

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники

Кафедра электронных приборов

ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКУ

Учебное пособие
для студентов направления «Электроника и микроэлектроника»
(специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)

2011

Агеев Евгений Юрьевич

Введение в электронику: учебное пособие для студентов направления «Электроника и микроэлектроника» (специальность 210105 – Электронные приборы и устройства) / Е.Ю. Агеев. Министерство образования и науки Российской Федерации, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2011. – 120 с.

Целью преподавания курса “ Введение в электронику” является:

- изучение физических процессов, происходящих в электронных приборах;
- изучение свойств и характеристик устройств, содержащих электронные приборы;
- ввести студента в круг знаний, умений и навыков, составляющих основы проектирования и управления электронными приборами.

В задачи изучения дисциплины входят изучение не только традиционных полупроводниковых электронных приборов, но и основ проектирования технологической радиотехнических схем с применением ЭВМ, построения алгоритмов, формализованных и математических моделей.

В результате изучения дисциплины студенты должны приобрести навыки проектирования и эксплуатации электронных приборов, умение проводить научные исследования и эксперименты в области анализа электронных приборов, обрабатывать и анализировать полученные результаты.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
«__» _____ 2011 г.

ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКУ

Учебное пособие
для студентов направления «Электроника и микроэлектроника»
(специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)

Разработчик
_____ Е.Ю. Агеев
«__» _____ 2011 г.

Оглавление

1. Природа электрических явлений.....	5
1.1. Электрическое поле.....	6
1.2. Электрический ток.....	9
1.3. Магнитное поле.....	14
1.4. Идеальные модели и свойства источников тока.....	20
1.5. Тепловое действие электрического тока.....	23
2. Линейные элементы и измерения в электрических цепях.....	26
2.1. Резисторы.....	26
2.2. Соединение резисторов, делитель напряжения.....	30
2.3. Конденсаторы.....	36
2.4. Катушки индуктивности.....	40
2.5. Электрические измерения.....	42
3. Переменный электрический ток.....	46
3.1. Закон изменения и характеристики переменного тока.....	46
3.2. Емкость в цепи переменного тока.....	50
3.3. Индуктивность в цепи переменного тока.....	51
3.4. Электрические цепи с частотно-зависимыми элементами.....	53
3.5. Действующие значения тока и напряжения, мощность в цепи переменного тока.....	55
3.6. Электрический трансформатор.....	58
4. Нелинейные элементы в электрических цепях.....	62
4.1. Полупроводниковый диод.....	62
4.2. Биполярный транзистор.....	71
4.3. Полевой транзистор.....	76
4.4. Тиристор.....	80
5. Построение аналоговых электронных схем.....	83
5.1. Параметрический стабилизатор.....	83

5.2. Эмиттерный повторитель.....	86
5.3. Усилитель на транзисторе ОЭ.....	90
5.4. Использование обратной связи в усилительных схемах.....	92
5.5. Стабилизатор с обратной связью.....	94
6. Цифровая электроника.....	100
6.1. Принципы цифровой электроники.....	100
6.2. Алгебра булевой алгебры.....	101
6.3. Логические элементы.....	103
6.3. Элементы памяти.....	107
6.4. Микросхемы комбинационной логики.....	111
6.5. Программируемые логические микросхемы.....	116
Список рекомендуемой литературы.....	118

1. Природа электрических явлений

Электрические явления, например разряды молний, наблюдались людьми с незапамятных времен. Тем не менее, именно электричество и связанный с ним магнетизм еще не так давно - в 18 веке были слабо изучены. Наше сегодняшнее представление об электрических явлениях родилось в ходе многочисленных экспериментальных исследований и научных споров. Долгое время считалось, что электрические явления связаны с особой невидимой жидкостью - электрическим флюидом. Следы этих дискуссий мы можем видеть и сейчас в сохранившейся терминологии, например, мы пользуемся термином «сила тока», хотя обозначаемая этим термином физическая величина не имеет смысла какой бы то ни было силы. Хорошо вам известный закон Кулона был открыт англичанином Джозефом Пристли в 1767 году. Однако в опубликованной им работе закон был сформулирован таким образом, словно у автора не было уверенности в его справедливости. Поэтому в течение последующих 18 лет вопрос о законе взаимодействия электрических зарядов оставался открытым. Точку в дискуссии поставил французский физик Огюст Кулон. В 1785 году он провел ряд опытов с очень точными крутильными весами и в результате сформулировал закон, получивший его имя, в том виде, в каком он существует и сейчас. Законы же, связывающие электрические и магнитные явления, были открыты Ампером, Фарадеем и рядом других исследователей гораздо позже, - в 20-х – 30-х годах 19 века. И лишь к концу 19 века Максвелл, Герц и ряд других ученых, развивая идеи Фарадея об электрическом поле, создали современную электродинамику. История развития этой науки насчитывает немногим более 100 лет, она еще очень молода и продолжает развиваться, электрические явления далеко не до конца изучены. Но, несмотря на это, мы научились практически использовать электричество, большинство технологических достижений современной цивилизации не только тесно связано, но и основано на электрической энергии и

электрических сигналах.

1.1. Электрическое поле

Электрические заряды создают в окружающем пространстве **электрическое поле** (рис. 1), оно изображается в виде силовых линий – линий сил кулоновского взаимодействия зарядов. Предложил концепцию электрического поля замечательный английский физик-самоучка Майкл Фарадей. Сам он верил в то, что силовые линии электрического поля реально существуют в пространстве, окружающем заряды. Однако его современники восприняли эту идею очень скептически. Долгое время изображение силовых линий считалось не более чем удобным способом формального представления действия электрического заряда на другие заряды, не имеющим ничего общего с реальностью. В 20 веке физики пришли к мнению, что электрический заряд окружен облаком квантов электрического поля, таким образом, идея Фарадея о физической реальности существования электрического поля подтвердилась.

Электрическое поле – пространство, в котором проявляется действие на электрические заряды.

На изображении силовых линий стрелками указывается направление действия силы, а густота линий показывает величину силы. Для количественной оценки поля удобно использовать силу, с которой электрическое поле, созданное произвольным зарядом, действует на единичный пробный заряд. Такая характеристика электрического поля называется **напряженностью**.

Напряженность электрического поля в произвольной точке пространства численно равна силе, с которой электрическое поле действует на единичный пробный заряд, внесенный в эту точку, и имеет направление в сторону действия силы.

Напряженность электрического поля – векторная величина.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.1)$$

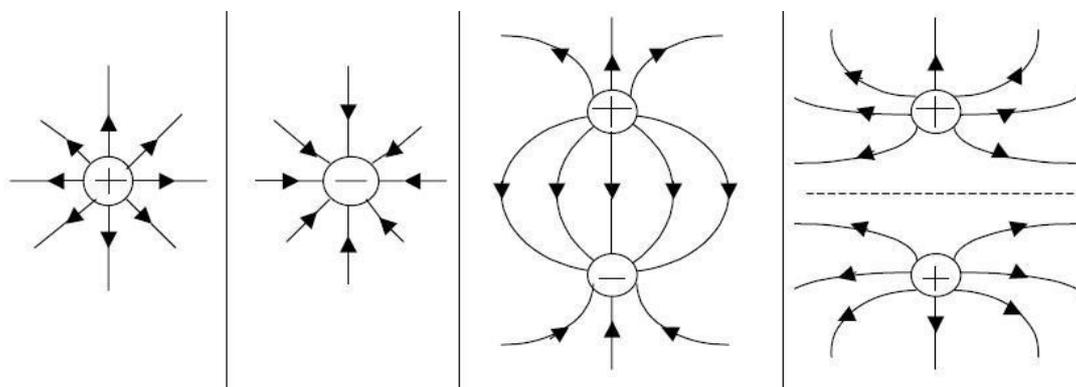


Рис. 1. Картина силовых линий электрического поля.

