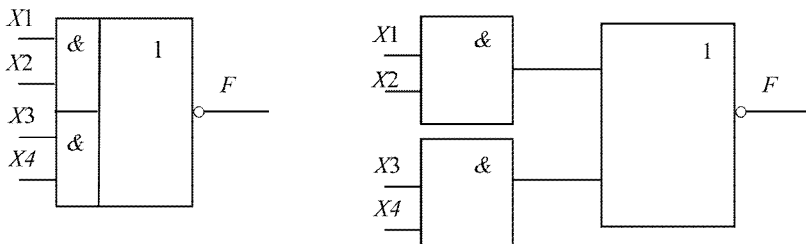


Рис. 4.23. Условное обозначение и функциональный эквивалент элемента «2И–ИЛИ–НЕ»

Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры логики.

Аксиомы в случае одной переменной:

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1) $X+0=X$ | 6) $X \cdot 0=0$ |
| 2) $X+1=1$ | 7) $X \cdot 1=X$ |
| 3) $X+X=X$ | 8) $X \cdot X=X$ |
| 4) $X+\overline{X}=1$ | 9) $X \cdot \overline{X}=0$ |
| 5) $\overline{(\overline{X})}=X$ | 10) $\overline{(\overline{\overline{X}})}=X$ |

Основные законы

Законы коммутативности	$X1+X2 = X2+X1$ $X1 \cdot X2 = X2 \cdot X1$
Законы ассоциативности	$X1+X2+X3 = X1+(X2+X3)$ $X1 \cdot X2 \cdot X3 = X1 (X2 \cdot X3)$
Законы дистрибутивности	$X1 (X2+X3) = (X1 \cdot X2) + (X1 \cdot X3)$ $X1+(X2 \cdot X3) = (X1 + X2) (X1 + X3)$

Законы дуальности (теоремы де Моргана)	$\overline{X_1 + X_2} = \overline{X_1} \times \overline{X_2}$ $\overline{X_1 \times X_2} = \overline{X_1} + \overline{X_2}$
Законы поглощения	$X_1 + X_1 \times X_2 = X_1$ $X_1 (X_1 + X_2) = X_1$

Вопросы для самоконтроля

1. Условные обозначения логических элементов и правила выполнения ими логических операций.
2. Схемная реализация логического элемента И.
3. Схемная реализация логического элемента ИЛИ
4. Схемная реализация логического элемента И-НЕ.
5. Схемная реализация логического элемента ИЛИ-НЕ.

4.3. Триггеры

Триггером называют устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями, способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала. Триггер относится к базовым элементам цифровой техники.

Триггеры классифицируются по следующим признакам:

- 1) по функциональному признаку:
 - а) *RS*-типа – триггеры с двумя установочными входами;
 - б) *D* -типа – триггеры задержки с одним входом;
 - в) *T* -типа – триггеры с одним счетным входом;
 - г) *JK*- типа – универсальные триггеры с несколькими входами.
- 2) по способу управления:
 - а) асинхронные;
 - б) тактируемые (синхронные).

В асинхронных триггерах переключение из одного состояния в другое осуществляется непосредственно с поступлением сигнала на информационный вход [1, 13, 14].

В синхронных (тактируемых) триггерах помимо информационных входов имеется вход тактовых импульсов. И переключение производится только при наличии разрешающего, тактирующего импульса.

R-S-триггер

Асинхронный RS-триггер выполняется на логических элементах «ИЛИ-НЕ» или «И-НЕ».

Схема асинхронного RS -триггера (рис. 4.24) содержит два элемента ИЛИ-НЕ, имеет два входа. При этом, S -вход называется установочным (set – устанавливать), устанавливает триггер в состояние логической «1»; а R -вход – вход сброса (reset – вновь устанавливать), переводит триггер в исходное состояние логического «0», и два выхода Q – прямой, $\bar{Q}$ – инверсный. В случае, когда на входах сигналы равны «0» ($R = 0, S = 0$), а на прямом выходе Q сигнал равен «1», то на инверсном выходе $\bar{Q} = 0$. То есть на прямом выходе состояние $Q = 1$ сохраняется.

При $R = 0, S = 0$ возможно и второе устойчивое состояние, при котором $Q = 0, \bar{Q} = 1$. То есть при $R = 0, S = 0$, триггер находится в состоянии хранения информации (1-го или 2-го устойчивого состояния).

При $R = 0, S = 1$, триггер оказывается в первом устойчивом состоянии ($Q = 1, \bar{Q} = 0$), а при $R = 1, S = 0$ – во втором устойчивом состоянии ($Q = 0, \bar{Q} = 1$).

Комбинация $R = 1, S = 1$ запрещена, т.е. при $S = 1$ триггер устанавливается в состояние «1», а при $R = 1$ – сбрасывается в состояние «0» (см. таблицу переходов).

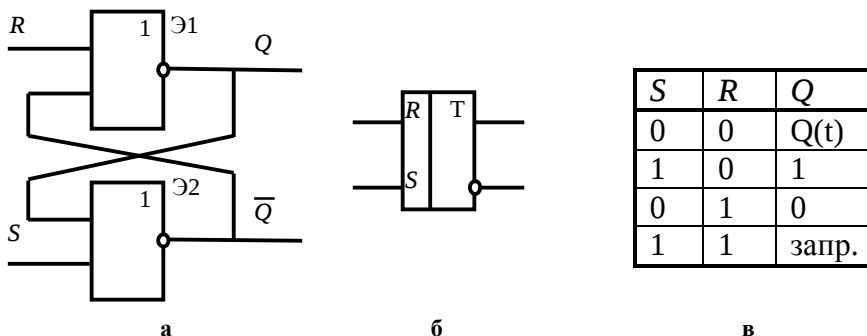


Рис. 4.24. Схема асинхронного RS -триггера на элементах «ИЛИ-НЕ» (а), его условное обозначение (б) и таблица переходов (в)

Аналогичным образом работает RS -триггер на элементах И-НЕ (рис. 4.25), с той разницей, что он должен иметь инверсные входы, т.е. устанавливаться в состояние «1» при $S = 0$ и сбрасываться в состояние «0» при $R = 0$. Запрещенная комбинация – при $R = 0, S = 0$.

На основе асинхронного RS -триггера строится любой, сколь угодно сложный, триггер: к асинхронному RS -триггеру добавляется своя особенная комбинационная схема управления этим триггером.

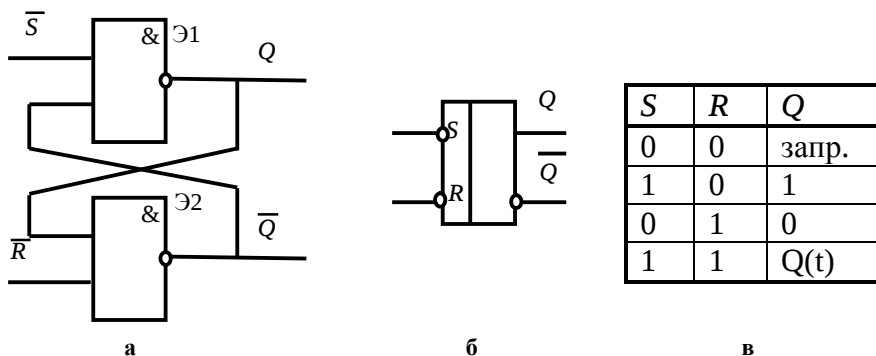


Рис. 4.25. Схема асинхронного RS-триггера на элементах И-НЕ (а), его условное обозначение (б) и таблица переходов (в)

Синхронный RS-триггер на элементах «И-НЕ» показан на рисунке 4.26. Синхронный RS-триггер состоит из схемы асинхронного RS-триггера, на входах которого установлены 2 управляющих элемента «И-НЕ» (Ξ_3, Ξ_4).

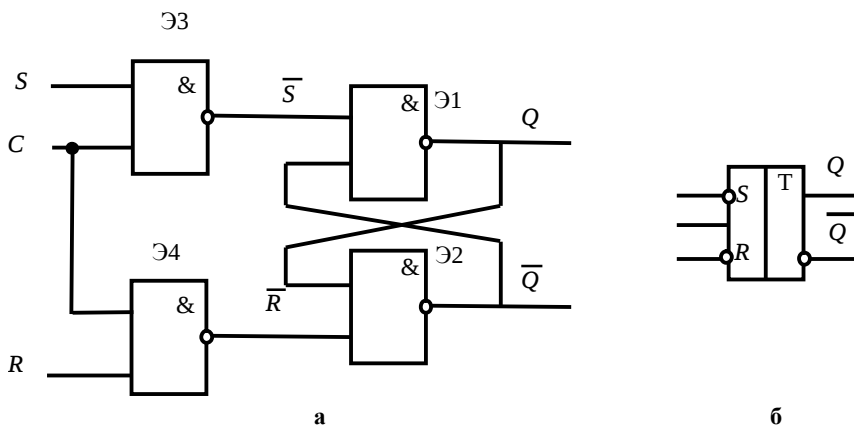


Рис. 4.26. Схема синхронного RS-триггера на элементах И-НЕ (а) и его условное обозначение (б)

Переключение подобного триггера происходит только при наличии разрешающего сигнала, подаваемого на вход C ($C = 1$). Такой триггер имеет статическое управление, т. е. осуществляет прием информации в течение всего интервала времени, пока $C = 1$.

Следует отметить следующие комбинации входных сигналов:

- 1) при $R = S = C = 0$ – состояние триггера сохраняется;
- 2) при $S = 1, R = C = 0$ – состояние триггера сохраняется;
- 3) при $S = 1, R = 0, C = 1$ – на выходе $Q = 1$;
- 4) при $S = 0, R = 1, C = 1$ – на выходе $Q = 0$.

Комбинация $S = R = C = 1$ должна быть исключена, так как на выходе элементов Э₃, Э₄ одновременно присутствовал бы «0», что запрещено для асинхронного триггера.

Д-триггеры

D-триггеры (delay – задержка) используют для приема информации по одному входу.

Схема получается из схемы асинхронного *RS*-триггера (в данном случае на элементах «И-НЕ») (рис. 4.27).

Работает триггер следующим образом: *D*-триггер переходит в состояние «1», т. е. на выходе $Q = 1$, если в момент прихода синхронизирующего сигнала $C = 1$, на его информационном входе $D = 1$. В этом состоянии триггер остается и после окончания сигнала на входе D , которое длится до прихода очередного синхронизирующего сигнала, возвращающего триггер в состояние «0».

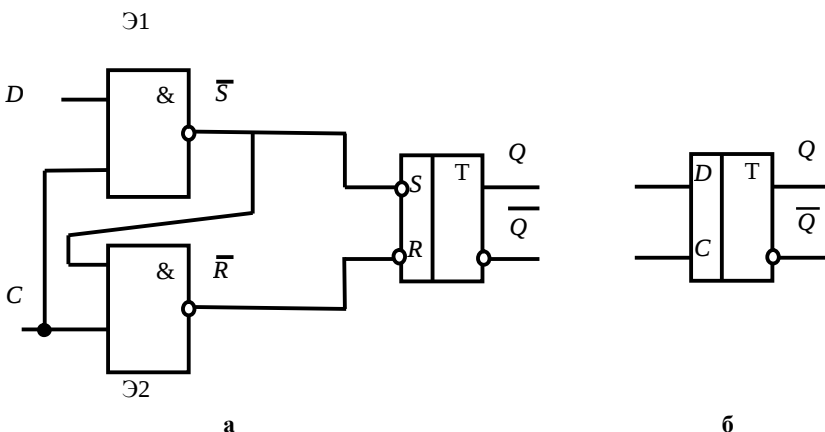


Рис. 4.27. Схема синхронного *D*-триггера (а) и его условное обозначение (б)

Это видно на временных диаграммах (рис. 4.28).

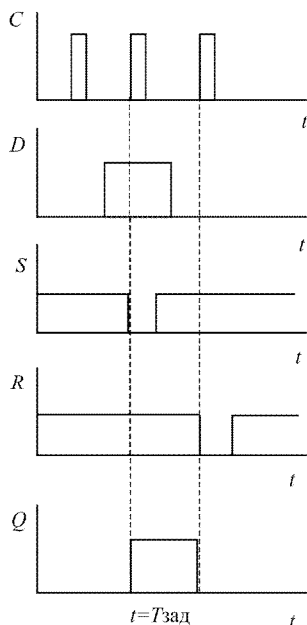


Рис. 4.28. Временные диаграммы синхронного D -триггера

При $D = 1$, $C = 1$ на выходе $\bar{S}$ элемента $\mathcal{E}_1$ сигнал «0» ($\bar{S} = 0$), на выходе $\bar{R}$ элемента $\mathcal{E}_2$ сигнал «1» ($\bar{R} = 1$). Так как RS -триггер имеет инверсные входы, то при $\bar{S} = 0$, $\bar{R} = 1$ он переходит в состояние «1» ($Q = 1$) и остается в этом состоянии до тех пор, пока при $D = 0$ не придет сигнал $C = 1$.

Тогда $\bar{S} = 1$, $\bar{R} = 0$ и триггер возвращается в состояние «0» ($C = 0$). При $D = 0$, $\bar{S} = 1$ и независимо от C на выходе $Q = 0$. Таким образом, D -триггер «задерживает» поступившую на его вход информацию на время, равное периоду синхронизирующих сигналов.

Т-триггер

T-триггер (tumble – опрокидываться), или счетный триггер, имеет один информационный вход и переходит в противоположное состояние в результате воздействия на его вход каждого очередного сигнала. Название «счетный» связано с широким применением T -триггеров в счетчиках импульсов.

T -триггеры бывают одноступенчатые и двухступенчатые; а также синхронные и асинхронные. Одноступенчатый T -триггер может быть реализован на базе D -триггера путем введения обратных связей (рис. 4.29).

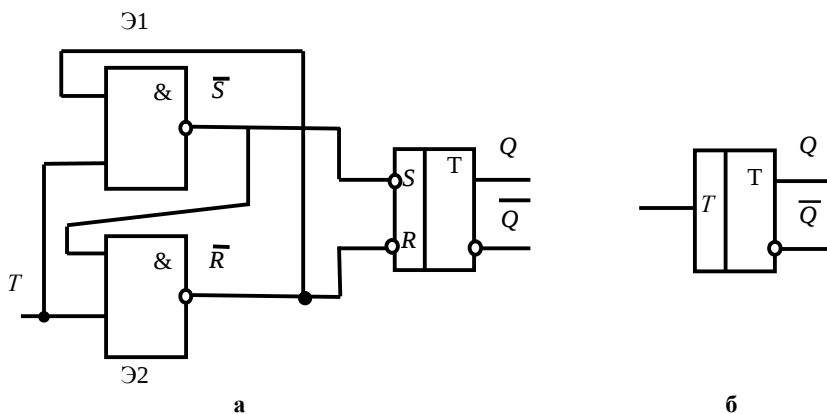


Рис. 4.29. Схема одноступенчатого T -триггера (а) и его условное изображение (б)

Состояние такого триггера меняется при каждом изменении сигнала на T -входе от «0» к «1» (рис. 4.30).

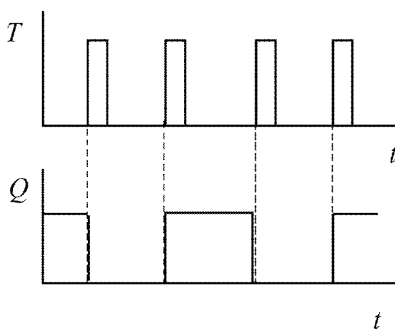


Рис. 4.30. Временные диаграммы одноступенчатого T -триггера

Двухступенчатые триггеры T -типа выполняются путем введения обратных связей на базе двух последовательно соединенных синхронных или асинхронных RS -триггеров, один из которых называют основным или ведущим; другой – вспомогательным или ведомым (рис. 4.31).

В таком асинхронном T -триггере вход синхронизации C преобразуется в счетный вход T . Состояние такого T -триггера меняется на противоположное при каждом изменении сигнала на T -входе от «1» к «0».

Временные диаграммы показаны на рисунке 4.32.

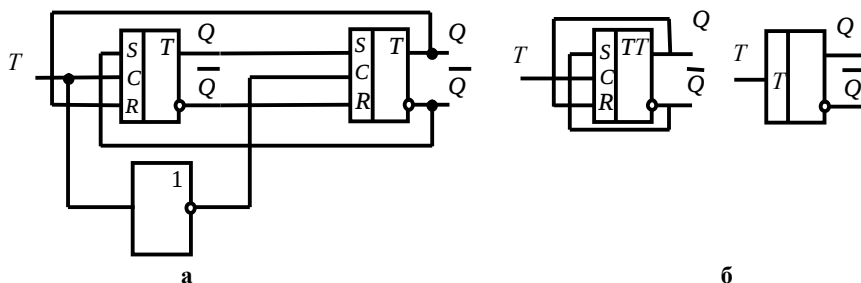


Рис. 4.31. Схема (а) и условное графическое изображение (б) асинхронного двухступенчатого T -триггера

В данном случае состояние триггера на выходе Q меняется по заднему фронту каждого импульса на T -входе, т. е. при изменении сигнала от «1» к «0». Объясняется это тем, что в момент начала импульса информация записывается в основной триггер, а после его окончания передается во вспомогательный.

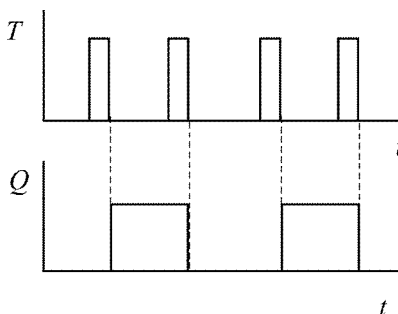


Рис. 4.32. Временные диаграммы двухступенчатого T -триггера

JK-триггер

JK -триггер может быть построен на основе двухступенчатого T -триггера путем использования элементов И-НЕ на входных цепях ведущего триггера (рис. 4.33).

Вход J соответствует входу S , а вход K – входу R , C – синхронизирующий вход. Поэтому на базе JK -триггеров реализуют синхронный RS - триггер, у которого комбинация $R = S = 1$, запрещенная для обычного RS - триггера, является разрешающей для переключения при $C = 1$.

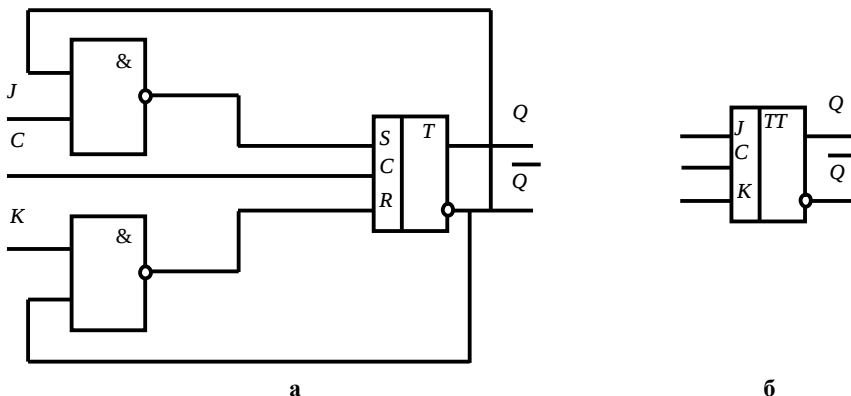


Рис. 4.33. Схема JK - триггера (а) и его условное обозначение (б)

При $J = K = 1$, JK -триггер изменяет свое состояние на противоположное в момент окончания каждого синхронизирующего сигнала, т. е. реализует функции T -триггера. Поэтому на базе JK -триггера легко реализуется синхронный T -триггер путем объединения входов и использования их в качестве входа T (рис. 4.34, а). Добавляя инвертор на входе JK -триггера, получают D -триггер (рис. 4.34, б).

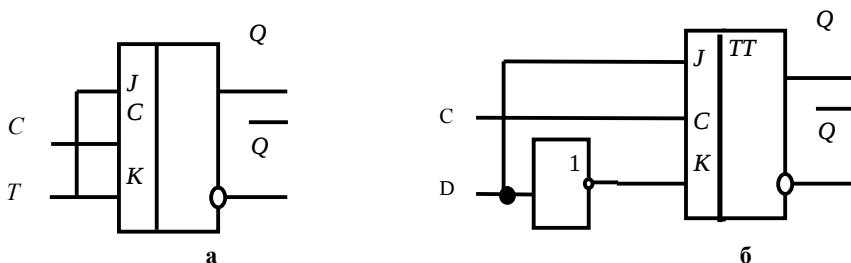


Рис. 4.34. Схемы T -триггера (а) и D -триггера (б) на основе JK -триггера

Все типы триггеров, реализуемые на основе JK -триггера, дают задержку в появлении выходных сигналов, равную длительности синхронизирующего сигнала. Временные диаграммы JK -триггера показаны на рисунке 4.35.

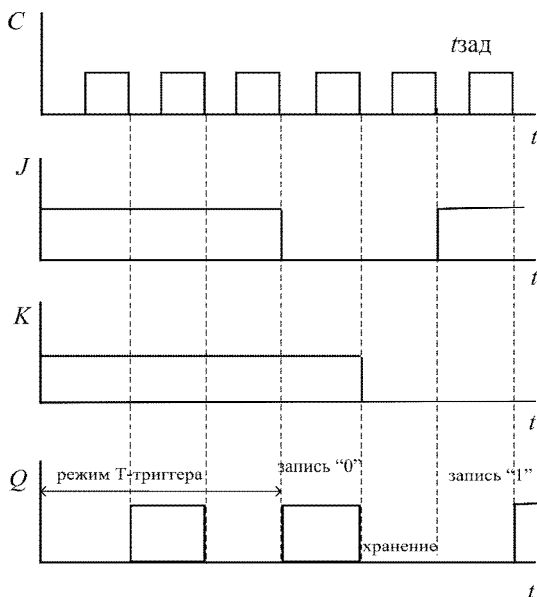


Рис. 4.35. Временные диаграммы JK -триггера

Примером выполнения триггеров на ИМС являются K155TB1, KM155TB1, KP1533TM2 и др.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию триггеров.
2. Назовите применение различных типов триггеров.
3. Объясните работу асинхронного RS -триггера на элементах «И-НЕ». Приведите таблицу переходов.
4. Объясните работу асинхронного RS -триггера на элементах «ИЛИ-НЕ». Приведите таблицу переходов.
5. Для чего были созданы двухступенчатые синхронные RS -триггеры? Проанализируйте их работу.
6. Сравните одноступенчатый и двухступенчатый асинхронные T -триггеры.
7. Назовите отличия D -триггера и асинхронного RS -триггера на элементах «И-НЕ».
8. Почему JK -триггер называют универсальным триггером? Приведите примеры его использования.

4.4. Цифровые логические схемы

Комбинационные схемы

Комбинационными называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных сигналов в этот же момент времени. Используются в информационно-измерительных системах, системах автоматического управления, устройствах промышленной автоматики и т. п. К комбинационным схемам относятся следующие устройства: дешифраторы и шифраторы, мультиплексоры и демультиплексоры, сумматоры.

Дешифратором (декодером) называют устройство, предназначенное для распознавания различных кодовых комбинаций (или слов). В дешифраторе каждой комбинации сигналов на входе соответствует сигнал только на одном из его выходов. В микропроцессорах дешифраторы выполняют расшифровку кодов команд, адресов ячеек памяти, осуществляют коммутацию цепей.

Логическая схема дешифратора на два входа приведена на рисунке 4.36, а.

Работа схемы описывается таблицей истинности (табл. 3), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = \overline{X_1} \times \overline{X_0}; Y_1 = \overline{X_1} \times X_0; Y_2 = X_1 \times \overline{X_0}; Y_3 = X_1 \times X_0$$

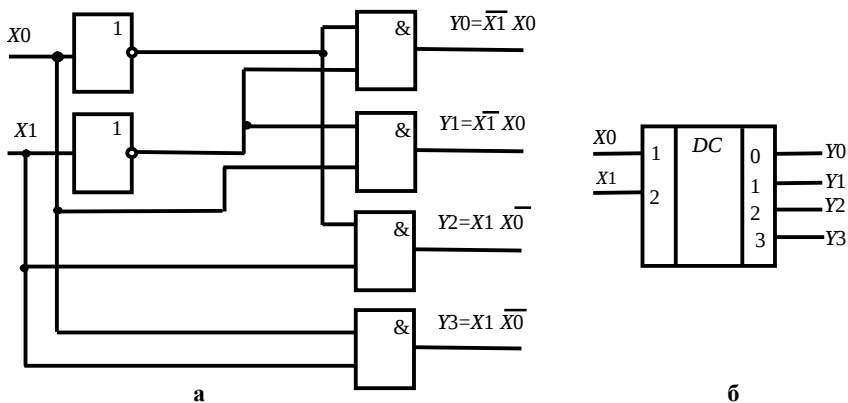


Рис. 4.36. Схема дешифратора (а) и его условное обозначение (б)

Таблица истинности дешифратора

Входные сигналы		Выходные сигналы			
X ₁	X ₀	Y ₀	Y ₁	Y ₂	Y ₃
0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Таким образом, в зависимости от комбинации входных сигналов (т. е. двоичного кода) единичный сигнал будет появляться только на одном из выходов дешифратора. Например, если комбинация входных сигналов 10, то единичный сигнал будет на выходе Y₂, что соответствует цифре 2 в десятичной системе счисления и т. д.

Дешифраторы выпускаются в виде ИМС различных серий в зависимости от назначения, например, К555 ИДЗ.

Шифратор (кодер) – комбинационная схема, преобразующая однопозиционный код в двоичный позиционный код. Примером является шифратор клавиатуры для ввода в цифровое устройство кода в двоичной системе счисления. При не нажатых клавишах на всех входах шифратора – логический «0», а нажатая клавиша подает на соответствующий вход логическую «1». Совокупность сигналов на входах образует код в двоичной системе, соответствующий нажатой клавише.

Логическая схема шифратора на два выхода приведена на рисунке 4.37, а, условное графическое изображение приведено на рис. 4.37, б.

Работа схемы описывается таблицей истинности (табл. 4), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = X_1 + X_3;$$

$$Y_1 = X_2 + X_3.$$

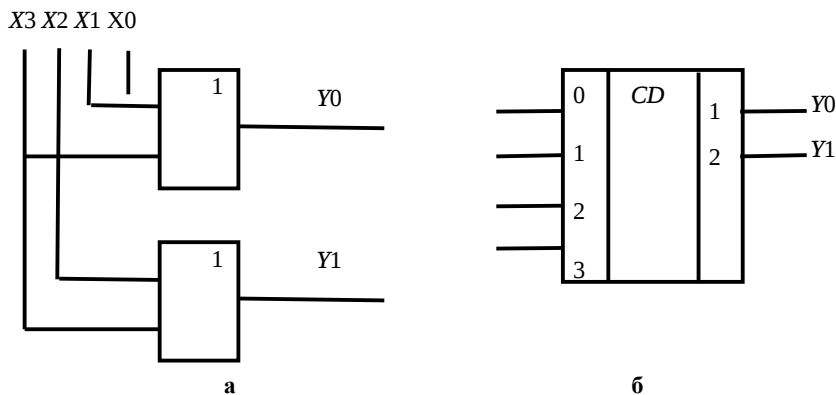


Рис. 4.37. Схема шифратора (а) и его условное обозначение (б)

Таким образом, при подаче на вход, например, сигнала X2 («1» на входе X2) на выходе шифратора получаем сигналы 10 в двоичной системе, что соответствует числу 2 в десятичной системе счисления.

Таблица 4

Таблица истинности шифратора

Входные сигналы				Выходные сигналы	
X3	X2	X1	X0	Y ₁	Y ₀
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1

Очевидно, что в данном шифраторе сигнал, подаваемый на вход X0, не используется. Примером ИС шифратора может служить ИС K555 ИВЗ.

Мультиплексор – операционный узел, осуществляющий микрооперацию передачи сигнала с одного из входов на один выход, т. е. используется для последовательного опроса логических состояний большого числа переменных и передачи их на один выход.

Схема мультиплексора с двумя информационными входами (X_0, X_1) и управляющим (или адресным) входом a показана на рисунке 4.38.

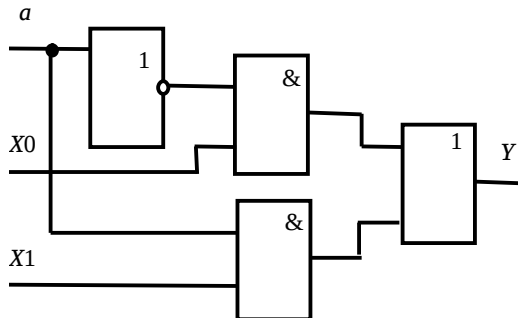


Рис. 4.38. Схема мультиплексора с двумя информационными входами

При сигнале на адресном входе $a = 1$ на выход передается значение X_1 , а при сигнале $a = 0$ – значение X_0 .

Мультиплексор на 4 входа (X_0 - X_3) имеет 2 адресных входа a_0 и a_1 (рис. 4.39). Если сигнал $a_0 = 1$, то передается значение X_1, X_3 ; если сигнал $a_0 = 0$, то X_0, X_2 ; если $a_1 = 1$, то X_2, X_3 ; если $a_1 = 0$, то X_0, X_1 .

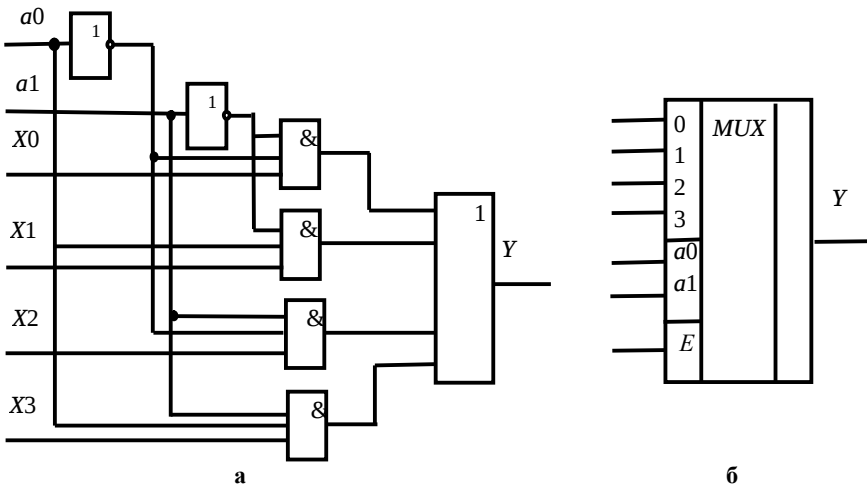


Рис. 4.39. Схема мультиплексора на 4 входа (а) и его условное обозначение (б)

Из схемы видно, что сигнал на выходе y будет складываться из 4-х слагаемых: $Y = \overline{a_1} \times \overline{a_0} \times X_0 + \overline{a_1} \times a_0 \times X_1 + a_1 \times \overline{a_0} \times X_2 + a_1 \times a_0 \times X_3$

Например, если $a_1 = 1$, $a_0 = 0$, то

$Y = 0 \times 1 \times X_0 + 0 \times 0 \times X_1 + 1 \times 1 \times X_2 + 1 \times 0 \times X_3$, т. е. адрес входа мультимплексора $A = (a_1, a_0) = 10_2 = 2_{10}$, т. е. опрашивается 2 вход.

Мультимплексоры выпускаются в виде ИС, например, ИС К555 КР2, КР1533КР2.

Демультимплексор (селектор) – операционный узел, в котором сигналы с одного информационного входа распределяются в желаемой последовательности по нескольким выходам. Схема демультимплексора на четыре выхода показана на рисунке 4.40, а, условное обозначение – на рисунке 4.40, б.

Функцию демультимплексора может выполнять стробируемый дешифратор, в котором информационный сигнал X подается на стробирующий вход C , а остальные входы используются как адресные.

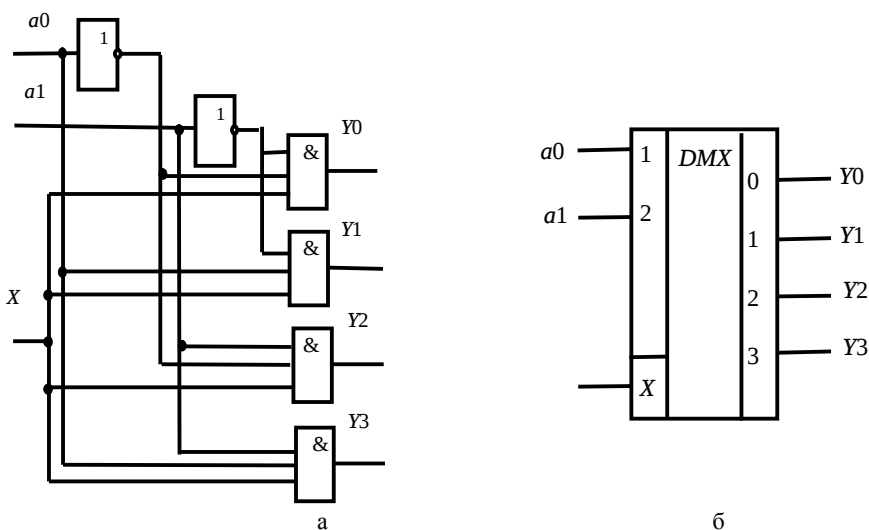


Рис. 4.40. Схема демультимплексора (а) и его условное обозначение (б)

Сумматор – операционный узел, выполняющий арифметическое суммирование кодов чисел. Сумматоры входят в состав арифметико-логического устройства (АЛУ) ЭВМ.

Классификация сумматоров:

1. По системе кодирования:

- двоичные;
- двоично-десятичные;

- десятичные и др.
- 2. По способу организации суммирования:
 - комбинационные (результат суммирования не запоминается);
 - накапливающие (результат суммирования запоминается).
- 3. По способу выполнения операций:
 - последовательные;
 - параллельные;
 - параллельно-последовательные.

Простейшим сумматором является одnorазрядный двоичный сумматор, или *полусумматор*. Он предназначен для сложения двоичных цифр, в результате чего образуется их сумма и осуществляется перенос в соответствии с правилами двоичного сложения, имеет 2 входа (X , Y) и 2 выхода (S – сигнал суммы и C – сигнал переноса в следующий разряд). Схема на логических элементах и условное графическое изображение полусумматора – на рисунке 4.41.

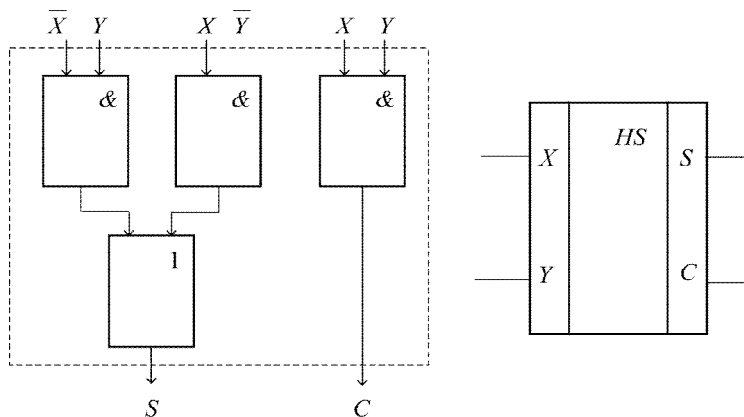


Рис. 4.41. Схема полусумматора на логических элементах (а) и его условное обозначение (б)

Если только на одном из входов сигнал равен 1, то выходной сигнал на линии выхода $S = 1$. Если оба входных сигнала равны 1, то выходной сигнал на выходе $S = 0$, а на выходе C (перенос) сигнал равен 1. Для всех остальных комбинаций входных сигналов перенос $C = 0$. Логические соотношения для этой схемы будут таковы:

$$S = \bar{X}Y + X\bar{Y}; C = XY.$$

Комбинации входных сигналов полусумматора X , Y и соответствующие им выходные сигналы S и C показаны в таблице 5.

Таблица 5

Входные сигналы полусумматора X , Y и выходные сигналы S , C

Вход		Выход	
X	Y	S	C
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

В таком одноразрядном сумматоре не учитывается перенос из младшего разряда. Полный сумматор используется при сложении более двух двоичных цифр. В таком сумматоре три входа: два входа для первого и второго слагаемых, третий вход – для сигнала переноса из младшего разряда.

Рассмотрим пример сложения двух двоичных чисел 1011 и 1110:

+1011		+1011	
1110		1110	
11001	-сумма	0101	-частичная сумма
		1 1	-разряды переноса
		11001	-полная сумма

Цифры переноса в каждом столбце должны быть учтены в процессе сложения.

Таким образом, полный сумматор (рис. 4.42) имеет 3 входа и 2 выхода: выход S – для выходного значения поразрядной суммы и выход C_0 – для выходного сигнала переноса, который суммируется в следующем разряде.

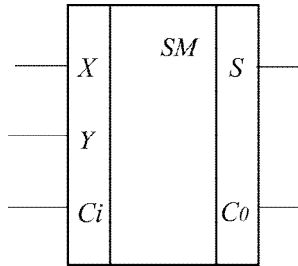


Рис. 4.42. Условное обозначение сумматора

Логические соотношения для сумматора будут следующими:

$$S = \overline{X}\overline{Y}C_i + \overline{X}YC_i + X\overline{Y}C_i + XYC_i,$$

$$C_0 = XC_i + XY + YC_i.$$

Рассмотрим работу четырехразрядного параллельного двоичного сумматора, схема которого представлена на рисунке 4.43.

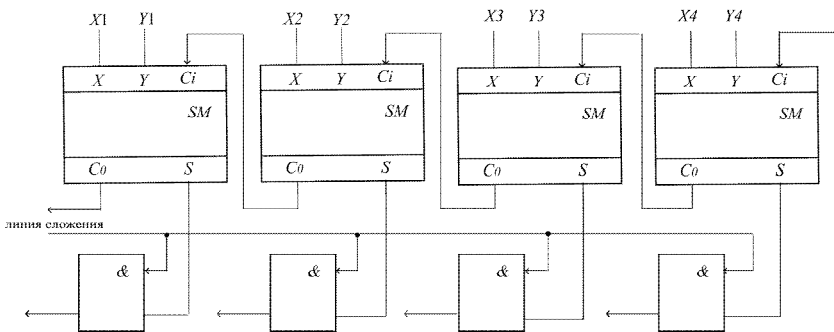


Рис. 4.43. Схема четырехразрядного параллельного двоичного сумматора

Например, входы для первого слагаемого $X_1...X_4$, для второго $Y_1...Y_4$. Пусть первое число – 0111, а второе – 0011. Их сумма 1010, т. е. $S_1 = 1$, $S_2 = 0$, $S_3 = 1$, $S_4 = 0$.