Чтобы количественно представить электрическое поле не обязательно использовать кулоновскую силу. Это можно сделать через энергию пробного заряда, внесенного в поле. Для одноименных зарядов в процессе перемещения пробного заряда из бесконечно удаленной точки, где действие поля не проявляется, в какую-либо точку вблизи заряда, создающего электрическое поле, совершается работа по преодолению кулоновских сил отталкивания, а сам пробный заряд приобретает определенную потенциальную энергию. Если его не удерживать в указанной точке, то он вновь устремится в бесконечно удаленную точку, благодаря имеющейся у него потенциальной энергии. При этом совершаемая по перемещению заряда работа и приобретаемая этим зарядом потенциальная энергия равны по величине. Характеристику электрического поля, показывающую потенциальную энергию единичного пробного заряда в электрическом поле назвали электрическим **потенциалом**.

Потенциал электрического поля в какой-либо точке - величина, численно равная потенциальной энергии единичного заряда, помещенного в эту точку поля.

Электрический потенциал величина скалярная, это просто число, а не

вектор, как напряженность электрического поля. Очевидно, что определение потенциала может быть дано и через работу по перемещению единичного пробного заряда из точки с нулевым потенциалом в произвольную точку поля.

Поскольку и напряженность, и потенциал являются количественными характеристиками одного и того же физического явления – электрического поля, они связаны друг с другом. Зная распределение потенциала можно вычислить напряженность электрического поля и наоборот.

Если соединить все точки электрического поля, имеющие одинаковый потенциал, получим поверхность равного потенциала, окружающую заряд. Такие поверхности называют **эквипотенциальными**. Электрические свойства пространства, окружающего заряд влияют на форму эквипотенциальной поверхности. Такая поверхность будет иметь форму сферы только в том случае, когда свойства окружающего заряд пространства одинаковы во всех направлениях.

На рис. 2 представлено изображение электрического заряда в однородной среде, показаны силовые линии электрического поля и эквипотенциальные поверхности одиночного заряда и системы из двух зарядов разного знака. Разность потенциалов между двумя точками в электрическом поле имеет физический смысл работы по перемещению единичного заряда из одной точки в другую, она получила название электрического **напряжения**.

$$U = \phi_1 - \phi_2 \quad (1.2)$$

Чтобы определить полную работу при перемещении не единичных, а более крупных зарядов, нужно напряжение умножить на величину заряда:

$$A = q \cdot U \quad (1.3)$$

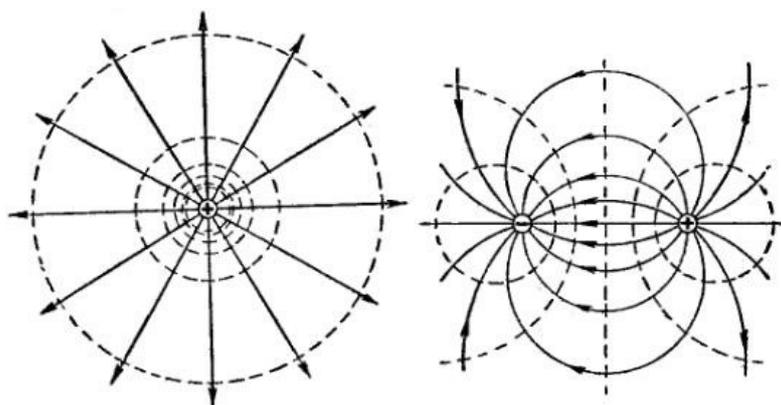


Рис. 2. Изображение эквипотенциальных поверхностей для электрического поля, созданного единичным зарядом (слева) и для системы из положительного и отрицательного зарядов (справа).

1.2. Электрический ток

Всем хорошо известно определение электрического тока как упорядоченного (направленного) движения заряженных частиц. Однако такое определение не является полным, а потому его нельзя признать верным. В нем оставлены без внимания важные моменты определения причины возникновения тока и результата его действия, неразрывно связанные с определением самого понятия «электрический ток». Прежде всего, требует уточнения тот факт, что направленное движение заряженных частиц не может быть самопроизвольным, оно всегда возникает под действием внешней силы. В то же время, электрический ток всегда связан с переносом заряда, и если результирующий перенос заряда равен нулю, то и ток будет равен нулю, т.е. тока не будет. Хотя при этом может наблюдаться вполне упорядоченное движение в одном направлении заряженных частиц разных знаков. Таким образом, корректное определение электрического тока звучит так:

Электрический ток – направленное движение заряженных частиц, возникающее под действием внешней силы и приводящее к переносу заряда.

Электрический ток, протекающий в одном направлении, получил название **по-**

стоянного тока, а периодически изменяющий направление протекания, - **переменного тока**. Исторически постоянный электрический ток раньше нашел прикладное применение и начал использоваться в производстве и быту. Явления, происходящие при протекании переменного тока несколько сложнее, поэтому этот вид тока будет рассмотрен подробно позже. Здесь и далее, говоря об электрическом токе, мы будем иметь в виду постоянный электрический ток, кроме специально оговоренных случаев.

Электрический ток характеризуется определенной **величиной**, связанной с количеством перенесенного заряда и **направлением** движения заряженных частиц. Для количественной характеристики электрического тока используется понятие **силы тока**.

Сила тока равна заряду, перенесенному электрическим током в единицу времени, другими словами – сила тока характеризует скорость движения зарядов.

Среднее значение тока определяется выражением

$$I = \frac{Q}{t}, \quad (1.4)$$

а мгновенное значение

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (1.5)$$

За положительное направление электрического тока принято движение положительно заряженных частиц или, что то же самое, движение от более высокого потенциала к более низкому.

Какие же силы могут приводить в движение заряженные частицы? На практике в качестве таких сил чаще всего выступают кулоновские силы внешнего по отношению к заряженным частицам электрического поля.

Электрический ток возникает в конкретной физической среде, веществе или материале. Различные материалы классифицированы по способности проводить электрический ток на три категории:

- проводники - содержат большое число слабо связанных с атомами (и потому получивших наименование свободных) электронов. Проводники хорошо проводят электрический ток. Под действием внешнего электрического поля электроны приходят в движение, перенося заряд от одного конца проводника к другому – в проводнике возникает электрический ток;
- изоляторы - практически не содержат свободных электронов. Изоляторы не проводят электрического тока. Под действием приложенного внешнего электрического поля электрический ток в них практически не возникает;
- полупроводники - занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами, концентрация свободных заряженных частиц в полупроводниках значительно больше, чем в изоляторах, но существенно меньше, чем в проводниках. Под действием внешнего электрического поля в полупроводнике возникает слабый электрический ток. Величина этого тока сильно зависит от температуры, при повышении температуры концентрация свободных заряженных частиц в полупроводнике значительно возрастает.

Итак, для возникновения электрического тока необходимо приложить внешнее электрическое поле к проводнику.