Так как X_4 и Y_4 – младшие разряды, то перенос из предыдущего разряда в них не поступает. $X_4 = 1$ и $Y_4 = 1$, $S = 0$, при этом возникает перенос, который суммируется в сумматоре вместе с разрядами X_3 и Y_3 . Так как $X_3 = 1$ и $Y_3 = 1$ и $C_i = 1$, то $S_3 = 1$, на линии переноса также появится единица.

Так как $X_2 = 1$, $Y_2 = 0$, $C_i = 1$, то $S_2 = 0$, перенос в следующий разряд будет = 1. Так как $X_1 = 0$, $Y_1 = 0$, $C_i = 1$, то $S_1 = 1$, перенос будет = 0.

Сумматоры выпускаются в виде ИМС, например, К561ИМ1 – сумматор на 4 разряда.

Счетчики

Цифровым счетчиком импульсов называют устройство, реализующее счет числа входных импульсов и фиксирующее это число в каком-либо виде. Счетчики применяются для подсчета шагов программы, циклов, построения распределителей импульсов и т. д.

Классификация счетчиков:

1) По целевому назначению:

- а) простые: суммирующие и вычитающие;
- б) реверсивные;

2) По способу организации цепей переноса информации:

- а) с последовательным переносом;
- б) со сквозным;
- в) с групповым;

3) По способу переключения триггеров:

- а) асинхронные;
- б) синхронные.

Суммирующий счетчик предназначен для выполнения счета в прямом направлении, т. е. для сложения. Вычитающие счетчики служат для осуществления счета в обратном направлении, т. е. для вычитания. Таким образом, каждый вновь поступающий на вход импульс в суммирующем счетчике увеличивает его показание на единицу, а в вычитающем – уменьшает. Реверсивные счетчики предназначены для выполнения счета, как в прямом, так и в обратном направлении, т. е. могут работать и в режиме сложения, и в режиме вычитания.

В асинхронных счетчиках переход каждого триггера (разряда) из одного состояния в противоположное происходит сразу после изменения сигнала на входе. В синхронных счетчиках для переключения триггеров необходимо наличие синхронизирующего импульса.

Основой для построения счетчиков являются асинхронные или синхронные Т-триггеры, поэтому счет импульсов ведется в двоичной системе исчисления. Простейшая схема асинхронного суммирующего двоичного трехразрядного счетчика показана на рисунке 4.44. Счетчик состоит из трех последовательно соединенных Т-триггеров, имеющих вход R для установки в состояние «0».

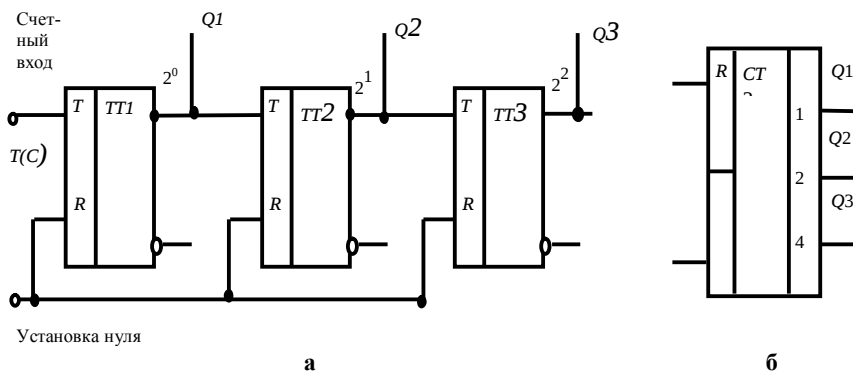


Рис. 4.44. Схема асинхронного суммирующего двоичного трехразрядного счетчика (а) и его условное обозначение (б)

Счетные импульсы подаются на счетный T -вход первого триггера. Счетные входы последующих триггеров связаны непосредственно с прямыми выходами предыдущих триггеров.

Работу схемы можно рассмотреть с использованием временных диаграмм (рис. 4.45). В исходном положении все триггеры находятся в положении «0». По окончании первого входного импульса триггер $TT1$ перейдет в состояние «1», т. е. $Q1 = 1$, второй и третий триггеры останутся в состоянии «0», т. е. $Q2 = 0$, $Q3 = 0$; по окончании второго импульса $TT1$ переключится в «0», т. е. первый разряд счетчика становится равным «0», $Q1 = 0$, а второй триггер $TT2$, т. е. второй разряд, переключается в состояние «1», $Q2 = 1$, третий триггер останется в состоянии «0», $Q3 = 0$.

В счетчике записывается число 010 и т. д. (после 8-го входного импульса все триггеры переходят в состояние «0» и счет повторяется). Значения состояний триггеров представим в виде таблицы переходов счетчика. Из таблицы 6 видно, что состояние триггеров отражает число поступивших на вход импульсов в двоичной системе.

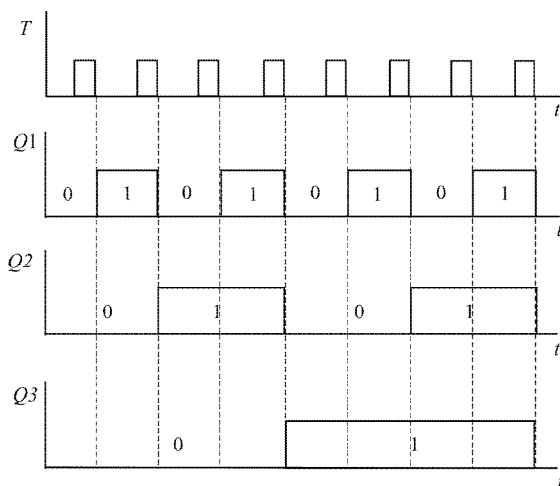


Рис. 4.45. Временные диаграммы асинхронного суммирующего двоичного трехразрядного счетчика

Общее число возможных состояний N (модуль счета) определяют числом триггеров n : $N = 2^n$. В данном случае $N = 8$.

Таблица 6

Таблица переходов суммирующего двоичного трехразрядного счетчика

№ входного импульса	Состояние триггера		
	Q3	Q2	Q1
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
8	0	0	0

Для построения вычитающего счетчика нужно соединить последовательно не прямые, а инверсные выходы триггеров. Такой счетчик работает следующим образом. Вначале все триггеры

устанавливают в состояние «1» (для данной схемы из трех триггеров это соответствует двоичному числу 111). Поступивший на вход счетчика импульс переводит триггер *ТТ1* в состояние «0», а состояние остальных триггеров не изменяется. Следовательно, в счетчике будет записано число 110. Следующий входной импульс уменьшает число еще на одну единицу и т. д.

Рассмотренный счетчик является счетчиком с последовательным переносом. Для увеличения быстродействия используются счетчики со сквозным переносом, при этом используются синхронные *Т*-триггеры. Разбивая триггеры на группы и организуя цепь формирования сигналов на счетных входах, строят счетчики с групповым переносом.

Для создания счетчика, работающего в другом коде, например, в десятичном, применяют обратные связи. Рассмотрим функциональную схему десятичного (или декадного) счетчика импульсов на четырех триггерах с принудительным счетом (рис. 4.45).

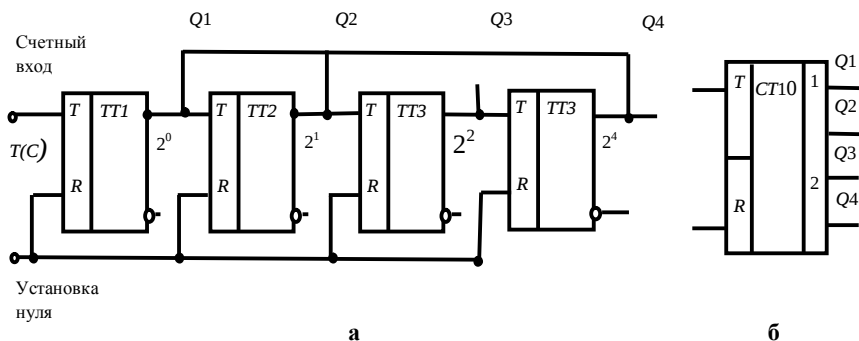


Рис. 4.46. Схема десятичного счетчика импульсов (а) и его условное обозначение (б)

До 8-го входного импульса счетчик работает как двоичный. С приходом восьмого импульса с выхода триггера *ТТ4* сигналы обратной связи поступают на входы *ТТ2*, *ТТ3* и переводит их из состояния «0» в состояние «1», что наглядно видно по таблице переходов двоично-десятичного счетчика (таблица 7). Девятый импульс переводит триггер *ТТ1* в состояние «1» и все триггеры оказываются в состоянии «1». Десятый импульс переводит все триггеры в состояние «0», и счет начинается снова. Используя обратные связи, можно построить счетчик, работающий в системе числения с любым основанием.

Таблица переходов двоично-десятичного счетчика

№ входного импульса	Состояние триггеров			
	Q4	Q3	Q2	Q1
7	0	1	1	1
8	1	0(1)	0(1)	0
	↓	↑	↑	
9	1	1	1	1
10	0	0	0	0

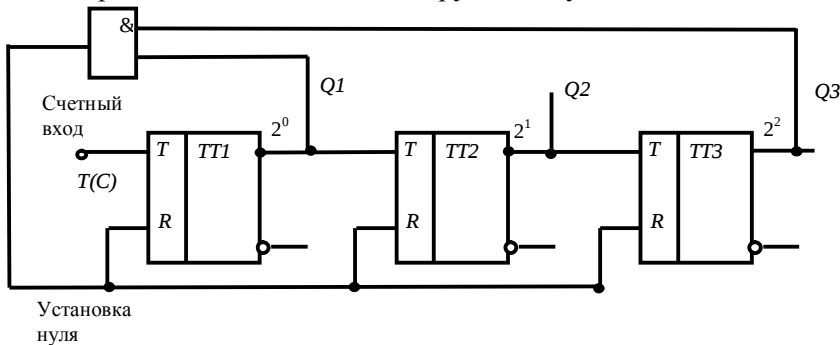
Построение последовательных счетчиков с произвольным коэффициентом счета осуществляется следующим образом.

При модуле счета $N^1 2^n$ счетчик должен состоять из n -триггеров, так чтобы $2^{n-1} < N < 2^n$. Тогда соответствующий двоичный счетчик будет иметь избыточные устойчивые состояния, которые надо устранить за счет внутренней связи между триггерами.

Пусть надо создать триггер с $N = 5$. Число триггеров должно быть не менее трех, т. е. при модуле счета $N = 5$ счетчик должен возвращаться в исходное (нулевое) состояние после пятого импульса, т. е. при $Q1 = 1, Q2 = 0, Q3 = 1$.

Исключить оставшиеся состояния можно с помощью комбинационной схемы, которая после набора $Q1 = 1; Q2 = 0; Q3 = 1$ подавала бы 1-й сигнал на R -входы триггеров и возвращала бы их в состояние $Q1 = Q2 = Q3 = 0$. Такая схема показана на рисунке 4.47.

После пятого импульса на входы логического элемента поступают высокие уровни с выходов $Q1$ и $Q3$. На его выходе появляется тоже высокий уровень, который подается на R -входы триггеров и перебрасывает их в исходное состояние. Таким же образом можно построить счетчики на любой другой модуль счета.

Рис. 4.47. Схема счетчика с модулем счета $N = 5$

Основные параметры счетчиков:

- 1) модуль счета или коэффициент пересчета N ;
- 2) быстроедействие счетчика;
- 3) $f_{\text{сч}}$ – частота счетных импульсов;
- 4) $t_{\text{уст}}$ – время установки счетчика.

Примерами цифровых счетчиков могут служить ИМС К155ИЕ2, К555ИЕ6, К561ИЕ14 и др.

Регистры

Регистрами называют устройства, предназначенные для приема, хранения, передачи и преобразования информации в виде двоичного числа или другой кодовой информации.

В зависимости от способа записи и считывания информации различают следующие типы регистров:

- 1) параллельные;
- 2) последовательные;
- 3) параллельно-последовательные.

Основные элементы регистра – двоичные ячейки, в качестве которых применяются триггеры. Число триггеров определяется длиной «слова», т. е. числом двоичных разрядов «слова».

Схема *параллельного n -разрядного регистра* показана на рис. 4.48. В параллельных регистрах запись двоичного числа, или «слова», осуществляется параллельным кодом, т. е. во все разряды регистра одновременно.

Информация в ячейки регистра записывается по команде «Ввод» (т. е. на входе «Ввод» должна быть «1»). Тогда сигналы на каждом из n - входов установят триггеры в соответствующие состояния. На входе регистра информация появится по команде «Вывод», а при ее отсутствии на выходах – нули. При считывании информация, записанная в регистре, сохраняется. Поэтому такие регистры называют регистрами памяти.

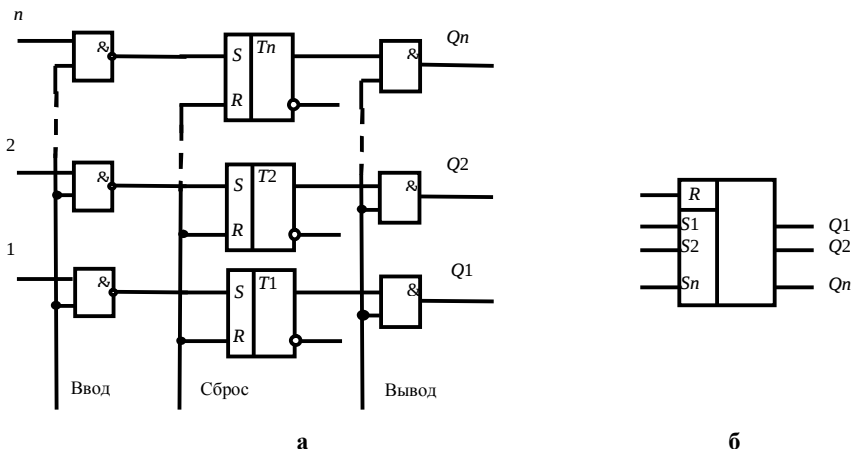


Рис. 4.48. Схема параллельного n -разрядного регистра (а) на RS-триггерах и его условное изображение (б)

Последовательные (сдвиговые) регистры состоят из последовательно соединенных двоичных ячеек памяти (триггеров), состояния которых передаются (или сдвигаются) на последующие ячейки под действием тактовых импульсов.

Структурная схема последовательного четырехразрядного регистра показана на рисунке 4.49. Перед записью информации регистр устанавливается в ноль. Для этого в отсутствии сигнала на входе подается серия тактовых импульсов с числом импульсов, равным количеству разрядов в регистре.

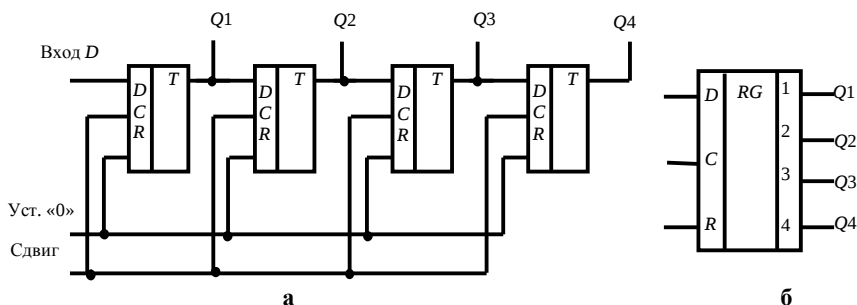


Рис. 4.49. Структурная схема последовательного регистра (а) и его условное обозначение (б)

При записи информации одновременно с поступлением кода числа подаются тактовые импульсы. Тактовыми импульсами осуществляется продвижение информации от младшего разряда регистра к старшему. В результате этого процесса после четвертого тактового импульса ячейки регистра принимают состояние, соответствующее коду входного четырехразрядного числа. Считывать информацию из сдвигающего регистра можно в последовательном коде, продвигая информацию через все разряды регистра к выходу, либо в параллельном коде одновременно с выходов разрядов, что видно на рисунке 4.50.

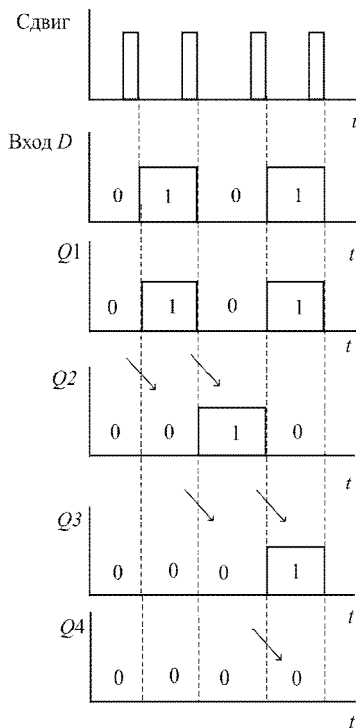


Рис. 4.50. Временные диаграммы работы сдвигового регистра

В *параллельно-последовательных* регистрах сочетаются свойства регистров последовательного и параллельного действия. В этой связи они могут быть использованы для преобразования последовательного кода в параллельный и обратно (рис. 4.51).

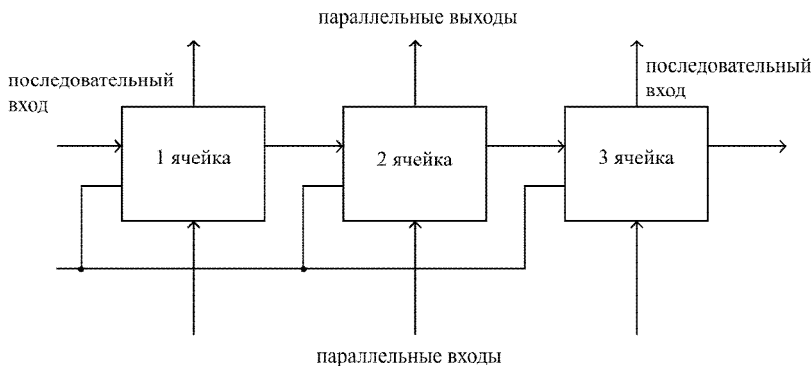


Рис. 4.51. Структурная схема параллельно-последовательного регистра

Примеры выполнения регистров на ИМС – К155ИР13, КР580ИР82 и др.

Вопросы для самоконтроля

1. Что собой представляет цифровой счетчик? Дайте классификацию, назовите области применения.
2. Что такое модуль счета и как он определяется?
3. Нарисуйте схему десятичного счетчика импульсов, объясните принцип ее построения и работу с использованием таблицы переходов.
4. Объясните принцип построения и работы параллельного трехразрядного регистра.
5. Объясните принцип построения и работы последовательного трехразрядного регистра.
6. Объясните принцип построения и работы дешифратора.
7. Объясните принцип построения и работы шифратора.
8. Объясните принцип построения и работы мультиплексора.
9. Объясните принцип построения и работы демультиплексора.
10. Объясните принцип работы сумматора.

4.5. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) – функциональный узел, однозначно преобразующий кодовые комбинации цифрового сигнала в значения аналогового сигнала.

Основой для нахождения однозначного соответствия может служить соотношение:

$$U_{\text{вых}} = E_{\text{оп}} (X_1 2^{-1} + X_2 2^{-2} + \dots + X_N 2^{-N}),$$

где $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе ЦАП;

$E_{\text{оп}}$ – опорное напряжение;

$X(X_1, X_2, \dots, X_N)$ – цифровой код; X_i принимают значение 0 или 1.

При определении E_0 каждому X_i на выходе устройства соответствует напряжение $U_{\text{вых}}$.

Принцип действия ЦАП заключается в преобразовании цифрового кода в сопротивление (проводимость) или напряжение. Под действием цифрового сигнала X_i (а это может быть «0» или «1») размыкается или замыкается ключ (рис. 4.52), т. е. подключается или отключается резистор (происходит деление опорного напряжения $E_{\text{оп}}$). Для преобразования многоразрядного кода в сопротивление или напряжение создаются многополюсные резисторные матрицы. При этом каждый разряд преобразуемого кода управляет определенным ключом, который в зависимости от логического значения разряда либо замыкается, подключая опорный источник питания к соответствующему полюсу резисторной цепи, либо остается разомкнутым.

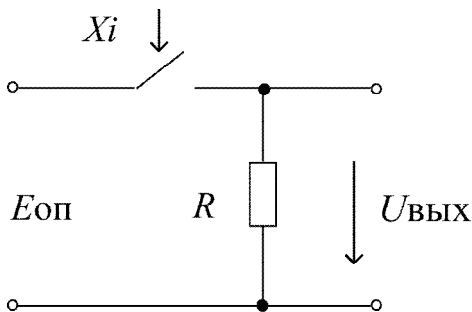


Рис. 4.52. Принцип действия ЦАП

Выходной сигнал получается в результате суммирования токов или напряжений на резисторе. Схема многополюсного ЦАП, в которой матрица резисторов подключена к входу операционного усилителя ключами, показана на рисунке 4.53.

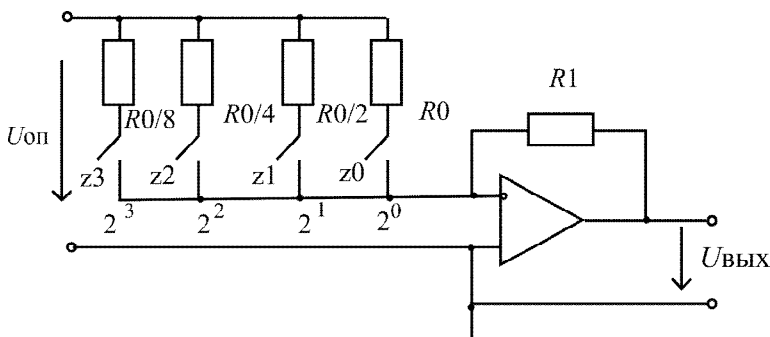


Рис. 4.53. Схема многополюсного ЦАП

Коэффициенты передачи $k = U_{\text{вых}} / U_{\text{оп}}$ по входам $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ равны соответственно:

$$k_0 = (R1/R0) z_0;$$

$$k_1 = (2R1/R0) z_1;$$

$$k_2 = (4R1/R0) z_2;$$

$$k_3 = (8R1/R0) z_3,$$

где z – числа, принимающие значения «0» или «1» в зависимости от положения соответствующих ключей.

Выходное напряжение ЦАП определяется суммой:

$$U_{\text{вых}} = - U_{\text{оп}} (k_0 + k_1 + k_2 + k_3) = - U_{\text{оп}} (R1/R0) (z_0 + 2z_1 + 4z_2 + 8z_3).$$

Недостатком такого ЦАП является большой диапазон изменения сопротивления взвешенных резисторов.

Поэтому в современных ЦАП применяются резисторные матрицы, в которых используются одинаковые или отличающиеся в 2...4 раза резисторы. Наиболее часто применяются матрицы R - $2R$ (рис. 4.54), составленные из резисторов всего двух номиналов R и $2R$, что делает изготовление матрицы очень технологичным и позволяет выполнять ее в интегральном исполнении вместе со всеми необходимыми активными элементами (электронными ключами и схемами их управления, суммирующими операционными усилителями и т. д.).

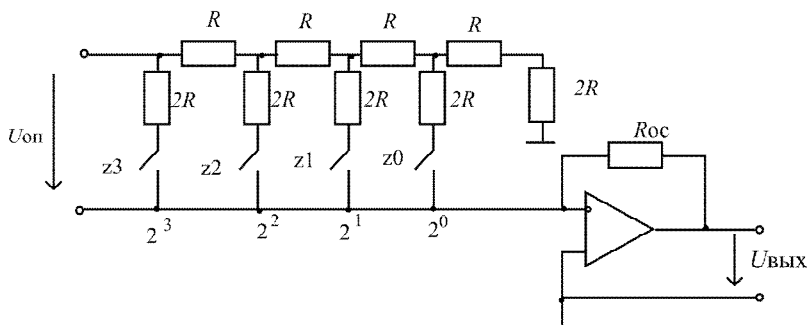


Рис. 4.54. Схема ЦАП на основе резисторной матрицы $R-2R$

Особенностью матрицы $R-2R$ является постоянство сопротивления в узлах: если цепочка резисторов $R-2R$ замкнута на резистор с сопротивлением $2R$ со стороны младшего разряда, то в любом ее узле (объединяющем два резистора R и один резистор $2R$) сопротивление слева и справа будет равно $2R$ (если ключи справа и слева замкнуты на «землю»). Суммарный ток будет строго пропорционален коду входного цифрового сигнала.

Матрицы резисторов изготавливаются в виде интегральных микросхем 572 и 594 серий.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) – решают задачу поиска однозначного эквивалента аналоговому сигналу цифрового кода, т. е. АЦП вырабатывает двоичные кодовые сигналы, представляющие периодические выборки аналогового сигнала.

В АЦП происходят следующие два процесса:

1. Деление (когда весь диапазон изменения входного сигнала разбивается делением на интервалы, которым присваиваются двоичные коды).
2. Кодирование (осуществляется путем сравнения входного сигнала со значениями выделенных интервалов, в результате чего входной сигнал заменяется цифровым машинным кодом).

Функциональная схема АЦП последовательного типа представлена на рисунке 4.55, где ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ДС - двоичный счетчик, ГТИ - генератор тактовых импульсов, устройство сравнения напряжений, построенное на ОУ и называемое компаратором [11, 13].

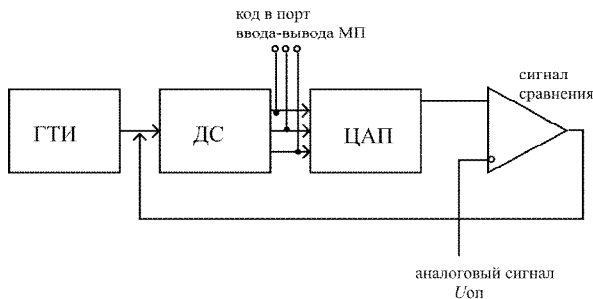


Рис. 4.55. Функциональная схема АЦП

Тактовые импульсы поступают на вход двоичного многоразрядного счетчика, с выхода которого информация поступает на вход ЦАП. Выходное напряжение ЦАП сравнивается в компараторе с входным аналоговым уровнем напряжения, и в тот момент, когда эти напряжения оказываются равными друг другу, снимается двоичный код, зафиксированный в счетчике.

Параллельные АЦП – самые быстродействующие, так как результат преобразования появляется сразу же после срабатывания компараторов и логических элементов, на которых выполнено кодирующее устройство. В лучших образцах параллельных 8–12-разрядных АЦП, используемых, например, в радиолокации, цифровом телевидении, видеотехнике, это время составляет сотые доли микросекунды, что позволяет производить до 10^8 преобразований в секунду и таким образом обрабатывать сигналы с частотами до нескольких десятков мегагерц.

Функциональная схема простейшего двухразрядного параллельного АЦП приведена на рисунке 4.56.

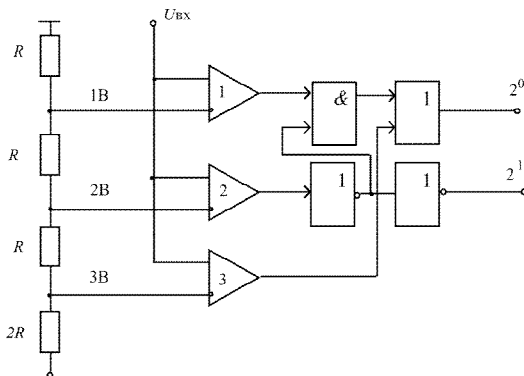


Рис. 4.56. Функциональная схема АЦП параллельного типа

На сигнальные неинвертирующие входы компараторов 1, 2, 3 (в качестве которых могут использоваться широкополосные операционные усилители) подается напряжение сигнала $0 < U_{\text{вх}} < 4 \text{ В}$, на инвертирующие входы – эталонные напряжения 1 В, 2 В, 3 В.

При отсутствии входного сигнала на выходе компараторов действуют отрицательные напряжения, условно принимаемые за уровень логического 0. Если уровень входного сигнала превышает 1 В, но не достигает 2 В, то первый компаратор срабатывает и на его выходе появляется положительное напряжение, отображающее логическую 1. При этом на выходе элемента «И» также появляется 1, так как на двух его входах действуют напряжения логической 1: одно подается с выхода первого компаратора, другое с выхода инвертора, подключенного к выходу второго компаратора. Вследствие этого на выходе элемента «ИЛИ» появится напряжение логической 1, отображающее младший значащий разряд (2^0) в выходном коде. На выходе 2^1 второго инвертора (старший значащий разряд 2^1) будет действовать 0, поскольку на его входе действует 1.

Если уровень входного сигнала превысит 2 В ($2 \text{ В} < U_{\text{вх}} < 3 \text{ В}$), то сработает второй компаратор и на его выходе появится напряжение логической 1, которое после двойного инвертирования будет действовать на выходе 2^1 . При этом на выходе 2^0 будет логический 0, поскольку элемент «И» на выходе первого компаратора закроется, так как на одном из его входов будет 1, а на другом – 0.

Когда напряжение входного сигнала превысит 3 В, сработает третий компаратор и на его выходе появится напряжение логической 1, которое, пройдя через элемент «ИЛИ», даст напряжение логической 1 на выходе 2^0 . Таким образом, если $U_{\text{вх}} = 0$, то на выходе действует код 00; если $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, то на выходе – код 01; при $U_{\text{вх}} = 2 \text{ В}$ имеем код 10, а при $U_{\text{вх}} = 3 \text{ В}$ на выходе – код 11.

Пример ИМС ЦАП – К572ПА1, а пример ИМС АЦП – К1107ПВ1.

Вопросы для самоконтроля

1. Принцип работы многополюсного ЦАП.
2. Принцип работы ЦАП на основе резисторной матрицы R-2R.
3. Принцип работы АЦП последовательного типа.
4. Принцип работы АЦП параллельного типа.
5. Сравните АЦП и ЦАП.

4.6. Арифметические и логические основы микропроцессорной техники

Основные понятия и определения

Микропроцессор (МП) представляет собой функционально законченное программно-управляемое устройство цифровой обработки данных, выполненное в виде одной или нескольких больших интегральных схем (БИС).

Микропроцессорный комплект (семейство, набор) (МПК) – совокупность МП и других микросхем, совместимых по конструктивно-технологическому исполнению и предназначенных для совместного применения при построении МП, микроЭВМ и микропроцессорных систем.

Микропроцессорное устройство (МПУ) – функционально и конструктивно законченное изделие, в состав которого входят микросхемы, включая микропроцессоры, предназначенное для обработки, передачи, преобразования информации или управления.

Микропроцессорная система (МПС) – любая вычислительная, контрольно-измерительная или управляющая система, построенная на базе МП. В составе МПС могут находиться другие микросхемы и радиокомпоненты.

МикроЭВМ представляет собой конструктивно завершенное вычислительное устройство, реализованное на базе микропроцессорного набора БИС и оформленное в виде автономного прибора со своим питанием, интерфейсом ввода-вывода и комплектом программного обеспечения.

Однокристалльная микроЭВМ – микроЭВМ, выполненная в виде одной интегральной схемы. Однокристалльные микроЭВМ широко используются для управления различной аппаратурой и оборудованием, например, в бытовых приборах.

Одноплатная микроЭВМ – микроЭВМ, выполненная в виде одной печатной платы и предназначенная для встраивания в различную аппаратуру. В отличие от однокристалльной ЭВМ, размещая на одной плате несколько микросхем, можно получить микроЭВМ с достаточно большими вычислительными ресурсами.

Микроконтроллер – однокристалльная микроЭВМ с небольшими вычислительными ресурсами и упрощенной системой команд, ориентированная на выполнение процедур логического управления

различным оборудованием (а не на производство вычислений). Особенностью микроконтроллеров является расширенная реализация периферийных средств на кристалле.

Алгоритм – набор предписаний, однозначно определяющих содержание и последовательность выполнения операций для решения определенной задачи.

Программа – набор инструкций, реализующих алгоритм. Программы могут быть написаны в машинных кодах, на языке ассемблер и на языках высокого уровня.

Микропрограммирование – представление машинной команды в виде последовательности микрокоманд.

Интерфейс – система шин, магистралей, вспомогательной аппаратуры и алгоритмов, реализованных на этом оборудовании, предназначенная для организации обмена информацией между МП, памятью, устройствами ввода-вывода и другими устройствами, входящими в состав МПС или микроЭВМ.

Кэш-память – особая высокоскоростная память процессора. КЭШ-память используется в качестве буфера для ускорения обмена данными между процессором и оперативной памятью, а также для хранения копий инструкций и данных, которые недавно использовались процессором. Значения из кэш-памяти извлекаются напрямую, без обращения к основной памяти.

В системах автоматического управления микропроцессорные устройства и микроЭВМ, как правило, встраиваются непосредственно в контур объектов и являются их частью. Поэтому они оснащаются памятью, устройствами ввода - вывода и программным обеспечением, необходимым для выполнения функций управления. Применение микропроцессорной техники привело к расширению возможностей, изменению состава и способов разработки, резкому уменьшению габаритов и стоимости систем автоматизации управления различными технологическими процессами (в том числе и в сельском хозяйстве).

Способы представления информации

Универсальным способом отображения информации при ее сборе, передаче, хранении и обработке является кодирование. Для представления числовой, буквенной, символьной, логической и других информации в микропроцессорных системах применяются двоичные позиционные коды, в которых используются только два символа (0 и 1). Двоичные коды в микропроцессорной технике реализуются

благодаря дискретному представлению электрических и других сигналов в виде импульсов или перепадов. Поэтому такую информацию называют цифровой, а соответствующие системы обработки дискретными или цифровыми.

Один разряд двоичного кода несет информацию в 1 бит. Бит определяет содержательность информации, единичный элемент которой может принимать лишь два различных равновероятных значения 0 или 1. Для хранения 1 бита информации требуется один элемент памяти, например, триггер любого типа. 1 байт = 8 бит – это восьми-разрядная двоичная информация, составляющая минимально адресуемый объем информации в большинстве вычислительных систем. Для удобства подсчета больших объемов двоичной информации вводят условные единицы 1 Кбайт = 1024 байт (2^{10}) и Мбайт – 1024 Кбайт. Например, 64 Кбайт = 64×1024 байт = 65 536 байт (2^{16}).

Последовательность двоичных символов определенной длины или сигналов, направляющих эти символы, образует «слово». В общем случае «слово» имеет переменную длину.

Число двоичных разрядов в слове зависит от технических возможностей МП. Количество битов в слове зависит от типа микропроцессора. Количеством битов в «слове» определяется, например, число разрядов приемных регистров, входящих в оперативную память микропроцессора. Кроме того, количество битов в «слове», предназначенное для передачи данных, равно числу проводников, составляющих тракт передачи команд и данных МП.

Пример двухбайтового слова 0100110011100111 8-разрядной микропроцессорной системы представлен на рисунке 4.57.

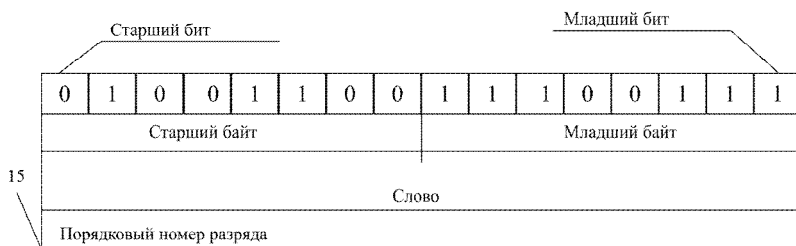


Рис. 4.57. Структура «слова»

Взаимосвязь различных систем счисления.

Любое число N_b , записанное в позиционной системе счисления, может быть представлено в виде степенного разложения:

$$N_b = K_N K_{N-1} \dots K_1 K_0 K_{-1} \dots K_{-M} = K_N b^N + K_{N-1} b^{N-1} + \dots + K_1 b^1 + K_0 b^0 + K_{-1} b^{-1} + \dots + K_{-M} b^{-M} = \sum K_i b^i$$

где b – основание системы счисления, в качестве которого может быть принято любое число;

K_i – цифры или символы числа ($0 \leq K \leq b-1$);

n, m – соответственно количество целых и дробных разрядов;

i – номер разряда.

Для записи числа в различных системах используются следующие цифры и символы: десятичной ($b = 10$) – 0, 1...9; двоичной ($b = 2$) – 0, 1; восьмеричной ($b = 8$) – 0, 1 ... 7; шестнадцатеричной ($b = 16$) – 0, 1 ... 9, А, В, С, D, Е, F. Как видно, в шестнадцатеричной системе счисления записи чисел кроме цифр десятичной системы используются буквы А, В, С, D, Е, F, соответствующие числам 10, 11, 12, 13, 14, 15.

Чтобы перейти из двоичной системы в десятичную, надо числа в строке двоичного числа сложить поразрядно, например, $11001 = 1 * 2^0 + 0 * 2^1 + 0 * 2^2 + 1 * 2^3 + 1 * 2^4 = 1 + 0 + 0 + 0 + 8 + 16 = 25$, т. е. двоичное число 11001 равно числу 25 в десятичной системе.

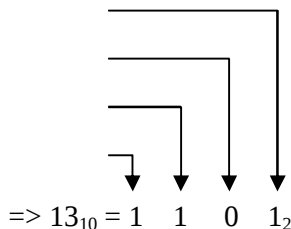
Чтобы перейти из десятичной системы в двоичную, необходимо десятичное число разделить на 2, остаток от деления при этом становится младшим разрядом результата. Далее результат деления снова делится на 2, остаток будет вторым разрядом результата. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в результате деления частное от деления станет равным нулю. Например:

$$6:2 = 3 \quad \text{остаток } 0$$

$$13:2 = 6 \quad \text{остаток } 1$$

$$3:2 = 1 \quad \text{остаток } 1$$

$$1:2 = 0 \quad \text{остаток } 1$$



Но т. к. двоичные числа содержат больше цифр, чем их десятичный эквивалент, то при записи двоичного числа легко ошибиться.