Устройства, создающие электрическое поле, прикладываемое к проводнику, называют «источниками тока». Необходимо ясно понимать, что такие устройства всегда создают не ток, а разность потенциалов или напряжение на своих выводах. Возникающий в проводнике, подключенном к «источнику тока», ток – результат действия на проводник электрического поля, созданного таким «источником тока». Название же связано с тем, что, в конечном счете, использование такого устройства приводит к

возникновению тока в цепи.

Термин «источник тока» - устоявшийся и широко используемый, поэтому мы его также будем применять. Согласно закону Кулона в свободном от зарядов пространстве электрическое поле убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от создающего это поле заряда. Картина меняется, если электрическое поле создается в веществе, содержащем свободные заряды. Например, в проводниках концентрация носителей заряда очень велика, каждый из них создает собственное электрическое поле. Конечно, поле свободных зарядов скомпенсировано и в целом проводник электрически нейтрален и не несет заряда, но приложение к проводнику внешнего электрического поля нарушает баланс электронейтральности. Свободные носители заряда, благодаря своей подвижности, смещаются вдоль проводника, «передавая» возмущение со стороны электрического поля. Таким образом, в проводнике, являющемся частью электрической цепи, напряженность электрического поля определяется не законом Кулона, а приложенным напряжением и величиной возникающего электрического тока.

Закон, позволяющий определять величину тока, был открыт немецким физиком Георгом Омом в 1826 году. Он имеет две формулировки: для участка электрической цепи и для полной цепи:

***Закон Ома для участка электрической цепи** - величина тока прямо пропорциональна приложенному напряжению с коэффициентом $1/R$*

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.6)$$

Введенная Омом в коэффициенте пропорциональности величина R получила название сопротивления и позволила количественно сравнить способность различных материалов проводить электрический ток. Так сопротивление проводников, как правило, имеет очень малые значения, а изоляторов, наоборот, -

очень большое.

Сопротивление зависит не только от физической природы материала, но и от его геометрических размеров - длины и площади поперечного сечения. С увеличением длины сопротивление растет, т.к. уменьшается разность потенциалов, приходящаяся на единицу длины, а значит и сила, действующая на свободные заряды со стороны электрического поля. При увеличении сечения сопротивление уменьшается, т.к. в движении под действием электрического поля принимает участие большее количество заряженных частиц.

Закон Ома для полной цепи – величина тока в замкнутой электрической цепи пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

$$I = \frac{E}{R+r} \quad (1.7)$$

Необходимо подчеркнуть важное условие существования электрического тока:

Электрический ток возникает только в замкнутой электрической цепи, содержащей источник тока, создающий напряжение на концах этой цепи.

Любой источник тока имеет ЭДС (электродвижущую силу) – неэлектрическую силу, работающую внутри источника тока, разделяющую в нем заряды разного знака и приводящую к возникновению напряжения на выводах источника тока. Именно потому, что ЭДС должна нарушить равновесие зарядов внутри источника тока и создать разность потенциалов на его выводах, она не может быть силой электрической, кулоновской.

Движение зарядов во внешней, по отношению к источнику тока, части цепи поддерживается кулоновскими силами притяжения разноименных зарядов, движение же зарядов внутри источника тока обеспечивается сторонней, неэлектрической силой, что позволяет переносить заряды против действия электрического поля и замыкает цепь. Другими словами, если во внешней цепи

электрический ток направлен от плюса к минусу, внутри источника тока этот ток должен пройти от минуса к плюсу, чтобы цепь замкнулась. И точно так же, как внешняя цепь имеет сопротивление протеканию тока, внутренняя цепь источника тока также имеет некоторое сопротивление. Суммарный ток, согласно закону Ома для полной цепи, будет определяться ЭДС источника тока и полным сопротивлением цепи, под которым понимается сумма внешнего сопротивления цепи и внутреннего сопротивления источника тока.

На одном конце электрической цепи источник тока поддерживает высокий электрический потенциал, на другом низкий. Изменение потенциала вдоль цепи, соединяющей выводы источника тока, будет равномерным и плавным только в том случае, если материал самой электрической цепи однороден и имеет одинаковое удельное сопротивление по всей длине. Если электрическая цепь неоднородна и содержит как участки с низким сопротивлением (проводники), так и участки с высоким сопротивлением, то изменение (падение) потенциала будет происходить главным образом на участках с высоким сопротивлением. Для определения величины падения напряжения можно использовать закон Ома для участка электрической цепи. Вдоль проводника падением потенциала, как правило, можно пренебречь, считая его одинаковым по всей длине проводника.

1.3. Магнитное поле

Магнитные свойства некоторых веществ были известны в глубокой древности. Еще древние греки знали, что кусочки магнитного железняка могут притягиваться и отталкиваться. Магнитный компас был известен в Китае к 200 г., в Европе его стали использовать в 13 веке. Однако зачастую явления притяжения и отталкивания между наэлектризованными и намагниченными телами не разделяли. То, что это два различных явления впервые показал английский естествоиспытатель Уильям Гильберт в работе, опубликованной в 1600 г. В то же время, некоторые факты, например, намагничивание металлических предме-

тов при ударе молнии, показывали, что между этими явлениями есть какая-то связь. Обнаружить такую связь удалось датскому физику Хансу Эрстеду в 1820 г. Эрстед экспериментально показал, что при включении электрического тока магнитная стрелка, расположенная параллельно проводу с током, отклоняется перпендикулярно ему. Открытие Эрстеда вызвало большой резонанс, многие исследователи занялись изучением вопроса взаимосвязи электрических и магнитных явлений. Французы Жан Батист Био и Феликс Савар в том же 1820 году выполнили анализ эффекта, обнаруженного Эрстедом и вывели закономерность, описывающую магнитную силу, создаваемую проводом с электрическим током. Позднее этот закон получил название закона Био-Савара. В это же время Андре Мари Ампер проводит эксперименты по взаимному влиянию двух проводников с электрическим током и формулирует закон, известный сейчас как закон Ампера. В 1821 г. Майкл Фарадей предлагает идею магнитных силовых линий, на которую его натолкнули известные эксперименты по ориентации в магнитном поле железных опилок. Так возникло представление о **магнитном поле**.

Магнитное поле – пространство, в котором проявляется действие на электрические токи (движущиеся заряды)

Магнитные силовые линии, в отличие от силовых линий электрического поля, замкнуты, они не имеют начала и конца. Поэтому магнитных зарядов, подобных зарядам электрическим, не существует.

Магнитные силовые линии позднее получили название линий **магнитной индукции**. Магнитная индукция (обозначается **\mathbf{B}**) - силовая характеристика магнитного поля,. Количественно величина магнитной индукции определена законом Ампера, как предел отношения силы, действующей со стороны магнитного поля на элемент проводника с электрическим током, к произведению тока и длины элемента проводника, если длина этого элемента стремится к нулю, а его расположение таково, что этот предел имеет максимальное значение:

$$\vec{B} = \frac{1}{I} \cdot \frac{d\vec{F}}{dl} \quad (1.8)$$

Магнитные силовые линии показывают не направление действия силы на элемент тока (или движущийся заряд), внесенный в магнитное поле, а направление ориентации магнитной стрелки в данной точке магнитного поля. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, направлена перпендикулярно по отношению к магнитным силовым линиям, она получила название **силы Ампера**. Известное **правило левой руки** позволяет определить направление действия силы:

***Правило левой руки.** Если ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали бы направление электрического тока, то отставленный под прямым углом большой палец укажет направления силы, действующей со стороны поля на проводник*

На рис. 3 показано действие силы Ампера на проводник с током в магнитном поле. Плотность магнитных силовых линий с одной стороны проводника с током оказывается выше, чем с другой, это и приводит к возникновению силы, выталкивающей провод в сторону.

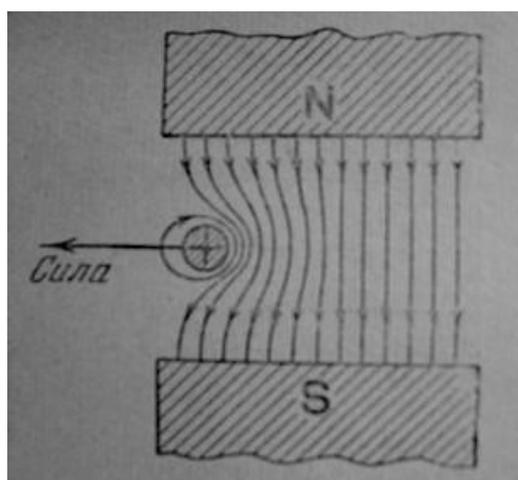


Рис. 3. Природа возникновения магнитной силы.

Вокруг проводника с током магнитные силовые линии образуют концентрические окружности - рис. 4.

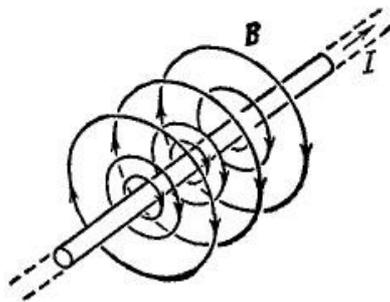


Рис. 4. Картина магнитных силовых линий, окружающих провод с током.

А вокруг витка или катушки с током (рис. 5) становятся подобны силовым магнитным линиям постоянного магнита.

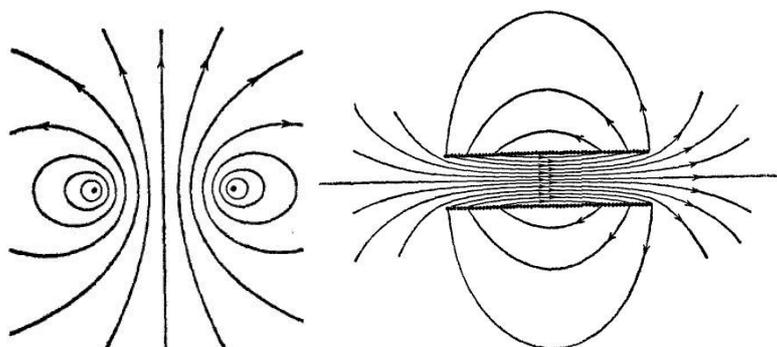


Рис. 5. Картина магнитных силовых линий витка с током (слева) и катушки (справа).

Величина магнитной индукции может сильно изменяться при внесении в магнитное поле материалов, названных **ферромагнетиками**, Эти материалы способны намагничиваться, многократно усиливая внешнее магнитное поле. Если обозначить магнитную индукцию в вакууме B_0 , то влияние намагниченного вещества можно охарактеризовать выражением:

$$B = \mu \cdot B_0, \tag{1.9}$$

где μ – относительная магнитная проницаемость вещества, показывающая во сколько раз магнитная индукция в данном веществе больше, чем в вакууме. Характеристика магнитного поля, свободная от такого влияния, получила название **напряженности** магнитного поля, обозначается **H**. Для вакуума:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}, \quad (1.10)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

В веществе

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \cdot \mu_0}. \quad (1.11)$$

Ферромагнетики широко применяются в электронных устройствах. Возникновение ферромагнетизма связано с наличием в этих материалах малых областей – **доменов** с самопроизвольной намагниченностью. При воздействии внешнего магнитного поля домены начинают ориентироваться вдоль силовых линий поля, и собственное магнитное поле доменов складывается с внешним полем, увеличивая значение магнитной индукции. Однако при повышении напряженности внешнего магнитного поля наступает момент, когда все домены ферромагнетика оказываются полностью ориентированными вдоль силовых линий внешнего поля. Говорят, что наступает **насыщение** ферромагнетика. После достижения насыщения увеличение магнитной индукции может происходить только за счет внешнего магнитного поля. Таким образом, относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков не постоянная величина и зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Выражение (1.9) справедливо только в диапазоне небольших значений напряженности магнитного поля.

Все остальные вещества по отношению к магнитному полю имеют свойства **диамагнетиков** ($\mu < 1$) или **парамагнетиков** ($\mu > 1$). Значение магнитной проницаемости этих веществ мало отличается от относительной магнитной проницаемости вакуума, равной 1 и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Роль, аналогичную силе тока в электрической цепи в магнитной цепи играет **магнитный поток**. Если линии вектора магнитной индукции перпендикулярны некоторой поверхности, то магнитный поток через поверхность опреде-

ляется как

$$\Phi = B \cdot S \quad (1.12)$$

Магнитное поле создается электрическими токами или движущимися зарядами и действует на токи или движущиеся заряды. На неподвижные заряды постоянное магнитное поле не действует. Однако меняющееся магнитное поле способно создавать **индукционный ток**. При изменении магнитного поля неподвижные заряды, попадающие в область меняющегося магнитного поля, будут приходить в движение под действием особого электрического поля, порожденного изменяющимся магнитным полем. Это явление было открыто Майклом Фарадеем в 1831 г. Он показал, что ЭДС индукции, возникающей в одном витке проводника, пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь, охватываемую этим проводником. Русский физик Эмилий Ленц в 1833 г. сформулировал правило определения направления индукционного тока, согласно этому правилу индукционный ток направлен таким образом, что его магнитное поле препятствует изменениям вызывающего индукционный ток магнитного потока.

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.13)$$

1.4. Идеальные модели и свойства источников тока

Как уже было отмечено, несмотря на применение термина «источник тока» все источники тока создают напряжение на своих выводах. К возникновению тока приводит это напряжение, т.е. ток является следствием того, что к электрической цепи приложено напряжение. Однако существуют две модели идеальных источников, именуемые «источник тока» и «источник напряжения».

***Идеальный источник напряжения** – устройство, поддерживающее неизменное напряжение на своих выводах при подключении внешней электрической цепи, независимо от сопротивления этой цепи.*

Идеальный источник напряжения должен иметь нулевое внутреннее сопротивление. В этом случае падение напряжения будет происходить только на внешнем по отношению к источнику сопротивлении, ЭДС источника будет совпадать с напряжением на его выводах и останется неизменным при любой нагрузке.

Идеальный источник тока – устройство, поддерживающее неизменный ток во внешней электрической цепи при любом сопротивлении этой цепи.

Идеальный источник тока для поддержания неизменного тока в электрической цепи должен автоматически изменять напряжение на своих выводах при изменении внешнего сопротивления. Внутреннее сопротивление такого источника должно быть бесконечно большим для того, чтобы изменение сопротивления во внешней цепи не могло повлиять на величину тока. В реальных источниках тока стремятся уменьшить внутреннее сопротивление, поэтому они по своим характеристикам близки к идеальным источникам напряжения.