Чтобы этого избежать, используют более компактное представление чисел, и делают это в восьмеричной и шестнадцатеричной системах счисления, т. к. преобразование из десятичной системы в двоичную систему неудобно.

Чтобы перевести двоичное число в восьмеричную систему разбивают двоичное число на группы по 3 разряда, начиная справа. Каждая группа заменяется ее восьмеричным эквивалентом.

$$\begin{array}{ccc|c|c} 0 & 1 & 1 & & 1 & 1 & 0 & & 0 & 1 & 0 & & = 362_8 \\ \hline \underbrace{} & & \underbrace{} & & \underbrace{} & & & & & & & & \\ 3 & & 6 & & 2 & & & & & & & & \end{array}$$

Например:

Еще более компактным представлением двоичных чисел является их представление в шестнадцатеричной системе счисления.

Чтобы преобразовать двоичное число в шестнадцатеричную систему, это число делится на группы по 4 разряда, и каждая группа преобразуется в соответствующий символ. Чтобы произвести обратное преобразование, каждый символ заменяется четырьмя разрядами.

Информация, представленная в числовом варианте, представляется машинным кодом, т. е. машинным языком, понятным МП.

$$\begin{array}{ccc|c|c} 1 & 1 & 1 & 1 & & 0 & 1 & 1 & 0 & & = F6_{16} \\ \hline \underbrace{} & & \underbrace{} & & & & & & & & \\ F & & 6 & & & & & & & & \end{array}$$

Обычно эти коды записывают сокращенными английскими словами, в виде мнемостока или мнемоники. Программы, написанные с использованием мнемоники, называют программами, написанными на языке Ассемблер – языке нижнего уровня.

Кроме алфавитно-цифровой информации, которая представляется двоичными константами 1 и 0, в микропроцессорной технике

применяется логическая информация. В зависимости от того, истинно ли какое-то событие или нет, переменная, отображающая эту информацию, может принимать два фиксированных значения: **да** или **нет**, **истина** или **ложь**. Такие переменные называются логическими (булевыми) переменными.

Архитектура и структура МП системы

Под *архитектурой МП-систем* понимается абстрактное представление о системе, определяющее ее возможности по аппаратурной и программной реализации необходимых функций. Архитектура объединяет аппаратурные, микропрограммные и программные средства микропроцессорной техники. Архитектура, понимаемая в этом смысле, называется архитектурой набора команд. Архитектура набора команд служит границей между аппаратурой и программным обеспечением и представляет ту часть ВМ, которая видна программисту, разрабатывающему программы на машинно-ориентированном языке.

Микропроцессорная система (рис. 4.58) или микроЭВМ включает в себя один или несколько микропроцессоров, БИС постоянной (ПЗУ) и оперативной памяти (ОЗУ), БИС управления вводом и выводом информации, генератор тактовых импульсов и некоторые другие схемы. Связаны эти устройства между собой посредством системы шин. Шина – это совокупность проводников, каждый из которых предназначен для передачи соответствующего бита информации. Обработка информации в МП-системе осуществляется с помощью специальных устройств ввода и вывода информации, называемых периферийными устройствами (ПУ). Информация, необходимая для функционирования МП-системы (программы и данные), хранится в блоке памяти (в ОЗУ и ПЗУ).

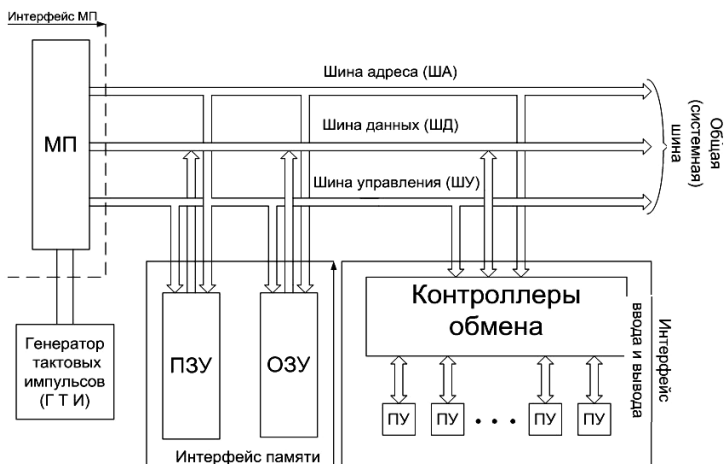


Рис. 4.58. Структура МП-системы

Интерфейс в микропроцессорных системах

Взаимное сопряжение устройств микропроцессорной системы обеспечивается посредством системы аппаратных и программных средств, называемых интерфейсом.

В состав интерфейса входят:

- аппаратные средства соединения устройств (например, разъемы);
- программные средства, описывающие характер сигналов интерфейса;
- описание электрофизических параметров сигналов.

В зависимости от структуры системы и особенностей взаимодействия компонентов можно условно выделить несколько уровней интерфейсов: внутрисплатные или внутримодульные; межплатные или внутриблочные; межблочные; интерфейсы распределенных систем управления.

Рассмотрим назначение основных блоков МП-системы.

Блок памяти (БП)

Основные операции в памяти:

- занесение информации в память – запись;
- выборка информации из памяти – считывание или чтение.

Обе эти операции называют обращением к памяти или обращением при считывании (чтении) и обращением при записи.

В любой МПС, вне зависимости от ее архитектуры, программы и данные хранятся в ЗУ, которые, учитывая их характеристики, месторасположения и способ взаимодействия с процессором, относятся к внутренней или внешней памяти. Наиболее скоростные виды памяти (регистры, кэш-память) обычно размещают на общем кристалле с процессором, а регистры общего назначения вообще считаются частью МП. Вторую группу образуют ЗУ, расположенные за пределами кристалла процессора. К ним относят основную память. Обе эти группы ЗУ образуют внутреннюю память МПС. Медленные ЗУ большой емкости (твердотельные, магнитные и оптические диски) называют внешней памятью, поскольку к МПС они подключаются аналогично устройствам ввода/вывода.

ПЗУ - постоянное запоминающее устройство, которое в процессе работы микропроцессорной системы позволяет осуществлять только чтение заранее записанных данных, имеет высокую скорость работы и является энергонезависимым, т. е. сохраняет информацию при выключении питания.

По способу занесения информации ПЗУ делятся на два вида:

- 1) неперепрограммируемые ПЗУ (ROM):
 - а) программируемые маской на предприятии-изготовителе;
 - б) ПЗУ, однократно программируемые пользователем;
- 2) перепрограммируемые ПЗУ (ППЗУ, PROM):
 - стираемые ультрафиолетом ППЗУ (EPROM);
 - электрически стираемые ППЗУ (EEPROM).

В случае (а) информация заносится в процессе изготовления микросхемы с помощью соответствующих фотошаблонов. В случае (б) запись информации производится пользователем с помощью специальных устройств (программаторов).

Перепрограммируемые ПЗУ допускают стирание записанной и запись новой информации.

В комплект программ, находящихся в ПЗУ, помимо программ обработки данных обычно входит базовая система ввода-вывода (**BIOS** — Basic Input Output System). Основное назначение этой программы состоит в том, чтобы при включении проверить работоспособность всей информационно-измерительной системы и обеспечить взаимодействие всех основных узлов и блоков.

ОЗУ работает в режимах оперативной (т. е. совпадающим с темпом работы МП) записи и чтения данных. ОЗУ энергонезависимы, т. е.

информация теряется при выключении питания. Объем памяти ОЗУ, применяемых в микросхемах памяти, зависит от количества разрядов линий передачи адреса. Например, для организации памяти общим объемом 256 слов по восемь разрядов на базе микросхем памяти, содержащих 256 элементов памяти, требуется восемь адресных линий (от A0 до A7).

Существует два типа полупроводниковых ОЗУ:

- 1) статические (SRAM);
- 2) динамические ОЗУ(DRAM).

Блок памяти содержит большое количество ячеек, каждая из которых хранит 1 бит информации. Эти ячейки связаны в группы фиксированных размеров, которые называются «словами». Чтобы облегчить доступ к любому «слову» памяти, с каждым положением «слова» связано некоторое имя. Эти имена являются числами, которые указывают положение «слова» и называются «адресами».

Кэш-память предназначена для повышения быстродействия процесса обращения к основной памяти.

Основная память, как правило, реализуется на относительно медленной и дешевой динамической памяти (DRAM), обращение к которой приводит к простоям процессора – появляются такты ожидания. Статическая память (SRAM), построенная, как и процессор, на триггерных ячейках, имеет быстродействие, соизмеримое с быстродействием процессора, и способна сделать ненужными такты ожидания или сократить их количество, но имеет высокую стоимость. Разумным компромиссом для построения экономичных и производительных МПС является иерархический способ организации основной памяти. Идея заключается в сочетании основной памяти большого объема на DRAM с относительно небольшой буферной памятью на основе быстродействующей SRAM, т. е. в использовании двухуровневой памяти, когда между ОЗУ и процессором размещается небольшая, но быстродействующая буферная память. В процессе работы в буферную память копируются те участки ОЗУ, к которым производится обращение со стороны процессора. Производится отображение участков ОЗУ на буферную память и переадресация на нее всех обращений в пределах скопированного участка. Выигрыш в быстродействии достигается за счет ранее рассмотренного свойства локальности.

Для обозначения рассмотренной буферной памяти получил распространение термин кэш-память (от английского слова *cache* – убежище, тайный склад, тайник, заначка), поскольку такая память обычно скрыта от программиста в том смысле, что он не может ее адресовать и может даже вообще не знать о ее существовании.

Кэш является дополнительным быстродействующим хранилищем копий блоков информации из основной памяти, вероятность обращения к которым в ближайшее время велика. Кэш не может хранить копию всей основной памяти, поскольку его объем во много раз меньше основной памяти. Он хранит только ограниченное количество блоков данных. Кроме того, кэшироваться может не вся память, доступная процессору.

Для современных микропроцессоров особенно важно то, что кэш-память (поскольку она небольшого размера) можно разместить внутри кристалла, благодаря чему исчезают потери времени на передачу данных между процессором и памятью.

Параметры ЗУ:

1. Информационная емкость – максимально возможный объем хранимой информации.
2. Организация ЗУ – определяет, сколько слов и какой разрядности хранит ЗУ.
3. Быстродействие – оценивается временем считывания, записи и длительностью циклов чтения/записи.
4. Надежность работы (информационная надежность) – способность сохранять записанную информацию в течение заданного времени хранения.

При оценке быстродействия необходимо учитывать применяемый в данном типе ЗУ метод доступа к данным. Различают четыре основных метода доступа: прямой, последовательный, произвольный и ассоциативный. В ЗУ внутренней памяти используются три последних метода:

– последовательный доступ. ЗУ с последовательным доступом ориентированы на хранение информации в виде последовательности элементов данных. Для доступа к нужному элементу (слову) необходимо прочитать все предшествующие ему элементы данных. Время доступа зависит от положения требуемого элемента в последовательности элементов, образующих ЗУ. Примером могут служить стековые ЗУ;

– произвольный доступ. В ЗУ с произвольным доступом каждый элемент данных имеет уникальный физический адрес. Обращение к любому элементу занимает одно и то же время и может производиться в произвольной очередности. Примером могут служить запоминающие устройства основной памяти;

– ассоциативный доступ. Этот вид доступа позволяет выполнять поиск элементов данных, в которых значение отдельных битов совпадает с состоянием одноименных битов в заданном образце. Сравнение осуществляется параллельно для всех элементов, образующих ЗУ. Ассоциативный доступ используется, например, в кэш-памяти.

Способ прямого доступа к памяти осуществляется путем отключения микропроцессора от шины адреса и данных (переходя в режим захвата). Обмен между ПУ и ОЗУ осуществляется непосредственно. Прямой доступ к памяти резко повышает предельную скорость ввода-вывода информации и общую производительность МП-системы, и делает ее более эффективной для работы в системах реального времени.

Быстродействие ЗУ является одним из важнейших его показателей. Для количественной оценки быстродействия обычно используют три параметра: время обращения к памяти, цикл обращения и скорость передачи данных.

Время обращения к памяти при записи и чтении определяется следующим образом

$$t_{\text{обр зап}} = t_{\text{д}} + t_{\text{зап}};$$

$$t_{\text{обр чт}} = t_{\text{д}} + t_{\text{счит}};$$

где $t_{\text{д}}$ – время доступа. Для памяти с произвольным доступом время доступа соответствует временному интервалу, определяемому от момента появления на адресной шине адреса требуемой ячейки памяти до момента, когда становится возможным осуществление связи с адресуемой ячейкой памяти по шине данных. Как правило, время доступа при записи и чтении одинаково;

$t_{\text{зап}}$ – время записи. Это интервал времени от момента подачи информационных сигналов и сигнала, управляющего записью информации, до момента изменения состояния элементов памяти, образующих адресуемую ячейку памяти. Минимальная величина

этого интервала определяется физическими свойствами элементов памяти, так как момент изменения их состояния фиксируется с учетом завершения всех переходных процессов в электронных схемах ЗУ;

$t_{\text{чит}}$ – время считывания. Это продолжительность самого физического процесса считывания информации, т. е. процесса обнаружения и фиксации состояния элементов памяти, образующих адресуемую ячейку памяти.

Практически для большинства ЗУ

$$t_{\text{обр зап}} = t_{\text{обр чт}}$$

Подсистема ввода/вывода отвечает за связь с устройствами ввода/вывода.

Обычно употребляется термин периферийные устройства (ПУ), которые подразделяются на устройства ввода/вывода (УВВ – клавиатура, мышь, принтер, монитор и др.) и внешние запоминающие устройства (ВЗУ).

Связь устройств микропроцессорной системы друг с другом осуществляется с помощью специальных совокупностей средств и правил, которые называются *интерфейсами*. При любой форме взаимодействия с микропроцессорной системой аппаратура ввода/вывода обычно состоит из собственно устройства ввода/вывода и устройства управления этим устройством ввода/вывода – *контроллера* устройства ввода/вывода. Интерфейс между процессором и контроллером устройства ввода/вывода называется системным интерфейсом, а интерфейс между контроллером и устройством ввода/вывода – интерфейсом ввода/вывода. Системный интерфейс, как правило, является общим для всех видов устройств ввода/вывода, а интерфейсы ввода/вывода специализированы для конкретных видов устройств ввода/вывода.

Основу контроллера ПУ составляют регистры, которые служат для хранения передаваемой информации. Взаимодействие микропроцессора с этими регистрами осуществляется через *порты ввода/вывода* из пространства доступа к ПУ.

Порты ввода-вывода – это буферные ячейки памяти. Функционально они похожи на традиционные регистры, т.е. одна группа их информационных линий подключена к внутренней шине МК,

а другая – на внешние выводы микросхемы МК. Порты ввода-вывода используются для временного хранения данных во время пересылки информации между микроконтроллером и внешними устройствами. Таким образом, порты ввода-вывода являются средством подключения внешних устройств к МП.

Существуют правила обмена информацией между конкретным периферийным устройством и микропроцессором, которые называют протоколом обмена. Взаимодействие с периферийным устройством организуется с помощью *драйвера* – специальной программы, составленной на основе этих правил.

Генератор тактовых импульсов

Функционирование всех узлов и блоков МП системы осуществляется с помощью **ГТИ** – генератора тактовых импульсов (или синхронизатора).

Для выполнения МП одной команды, хранящейся в блоке памяти, требуется несколько периодов тактовых импульсов (рис. 4.59).

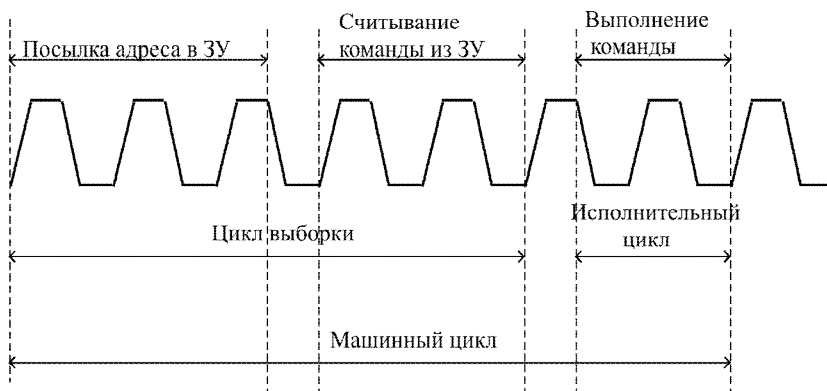


Рис. 4.59. Структура машинного цикла, вырабатываемого ГТИ

Время выполнения команды называется командным циклом, который может включать один или несколько машинных циклов, который в свою очередь, состоит из цикла выборки и исполнительного цикла.

Во время цикла выборки МП определяет адрес команды, находящейся в ЗУ, и считывает эту команду в МП. За время исполнительного цикла МП осуществляет выполнение считанной команды.

Блок МП – это устройство, выполняющее функции программной обработки информации и реализованное по одной схеме большой степени интеграции (БИС) или в виде модуля, содержащего несколько БИС. МП является основой, «мозгом» МП-системы.

Система шин

Передача информации между отдельными функциональными узлами и блоками в микропроцессоре и микроЭВМ осуществляется с помощью соединительных линий – *шин*. Для повышения быстродействия микроЭВМ оперирует двоичными сигналами, представляемыми в параллельном коде. Поэтому для передачи информации необходимо иметь в линии связи столько проводов, сколько разрядов в коде.

В большинстве современных микроЭВМ имеются три шины: адреса, данных и управления. Адреса во многих современных микроЭВМ 16 – 32-разрядные, поэтому *шина адреса* имеет 16 – 32 отдельных проводов. *Шина данных* в большинстве современных микроЭВМ 32- или 64- разрядная и имеет до 64 отдельных проводов. *Шина управления* обычно содержит до 16 проводов.

Особенность шинной системы соединений - параллельное соединение функциональных узлов, вследствие чего они могут одновременно принимать и передавать информацию. Чтобы каждый узел работал поочередно, он имеет свой дешифратор (*селектор*), вследствие чего отключается только на свой адрес и выполняет только свою команду.

Шины адреса и управления – однонаправленные, первая передает сигналы адреса от регистра адреса, вторая – сигналы управления от устройства управления.

Шина данных – двунаправленная, так как каждый функциональный узел (кроме ПЗУ) должен как принимать, так и передавать информацию. Это требует исключения влияния на шину неработающих в данный момент функциональных узлов, что достигается использованием электронных ключей и логических элементов с тремя состояниями: 0, 1 и «Отключено».

Шинный принцип организации микроЭВМ позволяет подключать к ней дополнительные функциональные узлы и блоки, как в процессоре, так и на входе и выходе микроЭВМ.

Организация работы микропроцессорной системы

В ходе работы МП – системы МП на шину адреса выдает адрес ячейки памяти (ОЗУ и ПЗУ), в которой хранится очередная команда.

По шине управления туда поступают сигналы, обеспечивающие чтение содержимого, указываемой шиной адреса, ячейки памяти. Запрошенная команда выдается на шину данных, откуда она принимается в МП. Здесь команда расшифровывается. Если данные, действия над которыми предусматривает команда, находятся в регистрах МП, то он приступает к выполнению указанной в команде операции. Если же при расшифровке команды выясняется, что участвующие, в операции данные находятся в памяти, то МП выставляет адрес ячейки операнда на шину адреса. После выдачи данных из памяти через шину данных над ними выполняются операции. По завершению выполнения текущей команды на шину адреса выдается адрес следующей команды, и процесс повторяется [5, 8, 9].

В процессе работы МП-системы результаты по мере необходимости могут выдаваться на ПУ (для управления объектами, отображения на экране дисплея и т. д.) либо вводиться с ПУ (например, с датчиков после некоторых преобразований, с клавиатуры и т. д.).

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое микропроцессор, микропроцессорный комплект, микропроцессорные устройства, микроЭВМ?
2. Что такое бит, байт, двоичное «слово»?
3. Как осуществить преобразование двоичной информации в десятичную форму счисления, и наоборот?
4. Как осуществить преобразование десятичной информации в шестнадцатеричную форму счисления, и наоборот?
5. Приведите структуру и назовите назначение блока памяти.
6. Назовите назначение и принцип работы генератора тактовых импульсов.
7. Приведите структуру и назовите назначение различных шин МП-системы.

4.7. Архитектура и структура микропроцессора (МП)

Выбор той или иной архитектуры влияет на принципиальные моменты: где могут храниться операнды команд, сколько адресов будет содержать адресная часть команд, какова будет длина этих адресов, насколько просто будет происходить доступ к операндам команд. С этих позиций различают следующие виды архитектур

микропроцессоров: аккумуляторную, регистровую, с выделенным доступом к памяти и стековую.

Типичная архитектура микропроцессора на базе аккумулятора показана на рисунке 4.60.

Основным модулем любого МП является (рис. 4.60) арифметико-логическое устройство (**АЛУ**), выполняющее операции сложения, вычитания, а также логические операции «И», «ИЛИ» над двумя числами (операндами) с выдачей результата по одному выходу. Ввод данных осуществляется с помощью аккумулятора **A** и регистра временного хранения (**ВР**) (см. рис. 4.57). В процессе обработки чаще всего участвуют две величины, которые вводятся в эти указанные регистры, находящиеся на выходе АЛУ. Результат вычисления возвращается в аккумулятор **A**. Оба входных регистра могут загружаться из источника данных, присоединенных к шине данных. Таким источником могут быть внутренние регистры **B, C, D, E, H** и **L**, устройство ввода-вывода и внешнее запоминающее устройство (**ЗУ**). Внутренние регистры предназначены для хранения промежуточных результатов вычислений.

Как данные, так и команды вводятся через шину данных. Команды передаются во время цикла ввода (или выборки) команд и используются для обработки данных в течение исполнительного цикла.

Требуемый порядок следования этих операций обеспечивает устройство управления (**УУ**). Устройство управления не только управляет работой МП, но и запускает в определенные моменты времени ряд внешних устройств. К ним относятся внешние ЗУ и порты ввода-вывода информации.

Такие операции осуществляются с помощью команд **WR** (запись) и **RD** (чтение), одновременно с которыми на адресную шину поступает код адреса для поиска требуемой ячейки ЗУ.

С помощью управляющего сигнала **ALE** (address latch enable – разрешение адресного режима) часть информации шины адресов, а именно биты от **A0** до **A7** включительно, выводятся из МП по шине данных. Это делается для более эффективного использования внешних выводов корпуса МП. Временное разделение (мультиплексирование) с помощью **ALE** позволяет выдать всю адресную информацию через шины адресов и данных с тем, чтобы по окончании действия **ALE** снова использовать шину данных для передачи данных.

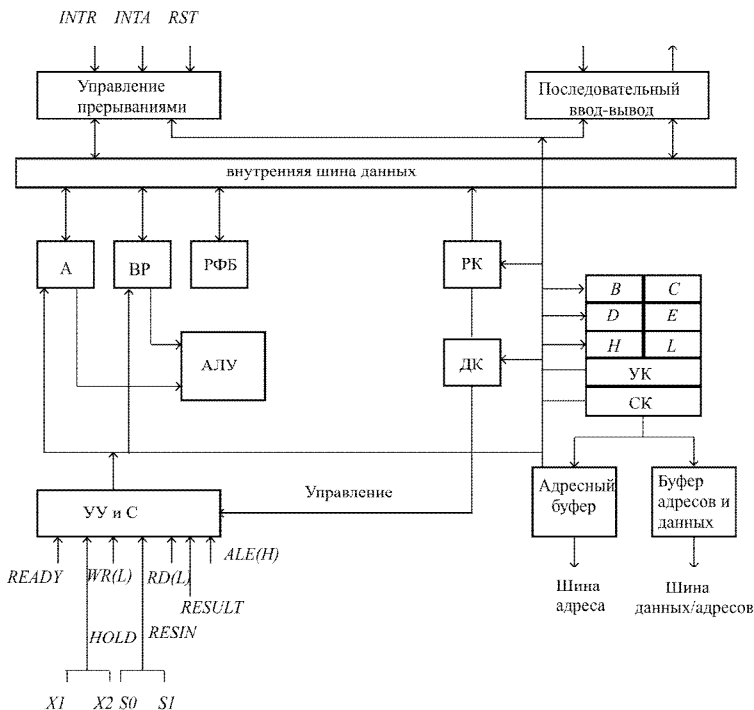


Рис. 4.60. Структура МП

С помощью внешнего сигнала **HOLD** (захват шины) можно предписать МП не пользоваться шинами адреса, данных и управления. МП при этом переводится в состояние ожидания и находится в этом состоянии до тех пор, пока не получит сообщение, что требуемый регистр перешёл в состояние готовности или что требуемый адрес найден в ЗУ. Сообщение об этом поступает в виде сигнала **READY**.

Сигнал **RESIN** (внутренний сброс) позволяет установить счетчик команд в нужное состояние. В этом случае программа будет автоматически начинаться снова. Сигналы состояния **S0** и **S1** содержат информацию о состоянии МП.

С помощью блока «Управление прерываниями» производится прерывание выполнения основной программы с помощью команды **INTR** и переход к выполнению требуемой подпрограммы с помощью команд **INTA** и **RST**.

С помощью блока «Последовательный ввод-вывод» можно вывести последовательно из МП параллельный набор битов или ввести в МП последовательный набор битов и преобразовать его в параллельный набор. Такое преобразование требуется, если необходимо передавать данные по одной линии, например, в процессе обмена данными. Связь МП с внешними схемами осуществляется через буферы (адресный, данных и адресов).

В структурной схеме МП для временного хранения данных имеются регистр указателя стека и счетчик команд (**СК**). Указатель стека сообщает, по какому адресу стекового ЗУ, т. е. в зарезервированной части ЗУ, записан последний байт.

В счётчике команд (**СК**) производится подсчет адресов команд программы во время выполнения вычислений. В зависимости от номера выполненной команды изменяется содержимое указателя стека.

С регистром команд (**РК**) соединен дешифратор команд (**ДК**), предназначенный для выбора источников, приемников и операций **АЛУ**. Регистр команд и дешифратор команд используются для получения дешифрации кода команды.

При извлечении команды первый байт, содержащий её код, помещается в регистр команд и поступает в дешифратор (**ДК**). Дешифратор команд совместно с устройством управления и синхронизации (**УУ и С**) формируют управляющие сигналы для всех внутренних блоков МП.

Регистр флажковых битов (**РФБ**), который еще называют регистром признаков, содержит 5 булевых переменных, называемых флажковыми состояниями:

1) **Z**–бит (бит нуля), устанавливается в 1, если результат действия команды равен 0. В противном случае он устанавливается в 0.

2) **S**–бит (бит знака), устанавливается в 1, если значащий бит результата равен 1. В противном случае устанавливается в 0.

3) **P**–бит (бит четности), устанавливается в 1, если результат содержит четное число единиц.

4) **C**–бит (бит переноса), устанавливается в 1, если произошло переполнение **АЛУ**, т. е. в случае результата, превышающего 2^8 (1 байт) или меньшего 0.

5) **A**–бит (бит добавочного переноса), устанавливается в 1, если при выполнении операции десятичной арифметики формируется перенос из третьего бита в четвертый в данном байте.

Регистр флажковых битов характеризует свойства результата.

Системы команд микропроцессора

Программой называется последовательность команд для центрального процессора, выполнение которых позволяет решить данную задачу. Последовательность команд представляет собой последовательность действий, которые необходимо выполнить, и называется алгоритмом.

Микропроцессорная система воспринимает только двоичные коды. Поэтому программу, составленную в мнемосокодах, необходимо переводить в ее двоичный эквивалент. Это можно сделать вручную, используя таблицы соответствия системы команд для данного МП, или с помощью специальных программ. Более полную автоматизацию процессов программирования обеспечивает язык Ассемблер, в котором вместо кодовых комбинаций используются мнемонические обозначения операций. Следует отметить, что каждый МПК имеет свой язык Ассемблер.

Язык Ассемблер в упрощенном виде представляет собой сокращенные английские слова, обозначающие определенную команду [5, 14].

Для удобства программа на языке Ассемблер разделяется на поля. Приведем пример:

Метка	Код	Операнд	Комментарий
<i>HERE:</i>	<i>MVI</i>	<i>C, 56H</i>	Загрузка регистра <i>C</i> по адресу <i>56H</i>
<i>THERE:</i>	<i>JMP</i>	<i>NEXT</i>	Переход к <i>NEXT</i>
<i>MAYBE</i>	<i>XRA</i>	<i>D</i>	Операция, исключающая ИЛИ между аккумулятором и регистром <i>D</i>

Поле «метка» может содержать любое символическое имя, ссылающееся к той позиции памяти, которой впоследствии будет назначен адрес. Поле «код» содержит обозначение той операции, которую необходимо выполнить.

Источник и назначение (т. е. откуда и куда идет информация) определяется в поле «операнд». Это может быть буква, обозначающая регистр, непосредственные данные или символическое имя. Если требуется задать оба операнда, то они записываются через запятую. Такие поля языка Ассемблер могут интерпретироваться по-разному в зависимости от конкретного микропроцессора [19, 20].

Основные команды микропроцессора условно можно разделить на несколько групп:

1) Команды пересылки данных, которые осуществляют обмен между памятью и регистром или между регистрами:

– команда **MOV B, C** осуществляет пересылку содержимого одного регистра в другой (например, из *C* в *B*), или **MOV B, M** – пересылает элементы данных из поля памяти *M*, адрес которого определяется содержанием регистров *H* и *L*, в регистр *B*;

– команда **MVI** – служит для передачи констант в аккумулятор, регистр или память и записывается, например, как **MVI B, 62**

– команды **LDA, STA** – это команда загрузки (**LDA**) и команда пересылки (**STA**) для аккумулятора (регистр *A*).

2) Команды арифметические:

– команда **ADD B** – складывает содержимое (всегда) аккумулятора и регистра *B*;

– команда **ADC B** – сложение с переносом (определяет двоичную сумму *A* и *B* и содержимого флага переноса *C*);

– команда **SUB C** – осуществляет вычитание (определяет разность уменьшаемого и вычитаемого). Результат помещается на место уменьшаемого, т. е. в регистр *A*, а вычитаемое остается без изменения;

– команда **SBB C** – вычитание с заемом (определяет разность двух операндов и по ней из уменьшаемого вычитается содержимое флага переноса *C*).

3) Логические команды:

– команда **NOT** – логическое НЕ;

– команда **AND** – логическое И;

– команда **OR** – логическое ИЛИ.

4) Команды перехода изменяют нормальную последовательность исполнения команд:

– команда **JMP NEXT** – заставляет МП продолжать выполнение программы с команды, адрес которой определен в **JMP** (например, **NEXT**);

– **CALL «адрес»** – команда вызова подпрограммы (**CC, CNC, CZ, CNZ** и др.). По этой команде управление передается по содержимому ячейки «адрес», адрес последней выполненной команды запоминается в стеке и после выполнения подпрограммы происходит возврат к выполняемой основной программе.

5) Команда сдвига имеет следующий обобщенный вид:

Мнемоника Операнд, Число сдвигов.

Мнемоника команд сдвига состоит из трех символов. Первый обозначает тип сдвига: простой *S* (*shift*), или циклический, называемый ротацией *R* (*rotation*). Второй символ конкретизирует тип сдвига: арифметический *H*, логический *L*, простой циклический *O*, циклический с учетом переноса *C*. Третий символ обозначает направление сдвига: влево *L* и вправо *R*. Например, команда **RCL** соответствует циклическому сдвигу с учетом переноса влево. В качестве операнда может выступать содержимое регистра или ячейки ОЗУ. Число сдвигов может быть указано числовой константой, либо косвенно, путем указания регистра **CL**. В последнем случае в этот регистр предварительно должна быть занесена константа, соответствующая числу сдвигов. Приведем примеры команд сдвигов:

SLR [SI], 1 – логический сдвиг вправо содержимого ячейки ОЗУ с адресом [SI] на один разряд;

ROL SIGMA, CL – циклический сдвиг влево содержимого ячейки ОЗУ SIGMA. Количество сдвигаемых разрядов содержится в регистре CL.

6) Команды ввода – вывода.

Все внешние устройства рассматриваются микропроцессором как внешние регистры или порты ввода вывода. Для передачи данных между МП и внешними устройствами имеются две команды: **IN** – ввод и **OUT** – вывод. Весь процесс обмена ведется через регистр **A** (аккумулятор). Он является как бы «почтовым ящиком». Через него осуществляются пересылки данных из МП во внешнее устройство (ВУ) и в него же данные принимаются. Обобщенный вид команд можно представить в следующем виде:

Мнемоника Приемник, Источник.

В команде **IN** в качестве приемника может выступать регистр **A**. В качестве источника должен выступать адрес регистра ВУ, который может быть задан либо однобайтной константой (от 0 до 255), либо косвенно, путем указания регистра. В этом случае в этот регистр должен быть занесен двухбайтный адрес регистра ВУ.

В команде **OUT** регистр **A** теперь выступает уже в качестве источника, а адрес регистра ВУ должен быть помещен на место приемника. Он может быть задан так же, как и в команде **IN**.

В команде **IN A, 40** приемником является **A**, а источником – регистр с адресом 40.

В команде **OUT D, AL** приемником является регистр с адресом, содержащимся в **D**, а источником – регистр **A**.

Наибольшее удобство для программирования обеспечивают языки высокого уровня. Различают машинно-независимые и машинно-зависимые языки высокого уровня. Первые позволяют вести запись программы независимо от серии микропроцессорного комплекта, используемого для построения микропроцессорной системы. К таким языкам относятся алгоритмические языки Паскаль, Фортран, Бейсик, СИ и др. Вторые пригодны при применении определенных серий МПК.

Языки высокого уровня, называемые алгоритмическими языками, требуют большого объема памяти для хранения трансляторов, обеспечивающих перевод программы на язык кодовых комбинаций. Для машинно-независимых языков этот объем больше, чем для машинно-зависимых. Поэтому выбор языка программирования определяется техническими возможностями МП-системы. Как правило, в том и другом случаях трансляция, редактирование, отладка программ осуществляется на отдельных микропроцессорных системах, построенных на том же МПК, однако они не имеют достаточного для нужного транслятора объема оперативной памяти и удобных средств ввода-вывода информации (дисплей, принтер, накопитель на CD или DVD дисках и др.).

Микроконтроллеры – устройства, имеющие структуру микропроцессорной системы, выполненные в виде БИС и предназначенные для решения задач управления техническими устройствами и системами. Поскольку в составе таких БИС имеются все узлы, присутствующие ЭВМ, они называются также однокристальными микроЭВМ.

В отличие от универсальных микроЭВМ в микроконтроллерах небольшие по размерам память и простой интерфейс для связи с внешними устройствами. Это объясняется, прежде всего, спецификой решаемых задач. Микроконтроллеры не используются в универсальных вычислительных системах, а предназначены для создания высокоэффективных и дешевых управляющих и регулирующих систем. Микроконтроллеры реализуют несложные алгоритмы, и для размещения программ им требуется емкость памяти на несколько порядков меньшая, чем у микроЭВМ универсального назначения. Внешние устройства также значительно проще, а их набор существенно уже. Микроконтроллеры применяются в устройствах

управления технологическими процессами (в том числе в сельском хозяйстве), в устройствах управления автомобилей, станков, в частности, в устройствах числового программного управления.

В настоящее время выпускаются 8-, 16- и 32-разрядные микроконтроллеры, но наибольшим спросом пользуются восьмиразрядные. Росту популярности 8-разрядных микроконтроллерных способствует постоянное расширение номенклатуры изделий, выпускаемых такими известными фирмами, как Motorola, Microchip, Intel, Zilog, Atmel и многими другими.

Емкость ОЗУ микроконтроллера может меняться от десятков до сотен байт. Она используется не для хранения программ, а только для временного хранения данных и промежуточных результатов, поэтому этой емкости для простых задач управления вполне достаточно. Для хранения программ служит флэш-память, емкость которой обычно не превышает 20 кбайт. В микроконтроллере предусмотрена возможность расширения объема памяти за счет подключения внешних БИС ПЗУ и ОЗУ.

Система команд микроконтроллера специально ориентирована на решение задач управления, поэтому наряду с обычными командами, характерными для всех микропроцессоров, в ней есть и некоторые специфические. Поскольку все ресурсы микропроцессорной системы - ОЗУ, ПЗУ, порты ввода-вывода находятся внутри микросхемы, то центральному процессору при выполнении команд не требуются циклы обращения к внешним по отношению к нему микросхемам. Поэтому большинство команд - короткие, аналогичные командам микропроцессора, в которых данные находятся в регистровой памяти.

Вопросы для самоконтроля

1. Назначение блока «Устройство управления и синхронизации» и основные команды, которые на него подаются.
2. Назначение различных типов регистров в МП.
3. Принцип работы блока «Управление прерываниями».
4. Что показывает регистр флажковых битов?
5. Что такое интерфейс?
6. Каково устройство и назначение портов ввода-вывода?
7. Назначение блока «Последовательный ввод-вывод».
8. Какие системы команд МП вы знаете? Приведите примеры.

4.8. Проводная связь и радиосвязь

Электрической связью называют такой вид связи, при котором информация передается на расстояния посредством электрических сигналов. Электросвязь делится на проводную и радиосвязь [3].

Проводная электросвязь подразделяется на телефонную; телеграфную; для передачи данных и др.

Принцип действия телефонной связи

Основу телефонной связи (ТС) составляют процессы преобразования звуковых колебаний (голоса) в электрический сигнал и обратно. При этом форма акустического сигнала должна быть точно отображена формой электрического сигнала и наоборот. Для этого необходимо иметь устройства, которые осуществляли бы это преобразование. Таким преобразователем стал разговорный тракт телефонного аппарата (ТА), в состав которого входят (рис. 4.61):

- а) источник электротока (батарея – G);
- б) передатчик речи (микрофон – BM);
- в) приемник речи (телефон – BF);
- г) электролиния, соединяющая микрофон и телефон ($Л1$ и $Л2$).