Выясним, как изменяется напряжение на выводах источника тока при уменьшении внешнего сопротивления цепи, часто называемого также **нагрузочным** сопротивлением. На рис. 6 показаны три режима работы источника тока.

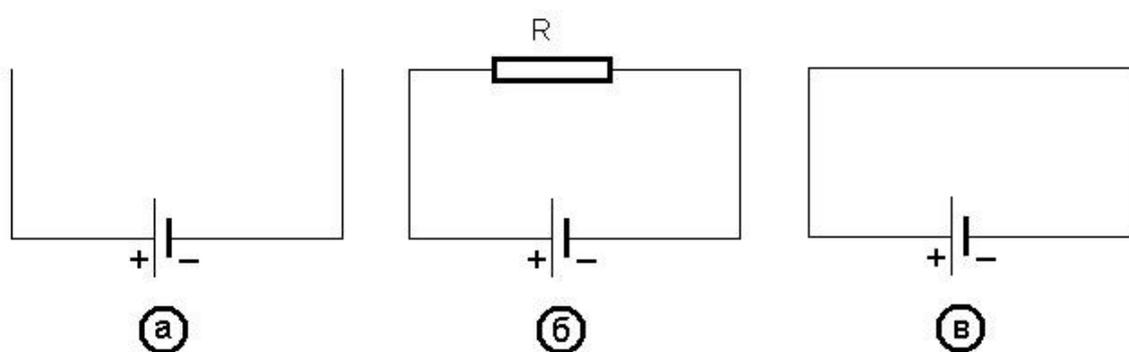


Рис. 6. Три режима работы источника тока.

В первом случае (рис. 6 а) выводы источника тока разомкнуты, сопротивление нагрузки в этом случае бесконечно велико, а ток через нее равен нулю. Этот ре-

жим получил название режима **холостого хода**, сокращенно ХХ. В режиме ХХ напряжение на выводах источника тока совпадает с величиной ЭДС. Во втором случае (рис. 6 б) напряжение, согласно закону Ома для полной цепи (1.7), можно записать как:

$$U = E - I \cdot r . \quad (1.14)$$

Чем больше ток, протекающий в цепи, тем меньше напряжение на выводах источника тока и тем больше оно отличается по величине от значения ЭДС. Наконец в третьем случае (рис. 6 в), когда внешнее сопротивление уменьшено до нуля, напряжение на выводах источника тока становится нулевым. Этот случай получил название режима **короткого замыкания**, сокращенно КЗ. Ток в этом случае имеет максимально возможное значение и определяется отношением ЭДС к внутреннему сопротивлению источника тока.

В электрической цепи могут работать несколько источников тока одновременно. Между собой их можно соединить различными способами. Любой источник тока создает разность потенциалов на своих выводах, вызывающую движение зарядов по цепи в том или другом направлении. Два или более источников тока могут быть включены согласно или встречно, а также последовательно или параллельно по отношению друг к другу.

Согласным называется такое включение источников, при котором направление движения тока от одного и от другого источника совпадает, в противном случае включение называется **встречным**.

*Источники включены **последовательно***, если ток, вытекающий из одного источника, втекает в другой без разветвлений, при наличии разветвлений цепи включение источников **параллельное**.

Следующие правила помогут определить действующее в электрической цепи

результатирующее напряжение при соединении нескольких источников:

Правило 1. Точка соединения приобретает наивысший потенциал;

Правило 2. Напряжение на электрической цепи определяется разностью потенциалов между выводами электрической цепи.

Пример 1.1 На рис. 7 показано последовательное согласное включение двух источников. Один имеет ЭДС 10 В, другой 5 В. Определим результирующее напряжение между выводами электрической цепи. Будем считать, что потенциал отрицательного вывода источника, не включенного в электрическую цепь, имеет значение равное нулю. Тогда потенциал положительного вывода будет равен ЭДС источника. Мы выполнили соединение положительного вывода источника с ЭДС 5 В, имеющего потенциал 5 В и отрицательного вывода источника с ЭДС 10 В, имеющего потенциал 0 В. В соответствии с правилом 1, точка соединения приобретает наивысший потенциал, в нашем случае 5 В. Поскольку изменение потенциала отрицательного вывода никак не влияет на внутреннюю ЭДС источника, и между его выводами должна сохраниться прежняя разность потенциалов 10 В, следовательно потенциал положительного вывода должен возрасти до 15 В. Результирующее напряжение между выводами электрической цепи составит $15 \text{ В} - 0 \text{ В} = 15 \text{ В}$.

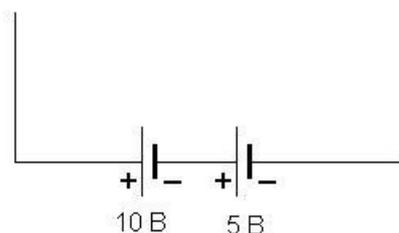


Рис. 7. Пример соединения двух источников тока.

1.5. Тепловое действие электрического тока

При протекании электрического тока источник тока совершает работу по переносу зарядов вдоль электрической цепи. Энергия источника тока преобразуется в нагрев элементов электрической цепи. Законы преобразования энергии в электрической цепи были найдены в 1841 - 44 гг. независимо друг от друга английским физиком Джеймсом Джоулем и русским физиком Эмилием Ленцем. Они определили, что нагревание проводов электрической цепи пропорционально их сопротивлению и квадрату силы тока, а также времени действия тока. Закон, открытый Джоулем и Ленцем назван их именами:

$$Q = I^2 R t . \quad (1.15)$$

Количество теплоты, выделяющееся в электрическом проводе эквивалентно совершаемой электрическим током работе. В таком случае легко определить мощность электрического тока, как работу, совершаемую в единицу времени.

1.5.1 Мощность и плотность тока

$$P = I^2 R = UI . \quad (1.16)$$

Существует много практических применений теплового действия электрического тока. Так, например, все бытовые электронагревательные приборы: электроплитки, утюги, паяльники и т.д. используют этот эффект, в электрических лампочках нагретая тугоплавкая проволока служит источником света, в плавких предохранителях тонкая проволока плавится при превышении силы тока сверх допустимого значения и разрывает электрическую цепь. Все это примеры полезного нагрева электрическим током, однако, такой нагрев происходит всегда при протекании тока и далеко не всегда он полезен. Для оценки нагрева провода током используют **плотность тока**.

Плотность тока – это сила тока, отнесенная к площади поперечного сечения проводника

Чтобы провод не перегревался, его подбирают исходя из определенных норм плотности тока. Допустимой плотностью тока для обычного изолированного медного провода считается величина порядка 10 А/мм^2 , более высокая плотность тока может привести к сильному нагреву провода, разрушению изоляции и даже пожару. Для алюминиевого провода допустимая плотность тока несколько ниже. В многослойных обмотках, где отвод тепла затруднен, типичным значением допустимой плотности тока считается 3 А/мм^2 и менее, в спиралях нагревательных элементов плотность тока может достигать 20 А/мм^2 и более.

Вопросы для самостоятельной проработки:

1. Какие силы, кроме кулоновских, могут привести в движение электрические заряды.
2. Можно ли в электрическом поле выделить замкнутую поверхность, электрический потенциал на которой – постоянная величина.
3. Что такое напряженность электрического поля.
4. Каков закон изменения напряженности электрического поля: в вакууме, в проводнике, подключенном к источнику тока. Поясните почему.
5. Что показывает направление силовых линий магнитного поля.
6. Что такое электрический ток, сформулируйте необходимые условия существования тока.
7. Чем отличается полная электрическая цепь от участка цепи и что такое полное сопротивление в случае полной цепи.
8. Почему в реальных источниках тока стремятся уменьшить внутреннее сопротивление.
9. В каких режимах может работать источник тока, поясните особенности этих режимов.

2. Линейные элементы и измерения в электрических цепях

Линейными элементами считаются такие элементы электрических цепей, для которых зависимости протекающего тока от приложенного напряжения можно описать линейными функциями.

2.1. Резисторы

Элементы электрической цепи, имеющие определенные значения сопротивления называются **резисторами**. В электрических цепях резистор задает необходимую величину тока или создает нужный потенциал в определенной точке. Условное обозначение резистора показано на рис. 8.

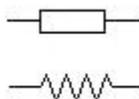


Рис.8. Условное обозначение резистора, сверху – на отечественных принципиальных схемах, внизу – на зарубежных

Промышленностью выпускается широкий спектр резисторов различного типа и назначения. Для обозначения резисторов, имеющих большие сопротивления, используются сокращения: килоом – $кОм$ и мегаом – $МОм$, $1 кОм = 10^3 Ом$, $1 МОм = 10^6 Ом$.

Номинальное значение (номинал) резистора, - значение, указанное на корпусе резистора. Номинальное значение сопротивления может отличаться от реально измеренного значения на величину не больше допуска.

На корпусе резистора номинальное значение указано в сокращенной форме, например, 4К7 означает $4,7 кОм$. Значение мегаомных сопротивлений содержит запятую или букву M , так если на корпусе надпись 1,0, это значит номи-

нальная величина сопротивления резистора 1 МОм . Сопротивления меньше килоома могут маркироваться только цифровым значением или совместно с символом Ω или E . Кроме номинального значения, резисторы разделяются по **допускам** и **мощности**.

Допуск резистора показывает, на какую величину реальное значение сопротивления резистора может отличаться от его **номинального** значения. Допуск определяется в процентах от номинального значения сопротивления.

Пример. 2.1 Номинальное значение резистора 18 кОм , допуск 10% , определить максимально и минимально возможные значения сопротивления.

Минимально возможное сопротивление: $18\text{ кОм} - 18\text{ кОм} * 0,1 = 16,2\text{ кОм}$;

Максимально возможное сопротивление: $18\text{ кОм} + 18\text{ кОм} * 0,1 = 19,8\text{ кОм}$.

Любой резистор номиналом 18 кОм и допуском 10% будет иметь сопротивление между $16,2\text{ кОм}$ и $19,8\text{ кОм}$.

Мощность резистора определяет максимальную рассеиваемую мощность и допустимый ток через резистор.

Резисторы разной мощности имеют различный размер, более мощные резисторы крупнее. На принципиальных схемах приводятся условные обозначения мощности резисторов, показанные на рис. 9

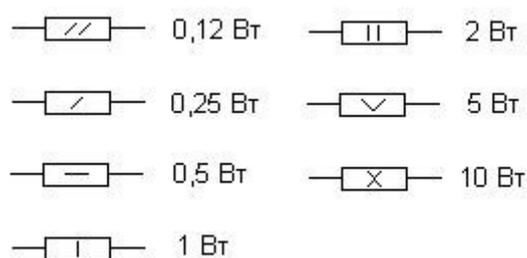


Рис. 9 Условное обозначение мощности сопротивлений

Проволочные резисторы изготавливают, наматывая голую проволоку из спе-

циального высокоомного сплава на керамическое основание, обычно трубчатое. Резисторы такого типа характеризуются постоянством величины, могут пропускать большой ток, однако довольно дороги и имеют большие габариты. Например, проволочными являются резисторы типа ПЭ (проволочные эмалированные), они выпускаются на номинальные значения от 20 Ом до 50 кОм с допусками ± 5 , ± 10 и ± 20 и мощностью от 15 до 150 Вт . Такие резисторы допускают нагрев до 300° С .

В более дешевых и распространенных отечественных непроволочных резисторах проводником служит слой углерода, как в резисторах типа ВС (высокостабильные) или металлического сплава, как в резисторах МЛТ (металлизированные, лакированные, теплостойкие). Слой этого материала наносится на керамическое или фарфоровое основание. В резисторах большого номинала после нанесения проводящего слоя на основание в нем прорезается по винтовой линии изолирующая канавка, так уменьшается площадь поперечного сечения и увеличивается длина проводящего слоя. При необходимости точной подгонки величины сопротивления можно, сняв надфилем лаковое покрытие, слегка подточить проводящий слой, сопротивление резистора при этом увеличится. Необходимо помнить, что сопротивление непроволочных резисторов не вполне постоянно, оно может непредсказуемо и необратимо измениться при сильном нагреве, действии значительных напряжений и других внешних факторов.

Сопротивления ВС выпускаются с номинальными значениями от 27 Ом до 10 МОм на мощность: $0,25$; $0,5$; 1 ; 2 ; 5 и 10 Вт с допусками: ± 5 , ± 10 и ± 20 . Эти сопротивления чувствительны к повышению температуры, для них допустим нагрев только до 90° С . Сопротивления типа МЛТ имеют номинальные значения от 1 Ом до 10 МОм и мощность $0,125$; $0,25$; $0,5$; 1 и 2 Вт . Они имеют такие же допуски, как сопротивления ВС, но более устойчивы к температуре, допускают нагрев до 250° С .

Если на отечественных резисторах маркировка наносится цифро-буквенная, то на импортных резисторах используется цветная маркировка в виде кру-

говых полосок, нанесенных поверх лаковой окраски. Цветные полоски нанесены ближе к одной из сторон резистора, – так указывается начало маркировки. Первые две полоски обозначают цифры десятков и единиц, третья полоска – множитель, перемножая цифры и множитель, получаем номинал резистора. Четвертая полоска обозначает допуск, пятая – надежность, однако обязательными являются только первые три, если четвертая полоска отсутствует, допуск равен 20%. В табл. 1 представлены цвета маркировочных полос, соответствующие цифрам, множителям и допускам.

Таблица 1

Цвет	Цифра	Множитель	Допуск
Серебряный	-	10^{-2} (0,01)	10%
Золотой	-	10^{-1} (0,1)	5%
Черный	0	10^0 (1)	
Коричневый	1	10^1 (10)	
Красный	2	10^2 (100)	2%
Оранжевый	3	10^3 (1000)	
Желтый	4	10^4 (10000)	
Зеленый	5	10^5 (100000)	
Голубой	6	10^6 (1000000)	
Фиолетовый	7	10^7 (10000000)	
Серый	8		
Белый	9		

Широкое распространение в электронных схемах имеют регулировочные и подстроечные переменные сопротивления. Переменные сопротивления имеют три вывода. Конструкция переменных резисторов может быть различной, но принцип один: третий вывод – **ползунок**, может механически перемещаться, удаляясь от одного из выводов резистора и приближаясь к другому. При этом изменяется сопротивление между каждым из выводов и ползунком, но для од-

ного вывода это сопротивление уменьшается, а для другого растет. Регулируемые сопротивления позволяют быстро изменять величину сопротивления от нуля до максимального значения и имеют ресурс не менее 10 тысяч полных поворотов. Подстроечные сопротивления предназначены для однократной настройки, после которой обычно фиксируются. Несмотря на то, что подстроечные сопротивления также могут изменять свою величину, управление ползунком этих сопротивлений затруднено и требует специального инструмента, ресурс их существенно ниже, порядка тысячи полных поворотов. На принципиальных схемах они обозначаются так, как показано на рис. 10.