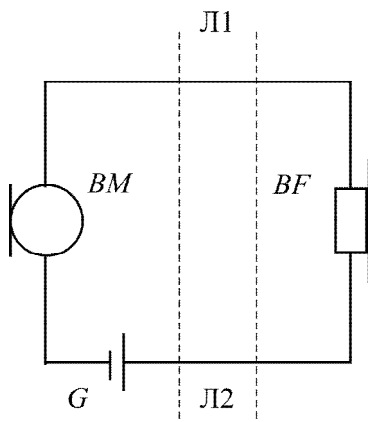


Рис. 4.61. Схема разговорного тракта ТА

Голосовые связки человека способны создавать звуковые колебания с частотой $f = 80 \text{ Гц} \dots 12\,000 \text{ Гц}$, а на слух человек воспринимает звуковые колебания частотой от 20 до 20 000 Гц, т. е. микрофон и телефон обеспечивают неискаженное преобразование

колебаний в данной полосе частот. Для телефонной связи принят диапазон частот 300...3400 Гц, т. к. в этом диапазоне разборчивость речи является достаточно хорошей.

Звуковые колебания воздействуют на мембрану микрофона, которая преобразует звуковые колебания в электрические колебания. Эти электрические колебания, распространяясь по линии, достигают приемного узла, где с помощью телефона вновь преобразуются в колебания воздушной среды. Качество телефонной передачи зависит от электрических свойств линии передачи.

Устройство и принцип действия микрофона и телефона

Микрофон служит для преобразования энергии колебаний воздушной среды в энергию электрических колебаний. В телефонных аппаратах могут использоваться угольные микрофоны капсульной конструкции (для дисковых ТА), электростатические (конденсаторные и электретные) и электродинамические (для кнопочных ТА).

Микрофон угольный состоит из латунного корпуса, где размещено два электрода, один из которых прикреплен к металлической мембране, другой жестко соединен с корпусом и изолирован от корпуса изоляционной втулкой, между электродами находится угольный порошок (рис. 4.62).

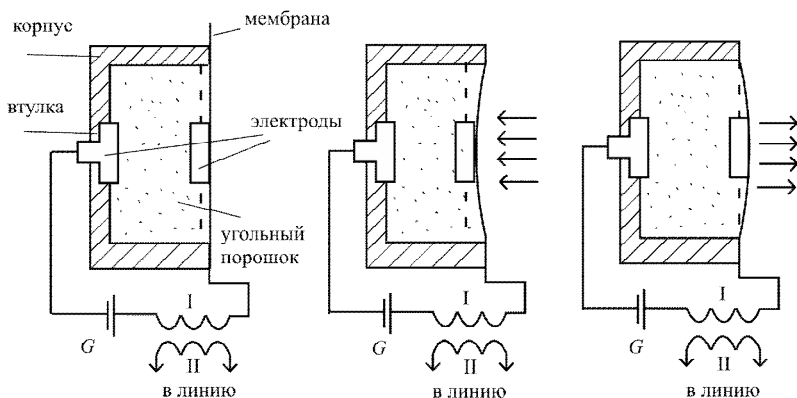


Рис. 4.62. Устройство угольного микрофона

В замкнутой цепи ток от положительного полюса батареи G через обмотку I трансформатора протекает через микрофон к отрицательному полюсу батареи G . Когда мембрана неподвижна, угольный порошок между подвижным и неподвижным электродами имеет

определенное сопротивление (R) и в цепи протекает постоянный ток. В обмотке II тока нет. Во время разговора под действием колебания воздуха мембрана колеблется. Если она прогибается внутрь, порошок уплотняется, сопротивление R уменьшается. Если мембрана прогибается наружу, площадь сопротивления в порошке увеличивается, сопротивление R растет. Изменение сопротивления R порошка вызывает изменение тока через трансформаторную обмотку I. Создается изменяющийся магнитный поток, пересекающий обмотку II и индуцирующий в ней переменный ток: осуществляется преобразование звуковых колебаний в электрические колебания.

Конденсаторный микрофон (рис. 4.63) состоит из мембраны (1) и электрода (2), которые разделены изолирующим кольцом (3).

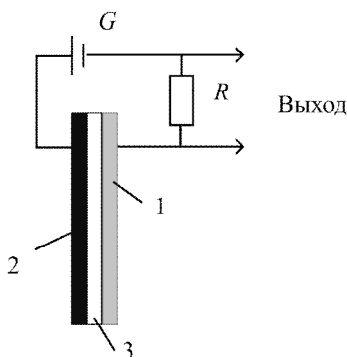


Рис. 4.63. Устройство конденсаторного микрофона

Мембрана под воздействием звукового давления совершает колебательные движения относительно неподвижного электрода. Ёмкость конденсатора меняется с частотой звукового давления, в электрической цепи появляется переменный ток. Электретные микрофоны являются теми же конденсаторными, но постоянное напряжение в них обеспечивается зарядом электрета, тонким слоем нанесенного на мембрану и сохраняющим этот заряд продолжительное время (свыше 30 лет).

Телефон служит для преобразования энергии электрических колебаний в энергию колебаний воздушной среды. В телефонных аппаратах применяют телефон в виде капсулей (рис. 4.64). Он состоит из постоянного магнита (4), стальных сердечников (6), катушек (3)

с проводом, соединенных последовательно и встречно, мембраны (2) из магнитного материала, крышки (1). Когда ток по катушкам не протекает, мембрана, под действием сил магнитного потока постоянного магнита, несколько вогнута в сторону сердечников и находится в спокойном состоянии.

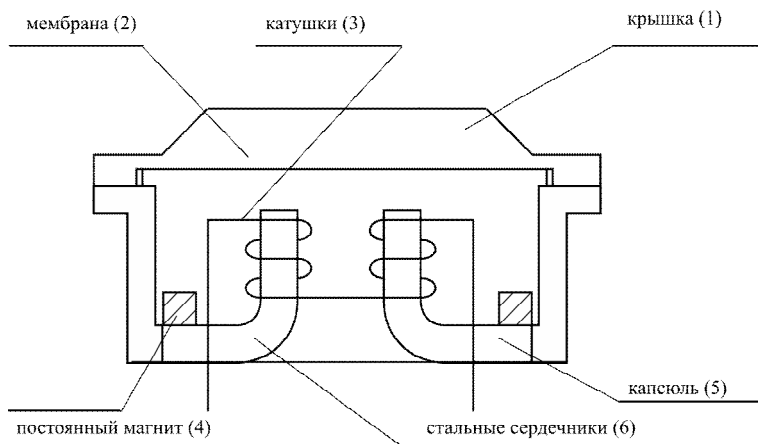


Рис. 4.64. Устройство телефона

Если через катушку протекает постоянный ток, мембрана колеблется. Магнитный поток, действующий на мембрану, меняется по величине. При совпадении силовых линий катушки с силовыми линиями постоянного магнита, магнитный поток усиливается, и мембрана еще больше прогибается в сторону сердечника. Если направления силовых линий катушки и постоянного магнита противоположны, происходит ослабление общего магнитного потока, мембрана стремится выпрямиться и отходит от полюсных наконечников, т.е. мембрана телефона совершает колебательные движения в соответствии с частотой и величиной переменного тока, протекающего по катушкам. Она вызывает колебания воздушной среды и воспроизводит звуки. Следует отметить, что качество работы телефона зависит от величины магнитного потока постоянного магнита.

В зависимости от способа питания микрофона различают две системы телефонной связи:

1. Система местной батареи (МБ) (рис. 4.65, а);
2. Система центральной батареи (ЦБ) (рис. 4.65, б).

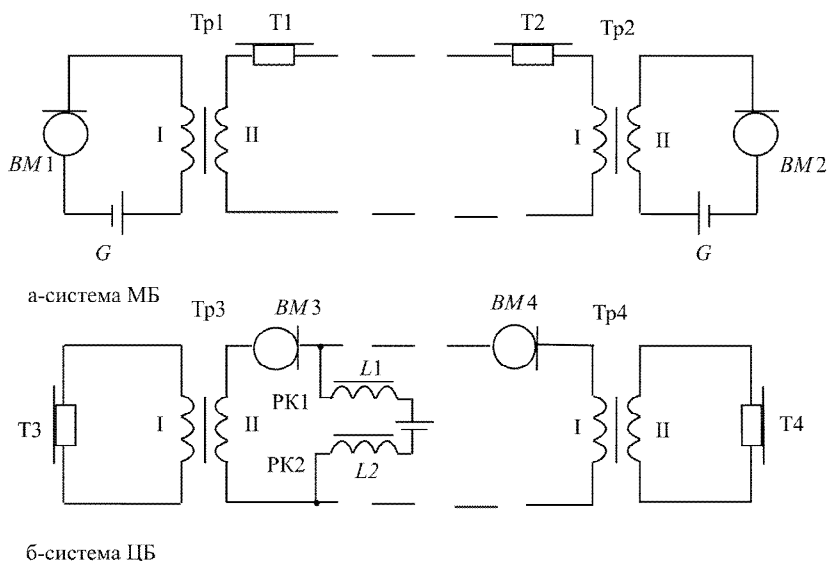


Рис. 4.65. Системы телефонной связи: МБ (а); ЦБ (б)

В системе МБ телефоны T_1 и T_2 включаются в линейную цепь, а микрофоны M_1 и M_2 – в местную с источником питания МБ. В системе ЦБ микрофоны M_3 и M_4 включаются в линейную цепь, а телефоны T_3 и T_4 в местную. Реактивные катушки PK_1 и PK_2 препятствуют замыканию токов звуковой частоты через ЦБ.

Телефонные аппараты

Телефонный аппарат – это сочетание разговорных приборов (микрофона, телефона, трансформатора), предназначенных для передачи и воспроизведения речи, с вызывными устройствами (звонков, клапаны, номеронабиратель), по которым посылается вызов тому лицу, с которым осуществляется связь (абоненту), или принимается вызов от других абонентов.

Разговорные приборы – микрофон и телефон – конструктивно объединяются в микротелефонную трубку.

Телефонные аппараты (ТА) бывают электромеханические; электронные; комбинированные.

Любой ТА состоит из разговорной части (микрофон, телефон, трансформатор и балансный контур) и коммутационно-вызывной

части (звонок, индуктор, номеронабиратель, рычажный переключатель). Телефонные аппараты значительно отличаются по внешнему виду, но в их конструкции много общего (рис. 4.66).

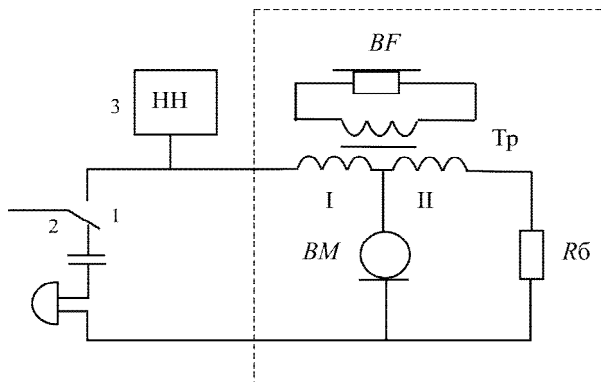


Рис. 4.66. Структурная схема электромеханического ТА

Коммутационно-вызывная часть ТА содержит:

- а) механический рычажный переключатель (1);
- б) звонок электромеханический с разделительным конденсатором (2);
- в) номеронабиратель (3).

Номеронабиратель – механизм, с помощью которого создаются импульсы постоянного тока для управления приборами автоматизированной телефонной станции (АТС) при соединении абонентов.

В электромеханических ТА используются дисковые номеронабиратели, а в электронных – кнопочные.

Структурная схема электронного ТА показана на рисунке 4.67.



Рис. 4.67. Структурная схема электронного ТА (с кнопочным номеронабирателем)

Переключатель режима (рычажный) обеспечивает подключение к абонентской линии; тональное вызывное устройство преобразует вызывной сигнал, поступающий от АТС в акустический сигнал типа "трель"; кнопочный (электронный) номеронабиратель обеспечивает быстрый набор номера вызываемого абонента; разговорное устройство (тракт) обеспечивает преобразование звуковых колебаний в электрические, и наоборот.

Передача цифровых данных между удаленными ЭВМ по аналоговым телефонным линиям

Для передачи цифровых данных по проводным линиям между удаленными друг от друга ЭВМ, между ЭВМ и объектами управления; между измерительными системами, системами сбора и распределения информации и ЭВМ и т. д., системы специальной связи строятся по определенным структурным схемам.

При передаче цифровых сигналов по специальным проводным линиям на сравнительно небольшие расстояния (до сотен метров) часто применяется токовый принцип: логическая 1, например, передается возбуждением в линии импульса тока с амплитудой +20 мА, при этом логический 0 может передаваться импульсом тока с амплитудой -20 мА.

Однако если для передачи информации в цифровом виде используются каналы обычной связи широкого применения (например, линии обычной телефонной связи, телевизионные и радиовещательные кабельные или радиочастотные каналы, линии электропередачи и т. д.), то связь осуществляется с применением *модемов*.

Модемом принято называть устройство, функционально состоящее из модулятора и демодулятора, предназначенное для обмена информацией между компьютерами по каналам связи.

На рисунке 4.68 приведена упрощенная структурная схема модемной системы передачи данных между двумя ЭВМ по обычной (например, телефонной) линии связи.

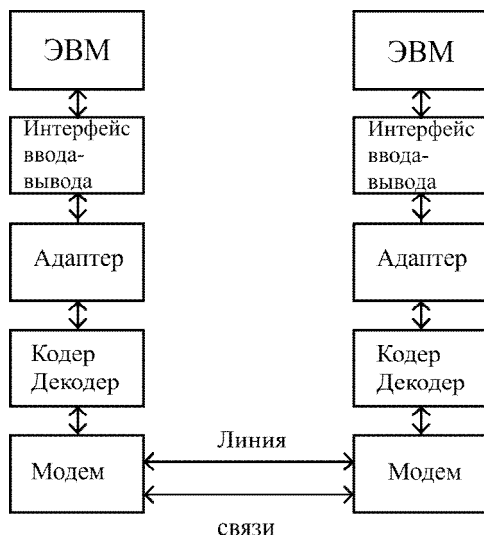


Рис. 4.68. Функциональная схема линии связи между ЭВМ

Сигналы от ЭВМ через интерфейс ввода-вывода в параллельном многоразрядном коде поступают на *адаптер*, основное назначение которого – преобразование параллельного кода в последовательный при передаче, а при приеме – преобразование из последовательного кода в параллельный.

С выхода адаптера последовательный код подается в *кодер*, где преобразуется в специальный помехоустойчивый код, позволяющий обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие при воздействии внешних помех и сбоев. С выхода кодера закодированный сигнал поступает в *модем* (модулятор-демодулятор), который в режиме передачи осуществляет перенос спектра кодированного сигнала в область частот, наиболее подходящую для передачи по данной конкретной линии связи.

Преобразованные в двоичный код сигналы могут передаваться с помощью импульсной модуляции. Поскольку в двоичном коде число передается сочетанием двух элементарных сигналов, один из которых отображает логический 0, а другой – логическую 1, передача и прием цифровых сигналов существенно упрощаются. При передаче 0 передатчик вообще может не излучать ничего, в то время как при передаче 1 он может излучать максимальную мощность.

Используемый для связи между ЭВМ по телефонным линиям современный телефонный модем представляет собой достаточно сложное устройство, выполненное на основе одного или нескольких микропроцессоров и имеющее в своем составе несколько специальных узлов и блоков (рис. 4.69).

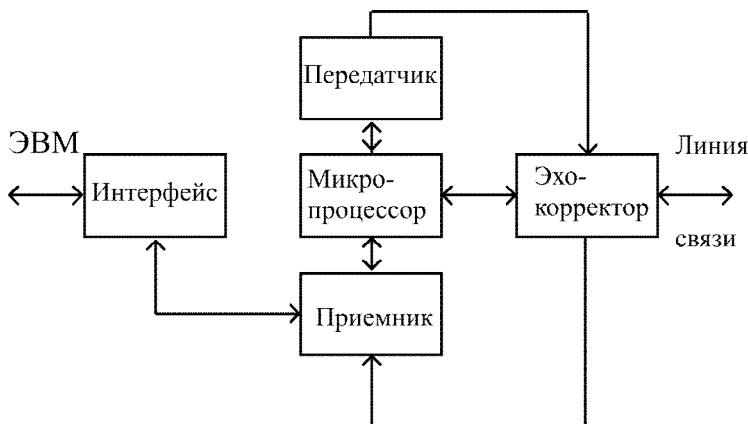


Рис. 4.69. Функциональная схема модема для передачи данных по аналоговым телефонным линиям

Это в значительной мере обусловлено тем, что большинство телефонных линий и автоматических телефонных станций (АТС) являются аналоговыми и цифровые сигналы непосредственно передавать и принимать не могут. Поэтому цифровые сигналы, передаваемые от ЭВМ в телефонную линию, должны быть преобразованы в аналоговую форму, а при приеме восстановлены и в цифровом виде переданы в принимающую информацию ЭВМ. В модеме со стороны телефонной линии связи установлен блок интерфейса, включающий в свой состав специальный эхо-корректор, обеспечивающий защиту от опасных перепадов напряжения в линии, разделяющий входные и выходные сигналы, компенсирующий эхо-сигналы, устраняющий влияние собственного передаваемого сигнала на входной.

Принимаемый сигнал далее поступает в приемник, который под управлением микропроцессора осуществляет усиление сигналов, фильтрацию их от шумов и помех, проверку и коррекцию искаженных помехами кодов, детектирование сигналов, перевод их в

цифровую форму и преобразование последовательного кода в заданный параллельный, который потом через блок интерфейса передается в ЭВМ.

В режиме передачи цифровые сигналы, получаемые от ЭВМ, в передатчике, работающем под управлением микропроцессора, преобразуются из параллельного кода в последовательный, затем с помощью цифроаналогового преобразователя переводятся в аналоговую форму, поступают на модулятор передатчика и через интерфейс передаются в линию телефонной связи.

Во многих моделях современных телефонных модемов все основные операции по приему и передаче сигналов выполняются с помощью отдельных микропроцессоров.

Принцип радиосвязи. Общие сведения

Радиосвязь - это беспроводная передача сигнала с помощью электромагнитной волны. Радиосвязь подразделяется на радиотелефонную связь (системы сотовой связи, пейджинговые системы и системы мобильной спутниковой связи), радиотелеграфную, телевизионную и др.

Электромагнитные волны являются носителями энергии, а созданные электромагнитные излучения есть процесс преобразования энергии. Такое преобразование произойдет, например, если заставить электрон двигаться с ускорением. Тогда энергия, которую затрачивает устройство для того, чтобы заставить электроны двигаться с ускорением (например, источник переменной ЭДС), превращается в энергию электромагнитного излучения.

Элементом, содержащим большое количество электронов, является проводник, который подключается к зажимам источника переменной ЭДС. Такой проводник, преобразующий энергию источника переменной ЭДС в энергию электромагнитной волны, называется антенной. Таким образом, **антенна** – это устройство, предназначенное для излучения или приема электромагнитных волн. К основным параметрам антенны относятся: коэффициент усиления, коэффициент направленного действия, зона индукции и зона излучения и др.

Антенны подразделяются на следующие виды:

- 1) передающие;
- 2) приемные;
- 3) приемно-передающие;
- 4) ДВ -, СВ -, УКВ – диапазона, симметричные, несимметричные.