Рис. 10 Переменные сопротивления, слева регулируемое, справа – подстроечное.

Переменные сопротивления, так же как постоянные, могут изготавливаться из проволоки и из непроволочных материалов. Как правило, непроволочные переменные сопротивления имеют худшую точность, по сравнению с постоянными резисторами, допуск 20% для них – нередкое явление. Проволочные переменные сопротивления большой мощности, включаемые в цепь двумя выводами, иногда называют **реостатами**, а переменное сопротивление, включаемое в цепь тремя выводами – **потенциометром**.

2.2. Соединение резисторов, делитель напряжения

Вы хорошо знаете правила определения суммарного сопротивления при последовательном и параллельном соединениях резисторов. При **последовательном соединении** (рис. 11) общее сопротивление равно сумме составляющих (2.1).

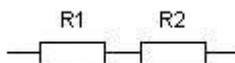


Рис. 11. Последовательное соединение сопротивлений

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 \quad (2.1)$$

Вычисление суммы сопротивлений не представляет большого труда. Отметим тот факт, что и мощности сопротивлений при последовательном соединении складываются (2.2). Таким образом, если нам, например, необходим резистор мощностью 10 Вт и сопротивлением 10 кОм, но его нет в наличии, мы можем его заменить последовательным соединением пяти резисторов мощностью 2 Вт и сопротивлением 2 кОм каждый.

$$P_{\text{общ}} = P_1 + P_2 . \quad (2.2)$$

При **параллельном соединении** (рис. 12) складываются величины, обратные сопротивлениям, - **проводимости** и общая проводимость равна сумме проводимостей параллельных ветвей (2.3). Можно сказать, что электрический ток идет по пути наименьшего сопротивления. В те ветви, где сопротивление меньше идет больший ток, а где большое сопротивление – ток незначительный.

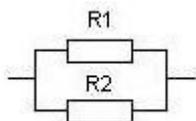


Рис. 12. Параллельное соединение сопротивлений

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} . \quad (2.3)$$

Расчет общего сопротивления при параллельном соединении резисторов более трудоемок, т.к. требует выполнения нескольких арифметических действий (2.4).

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.4)$$

Три простых правила помогут быстро оценить величину общего сопротивления при параллельном соединении:

Правило 1. При параллельном соединении результирующее сопротивле-

ние всегда МЕНЬШЕ МЕНЬШЕГО, т.е. меньше сопротивления резистора, имеющего самое малое значение.

Правило 2. Если сопротивления параллельно включенных резисторов равны, то общее сопротивление равно $1/2$ величины одного резистора в случае параллельного соединения двух резисторов, $1/3$ для трех и т.д.

Правило 3. Если сопротивления параллельно включенных резисторов сильно (более чем в 10 раз) различаются по величине, то величиной большего резистора можно пренебречь и считать, что общее сопротивление равно сопротивлению меньшего из резисторов.

Пример 2.2 На рисунке 13 показано параллельное соединение нескольких резисторов. Оценим величину общего сопротивления. Определим резисторы, имеющие самое малое сопротивление, т.к. согласно правилу 1 именно они будут определять значение общего сопротивления. Таких резисторов два. Резистор с самым малым сопротивлением – 100 Ом, это значит, что общее сопротивление будет меньше 100 Ом. Следующий по малости – резистор, сопротивлением 300 Ом, он окажет наибольшее влияние на величину общего сопротивления. Согласно правилу 2, резистор 100 Ом может быть представлен, как параллельное соединение трех резисторов, каждый из которых имеет сопротивление 300 Ом. В таком случае мы имеем параллельное соединение четырех резисторов по 300 Ом, согласно правилу 2, общее сопротивление такого соединения $300/4 = 75$ Ом. Учитывая приближенность полученного результата и большую величину остальных сопротивлений цепи, можно немного округлить полученный результат в меньшую сторону и принять за общее сопротивление величину 70 Ом. Точный расчет дает 68 Ом.

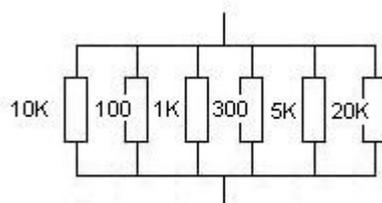


Рис. 13. Пример расчета общего сопротивления для большого числа параллельно включенных сопротивлений

Приближенные расчеты в электронике практичнее, чем точные. Реальные элементы электрических цепей всегда имеют отклонение от номинальных значений. Именно поэтому нет смысла в очень точных вычислениях.

Мощности резисторов при параллельном соединении также складываются (2.2), т.е. если мы соединили один резистор, мощностью 2 Вт параллельно с резистором мощностью 5 Вт, мощность параллельной цепочки составит 7 Вт. Однако при этом нужно учитывать, что ток между резисторами распределяется не в зависимости от их мощности, а в зависимости от их сопротивлений. Правильно выбрать мощность резисторов должен создатель схемы.

Пример 2.3. Два резистора, один сопротивлением 100 Ом, мощностью 2 Вт, другой сопротивлением 1 кОм, мощностью 5 Вт, включили параллельно на напряжение 20 В, правильно ли выбрана мощность резисторов?

Ток через резистор сопротивлением 100 Ом составит: $20 \text{ В} / 100 \text{ Ом} = 0,2 \text{ А}$,
мощность, рассеиваемая на этом резисторе: $0,2 \text{ А} * 0,2 \text{ А} * 100 \text{ Ом} = 4 \text{ Вт}$.

Ток через резистор, сопротивлением 1 кОм составит: $20 \text{ В} / 1000 \text{ Ом} = 0,02 \text{ А}$,
Мощность, рассеиваемая на этом резисторе: $0,02 \text{ А} * 0,02 \text{ А} * 1000 \text{ Ом} = 0,4 \text{ Вт}$.

Как видим, несмотря на то, что суммарная рассеиваемая мощность 4,4 Вт, а суммарная мощность резисторов 7 Вт, распределение мощности таково, что резистор сопротивлением 100 Ом скорее всего сгорит, т.к. при указанном токе на нем должна рассеяться вдвое большая мощность, чем та, на которую он рассчитан, а резистор сопротивлением 1 кОм оказывается недогружен.

Сложные цепи

Если несколько резисторов соединить так, как показано на рис. 14, то при использовании обычных приемов определения эквивалентных сопротивлений могут возникнуть затруднения. Указанное соединение является смешанным, последовательные и параллельные соединения резисторов в нем взаимосвязаны и не разделяются друг от друга без нарушения схемы.

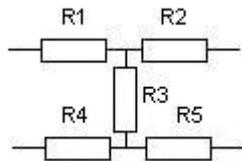


Рис. 14. Смешанное соединение сопротивлений.

К еще большей сложности приводит включение в схему не одного, а нескольких источников тока. Анализ подобных схем выполняется не вычислением эквивалентного сопротивления по формулам последовательного и параллельного соединений, а с помощью правил, установленных Густавом Кирхгофом в 1847 г и получивших название первого и второго законов Кирхгофа.

Первое правило (закон) Кирхгофа относится к узлам (точкам разветвления) электрической цепи – алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

Второе правило (закон) Кирхгофа относится к любому выделенному в электрической цепи замкнутому контуру – алгебраическая сумма падений напряжения на элементах контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре.