В радиопередающем устройстве (РПДУ) вырабатывается ток высокой частоты, преобразуемый в передающей антенне (A1) в электромагнитные колебания, которые в виде радиоволны излучаются в определенную среду. Скорость распространения радиоволн 300000 км/с. В радиоприемном устройстве (РПУ) приемная антенна (A2) воспринимает электромагнитные колебания, которые затем снова преобразуются в ток (рис. 4.70).

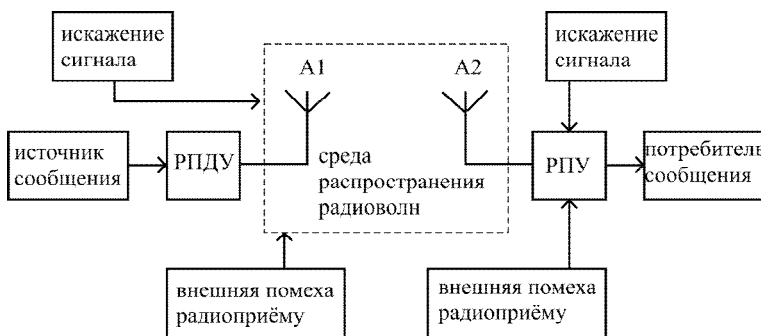


Рис. 4.70. Структурная схема радиоканала

Радиоволны могут распространяться двумя путями:

- 1) непосредственно вдоль земной поверхности;
- 2) отражением от ионизированных слоев атмосферы.

Радиоволны, распространяемые вдоль поверхности земли, называются поверхностными, а под некоторым углом к поверхности – пространственными. В зависимости от длины радиоволны делятся на диапазоны (табл. 8).

Таблица 8

Диапазоны радиоволн

Название диапазона	Длина волны	Частота	Области использования
Километровые (ДВ)	10 – 1 км	30 – 300 кГц	Радиосвязь, радионавигация
Гектометровые (СВ)	1000 – 100 м	0,3 – 3 МГц	Радиосвязь, радионавигация, радиовещание
Декаметровые (КВ)	100 – 10 м	3 – 30 МГц	– / –

Название диапазона	Длина волны	Частота	Области использования
Метровые (КВ)	10– 1 м	30 – 300 МГц	Радиосвязь, радиорелейная связь
Дециметровые (УКВ)	1 – 0,1м	0,3 – 3 ГГц	– / – радиолокация
Сантиметровые (СВЧ)	10 – 1 см	3 – 30 ГГц	Телевидение, радионавигация
Миллиметровые (СВЧ)	10 – 1 мм	30 – 300 ГГц	Радиолокация
Децимиллиметровые (СВЧ)	1 – 0,1мм	300 - 3000 ГГц	– / –

Длинные волны обладают свойством дифракции, хорошо огибают земную поверхность и препятствия. Средние волны распространяются как в виде поверхностных (днем), так и в виде пространственных волн (ночью).

Короткие волны распространяются главным образом в виде пространственных волн, т.к. поверхностные волны на ВЧ сильно поглощаются земной поверхностью. Поэтому сигналы в КВ-диапазоне передаются, используя однократное отражение от слоев ионосферы или многократное отражение от ионосферы и земли.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается принцип телефонной связи?
2. Нарисуйте и объясните схему разговорного тракта.
3. Сравните устройство и принцип действия угольного и конденсаторного микрофонов.
4. Объяснить устройство и принцип действия телефона.
5. Что представляют собой модем, адаптер, кодер и их назначение в системах передачи информации между удаленными ЭВМ по телефонным линиям?
6. Объясните работу функциональной схемы передачи информации между удаленными ЭВМ по телефонным линиям.
7. Принцип радиосвязи.
8. Что представляет собой антенна, виды и назначение?

4.9. Радиопередающие устройства (РПДУ) и радиоприемные устройства (РПУ)

Радиопередающие устройства (РПДУ)

Радиопередатчик – устройство для формирования радиосигнала, подлежащего излучению. РПДУ предназначены для генерации и излучения колебаний высокой частоты.

Классификация радиопередатчиков.

- 1) по назначению:
 - а) радиовещательные;
 - б) телевизионные;
 - в) радиолокационные;
 - г) навигационные и другие;
- 2) по условиям эксплуатации:
 - а) стационарные;
 - б) нестационарные;
- 3) по излучаемой мощности:
 - а) очень малой мощности ($P < 3 \text{ Вт}$);
 - б) малой мощности ($P = 3 - 100 \text{ Вт}$);
 - в) средней мощности ($P = 100 \text{ Вт} - 10 \text{ кВт}$);
 - г) большой ($P = 10 - 100 \text{ кВт}$);
 - д) сверхмощные ($P \geq 500 \text{ кВт}$);
- 4) по длине волны:
 - а) длинные;
 - б) средние;
 - в) короткие;
 - г) ультракороткие;
 - д) сверхвысокочастотные.

Основные понятия

1. Модуляция – процесс изменения одного из параметров несущего колебания ВЧ по закону передаваемого сигнала.

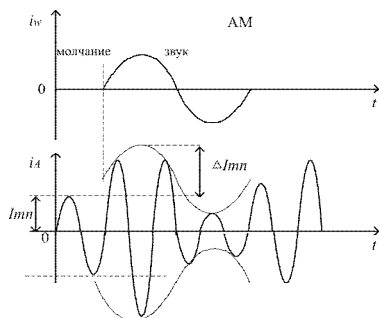
Различают: амплитудную (АМ), частотную (ЧМ), фазовую модуляцию (ФМ).

2. Переменный ток ВЧ в антенне передатчика: $i = I_m \sin(\omega_o t + \varphi_o)$.

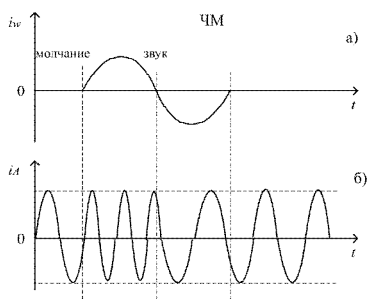
При модуляции изменяется один из параметров ВЧ колебания I_m , ω_o , φ_o . Режим, при котором модуляция отсутствует – режим молчания или несущей частоты.

3. Коэффициент глубины модуляции – $m = \Delta I_m / I_m$ (обычно 0,7 – 0,8).

При АМ амплитуда высокочастотных колебаний должна изменяться в соответствии с законом изменения амплитуды передаваемого сигнала (рис. 4.71), при ЧМ частота изменяется в соответствии с законом изменения передаваемого сигнала, при ФМ фаза колебаний изменяется в зависимости от передаваемого сигнала.



Амплитудная модуляция (АМ)



Частотная модуляция (ЧМ)

Рис. 4.71. Амплитудная и частотная модуляции: колебания звуковой частоты (а); ток в антенне передатчика (б)

При ЧМ значительно ослабляются помехи в радиоприемнике. Спектр излучаемых частот при ЧМ шире, чем АМ. ЧМ и ФМ взаимосвязаны: ЧМ является одновременно ФМ, и наоборот.

Функциональные схемы радиопередатчиков

Функциональная схема радиопередатчика с АМ в общем виде показана на рисунке 4.72 и включает в себя:

- микрофон (ВМ);
- усилитель низкой (звуковой) частоты (УНЧ);
- модулятор (М);
- усилитель высокой частоты (УВЧ);
- передающую антенну (А).

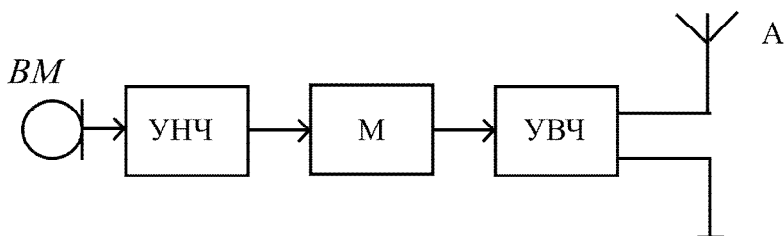


Рис. 4.72. Функциональная схема радиопередатчика с АМ

Схема передатчика, в котором используется частотная или фазовая модуляция, показана на рисунке 4.73. Колебания с УНЧ поступают в балансный модулятор (БМ), с выхода которого через

фазосдвигающую схему (фазоинвертор – ФИ), переворачивающую их фазу на 90^0 , эти сигналы подаются на смеситель (СМ). В СМ происходит сложение этих колебаний с колебаниями постоянной амплитуды, подаваемыми от автогенератора (АГ). Затем эти колебания усиливаются в УВЧ и передаются антенной.

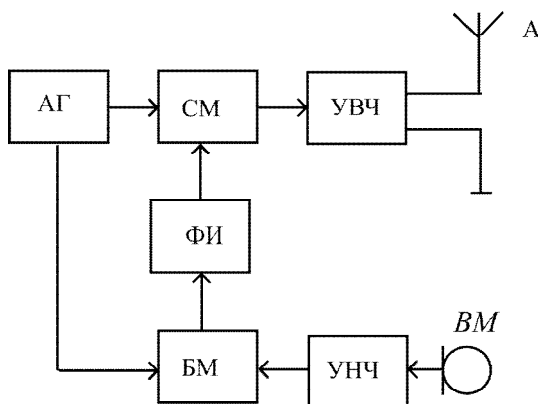


Рис. 4.73. Функциональная схема передатчика с ЧМ или ФМ

Основные параметры радиопередатчиков

К электрическим параметрам относятся:

- 1) категория и вид передаваемых сигналов;
- 2) диапазон рабочих частот;
- 3) эффективно-передаваемая полоса частот;
- 4) полезная мощность передатчика;
- 5) стабильность частоты излучаемых колебаний;
- 6) коэффициент полезного действия (к. п. д);
- 7) способ электропитания;
- 8) степень искажения передаваемых сигналов;
- 9) входное сопротивление нагрузочных устройств и допускаемые колебания этого сопротивления;
- 10) степень фильтрации гармонических составляющих колебаний.

К конструктивным параметрам относятся:

- 1) конструктивное выполнение (стационарный, переносной);
- 2) характер настройки (фиксированная и плавная);
- 3) габаритные размеры и масса;
- 4) приспособленность к работе в различных условиях;

5) удобство управления, осмотра, ремонта.

Радиоприемные устройства (РПУ)

Классификация РПУ

Они классифицируются по тем же признакам, что и РПДУ (по назначению, условиям эксплуатации, излучаемой мощности, диапазону волн).

Кроме того, РПУ делятся по принципу построения схем на **приемники прямого усиления** (с усилением принятых колебаний, без изменения их частоты) и на **супергетеродинные** (с усилением принятых колебаний при помощи высокой вспомогательной частоты).

Основные параметры

1. Диапазон рабочих частот – интервал частот, в пределах которого приемник перестраивают при приеме.

2. Чувствительность – способность принимать слабые сигналы.

3. Максимальная мощность входного сигнала – наибольшая мощность принятого сигнала, при которой искажение выходного сигнала не превышает заданного значения.

4. Динамический диапазон – отношение максимальной мощности принятого сигнала в полосе пропускания РПУ к пороговой чувствительности.

5. Избирательность – способность приемника отличить полезный сигнал от помехи. Для оценки избирательности используют коэффициент прямоугольности K . Чем больше $K \rightarrow 1$, тем больше избирательность радиоприемника.

Приемники прямого усиления имеют $K \leq 0,39$, а в супергетеродинных приемниках – $K = 0,6 - 0,95$.

6. Частотная стабильность.

7. Номинальная выходная мощность.

Приемник прямого усиления состоит из антенны (А), входной цепи, где формируется сигнал ВЧ принимаемой станции и ослабляются сигналы других станций; одного (или нескольких) УВЧ; детектора для выделения НЧ сигналов и усилителя звуковой (низкой) частоты УНЧ, сигнал с которого подводится к воспроизводящему устройству (рис. 4.74).

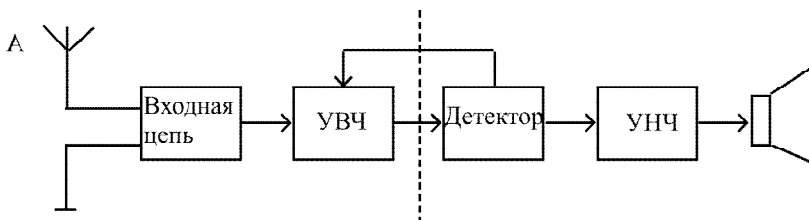


Рис. 4.74. Схема приемника прямого усиления

Супергетеродинный радиоприемник АМ сигналов (рис. 4.75) отличается от приемника прямого усиления наличием преобразователя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ). С его помощью усиленный сигнал ВЧ преобразуется в сигнал другой промежуточной частоты (ПЧ) и на этой частоте усиливается до поступления в детектор. ПЧ – высокая частота, на порядок выше модулирующей частоты. Форма огибающей АМ ВЧ сигнала после преобразования должна остаться без изменения.

Преобразователь состоит из смесителя и гетеродина. Гетеродин – автогенератор ВЧ, перестраиваемый при настройке на радиостанцию.

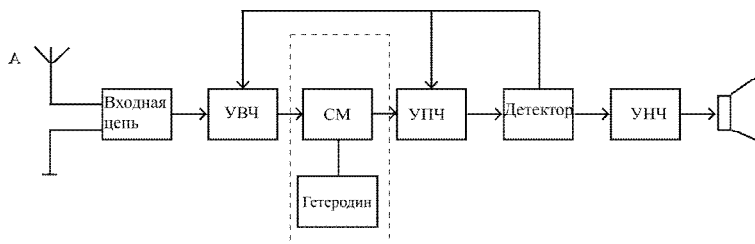


Рис. 4.75. Схема аналогового супергетеродинного приемника

Частота преобразуется в смесителе, куда поступают усиленные сигналы ВЧ из антенны и гетеродина. На выходе преобразователя выделяются колебания с промежуточной частотой с помощью многозвенных фильтров. Частоты других сигналов, возникающих в смесителе, лежат вне полосы пропускания фильтра.

УПЧ работает в режиме усиления сигналов одной (промежуточной) частоты, что обеспечивает нужное для нормальной работы детектора стабильное усиление сигналов. Частотный детектор преобразует модулированный по частоте сигнал с постоянной амплитудой в сигнал, амплитуда которого изменяется по законам

модуляции, с последующим детектированием его по амплитуде. Приемники этого типа более помехоустойчивы, чувствительны и избирательны, чем РПУ АМ сигналов.

Схема супергетеродинного приемника аналоговых сигналов, выполненного с использованием цифровых элементов, приведена на рисунке 4.76 [3].

Здесь выделенное детектором напряжение поступает на АЦП и вводится в цифровой коде в микропроцессор, который производит его обработку по заданному алгоритму. Затем сигнал поступает на вход ЦАП, который преобразует его в аналоговую форму и подает на аналоговый усилитель частоты.

В полностью цифровых системах связи, в которых сигнал передается в цифровом виде, сигнал с выхода детектора поступает непосредственно на микропроцессор.

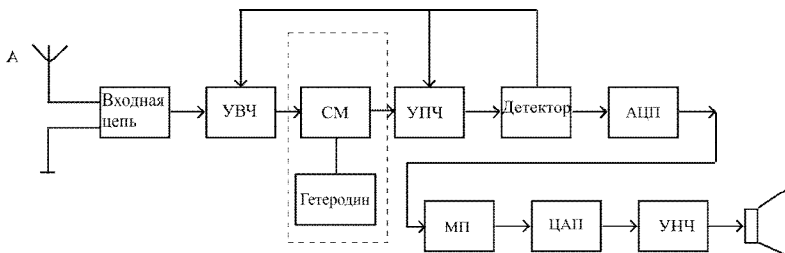


Рис. 4.76. Схема цифрового супергетеродинного приемника

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните принцип радиосвязи.
2. Какие типы радиоволн вы знаете? Чем они характеризуются и отличаются друг от друга?
3. Что представляет собой антенна?
4. Назовите основные параметры радиопередатчиков устройств.
5. Приведите функциональную схему АМ-радиопередатчика и объясните назначение ее элементов.
6. Приведите функциональную схему передатчика с ЧМ или ФМ и объясните назначение ее элементов.
7. Перечислите основные параметры радиоприемных устройств.
8. Чем отличаются схема супергетеродинного приемника от схемы приемника прямого усиления?
9. Чем отличаются схема аналогового супергетеродинного приемника от схемы цифрового приемника?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миловзоров, О. В. Электроника : учебник для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2015. – 408 с.

2. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства: учебник для студентов вузов по специальности телекоммуникационного и радиотехнического профилей / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание, 2011; М. : ИНФРА-М, 2011. – 688 с.

3. Электроника [Электронный ресурс]: электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Электроника» для специальности 74 06 05 Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства (по направлениям); направления специальности: 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика), 1-74 06 05-02 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика) / Минсельхозпрод РБ, УО «БГАТУ», АЭФ, кафедра АСУП ; сост. : И. П. Матвеевко, Т. А. Костилова. – Электронные данные (16 642 048 байт). – Минск : БГАТУ, 2020.

4. Бладыко, Ю. В. Электроника. Практикум : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Паротурбинные установки атомных электрических станций», «Тепловые электрические станции» / Ю. В. Бладыко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2016. – 190 с.

5. Новиков, Ю. В. Основы микропроцессорной техники : учебное пособие / Ю. В. Новиков, П. К. Скоробогатов. – 4-е изд., испр. – М. : Интернет-Университет информационных технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 358 с.

6. Червяков, Г. Г. Электронные приборы : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 200100 – Приборостроение / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. – Ростов н/Д : Феникс, 2012. – 334 с.

7. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учебник / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – 2-е изд., стереотип. – М. : Горячая линия-телеком, 2016. – 768 с.

8. Новожилов, О. П. Основы микропроцессорной техники. В 2 т. : учебное пособие. / О. П. Новожилов. – 3-е изд. – М. : РадиоСофт, 2014. – Т. 1. – 432 с.

9. Новожилов, О. П. Основы микропроцессорной техники. В 2 т. : учебное пособие. / О. П. Новожилов. - 3-е изд. – М. : РадиоСофт, 2014. – Т. 2. – 336 с.

10. Гальперин, М. В. [Электронная техника]: учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по группам специальностей «Приборостроение», «Электроника и микроэлектроника, радиотехника и телекоммуникации», «Автоматизация и управление», «Информатика и вычислительная техника» / М. В. Гальперин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2014. – 352 с.

11. Ямпурин, Н. П. Электроника : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Телекоммуникации» / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. – М. : Академия, 2011. – 238 с.

12. Васильков, А. В. Источники электропитания: учебное пособие для студентов общеобразовательных учреждений среднего профессионального образования / А. В. Васильков, И. А. Васильков. – М. : ФОРУМ, 2012. – 400 с.

13. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника : учебное пособие. – 3-изд. перераб. и доп. / Е. П. Угрюмов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 816 с.

14. Иванов, В. Н. Электроника и микропроцессорная техника : учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / В. Н. Иванов, И. О. Мартынова. – М. : Академия, 2016. – 282 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Матвеенко Ирина Петровна

ЭЛЕКТРОНИКА

Пособие

Ответственный за выпуск *А. Г. Сеньков*

Редактор *Г. В. Анисимова*

Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*

Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 17.12.2020. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 16,74. Уч.-изд. л. 13,09. Тираж 90 экз. Заказ 677.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№1/359 от 09.06.2014.

№2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.