Правила Кирхгофа позволяют найти токи, протекающие в ветвях электрической цепи, зная эти токи легко определить и общее сопротивление цепи.

Делитель напряжения

Последовательное соединение двух сопротивлений представляет собой простейшую и очень распространенную электрическую схему, называемую **делитель напряжения** (рис. 15). Соответствующие сопротивления схемы получили название **плечей** делителя, – верхнее и нижнее плечо.

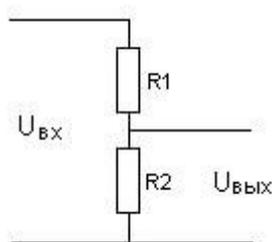


Рис. 15

Ток в этой схеме определяется соотношением:

$$I = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 + R_2} \quad (2.5)$$

Выходное напряжение равно напряжению на резисторе R_2 :

$$U_{\text{вых}} = I \cdot R_2 = \frac{U_{\text{вх}} \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.6)$$

а отношение

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.7)$$

которое носит название **коэффициента передачи** схемы, не зависит от величины входного напряжения и определяется только значениями сопротивлений резисторов:

Коэффициент передачи электронной схемы показывает отношение напряжения на выходе схемы к входному напряжению.

Таким образом, выходное напряжение делителя оказывается всегда меньше входного, т.е. на выходе мы получаем часть входного напряжения, этим и

объясняется название схемы. Несмотря на простоту, такую схему можно использовать, например, как преобразователь напряжения, для получения более низкого напряжения питания из высокого напряжения источника. Однако необходимо учитывать при этом, что параллельное подключение к резистору R_2 сопротивления нагрузки уменьшает сопротивление нижнего плеча делителя тем сильнее, чем более низкоомная нагрузка подключается, а это, в свою очередь, изменяет выходное напряжение делителя.

В любой схеме можно найти (и часто не один) эквивалент делителя напряжения. Так соединены, например, внутреннее сопротивление источника тока и нагрузка в виде сопротивления всей электрической цепи, другой пример – источник сигнала и последующая схема его обработки, в многокаскадных электронных схемах каскады соединяются между собой как сопротивления делителя напряжения и т.п. Условие передачи максимальной мощности на выход схемы соответствует равенству сопротивлений делителя. Это условие соблюдается не всегда, т.к. часто стремятся получить на выходе максимально большой сигнал напряжения.

2.3. Конденсаторы

Впервые конденсатор был создан в 18 веке. Задолго до этого было замечено, что если электрически заряженное тело находится в воздухе, его заряд со временем слабеет. В поисках способов накопления и сохранения электричества в 1745 г. профессор Питер Мушенброк в г.Лейдене использует стеклянную банку, наполненную водой. В такой банке удалось «накопить» электричество. Позднее ученый-физик при французском дворе Жан Антуан Нолле назвал этот прибор лейденской банкой. Таким образом, лейденская банка была первым конденсатором (накопителем) электрических зарядов.

Конденсатор – элемент, способный накапливать электрический заряд

С момента первых успешных опытов по применению лейденской банки начинается ее интенсивное использование. Все естествоиспытатели, повторяя и совершенствуя конструкцию Мушенброка, начинают экспериментировать с лейденской банкой. Этот прибор становится одним из самых распространенных в исследовательских лабораториях. Большой вклад в изучение свойств электрически заряженных тел вообще и лейденской банки в частности вносит английский и американский исследователь Бенджамин Франклин. Постепенно исследователи пришли к пониманию того, что суть конструкции конденсатора – в двух проводниках, разделенных диэлектриком. Проводники в конденсаторе получили название **обкладок**. На обкладках накапливаются разноименные заряды, испытывающие кулоновские силы притяжения и удерживаемые этими силами. Диэлектрик, разделяющий обкладки, не позволяет зарядам соединиться. Для количественного определения способности накапливать электрический заряд, было введено понятие электрической **емкости**. Если определить накопленный на конденсаторе заряд через разность потенциалов (напряжение) между его обкладками, то емкость – это коэффициент пропорциональности:

$$Q = C \cdot U \quad (2.8)$$

Большая емкость позволяет накопить большой заряд при том же напряжении между обкладками. Единицей измерения емкости служит **фарада**. Емкостью в одну фараду обладает конденсатор, способный накопить заряд в один кулон при напряжении между обкладками в один вольт. Фарада – очень большая величина, емкости реальных конденсаторов измеряются в более мелких единицах: микрофарадах, нанофарадах и пикофарадах.

Величина емкости конденсатора связана с его конструкцией. Эксперименты показали, что емкость конденсатора растет с увеличением площади обкладок и уменьшается при увеличении расстояния между ними. Материал диэлектрика также оказывает сильное влияние на результирующую емкость конденсатора.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \quad (2.9)$$

Влияние материала диэлектрика на величину емкости связано с тем, что диэлектрик в электрическом поле **поляризуется**. В нем индуцируется наведенное электрическое поле, силовые линии которого направлены противоположно внешнему полю и частично компенсируют его. Это позволяет накапливать на обкладках большой заряд, т.к. уже накопленный заряд «маскируется» электрическим полем диэлектрика. Чем выше способность диэлектрика к поляризации, тем значительней он может компенсировать электрическое поле между обкладками и тем больше результирующая емкость конденсатора. Однако даже с помощью диэлектриков с очень большой величиной диэлектрической проницаемости не удастся создать конденсаторы, имеющие значительную емкость. Решить эту задачу удалось, созданием так называемых **электролитических конденсаторов**. Принцип их действия состоит в том, что на поверхности алюминиевой фольги, находящейся в специальном электролите, при прохождении тока образуется слой окиси алюминия, являющийся диэлектриком. Благодаря ничтожно малой толщине этого слоя удается получить емкости в сотни и тысячи микрофарад. Но такие конденсаторы должны использоваться только при условии положительного напряжения на алюминиевой фольге, т.е. они являются полярными. Изменение направления протекания тока приводит к разрушению слоя окисла и, в конечном счете, самого конденсатора.

На принципиальной схеме обычный конденсатор обозначается без указания полярности, в обозначении электролитического конденсатора указана его полярность, рис. 16.



Рис. 16. Условное обозначение обычного конденсатора (слева) и электролитического (справа)

При соединении нескольких конденсаторов параллельно, их общая емкость будет равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. При последовательном соединении общая емкость определяется по формуле:

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.10)$$

Электрический ток через конденсатор протекает только в процессе накопления зарядов на обкладках, проще говоря – заряда конденсатора, либо его разряда. Величину тока, протекающего во время заряда/разряда, можно определить, про дифференцировав левую и правую части выражения (2.1) по времени:

$$\frac{dQ}{dt} = I = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (2.11)$$

Из выражения (2.3) видно, что ток заряда/разряда конденсатора тем больше, чем больше его емкость и чем быстрее изменяется напряжение на его обкладках. В любой электрической цепи есть некоторое электрическое сопротивление, даже если в ней нет резисторов. Это сопротивление соединяющих проводников и устройств **коммутации**.

Устройства коммутации – выключатели, переключатели и соединители различных типов.

При незначительной длине проводников в электрической цепи и отсутствии в ней резисторов, общее сопротивление цепи определяется в основном сопротивлением в точках контактов в устройствах коммутации.

Реальный конденсатор включен в электрическую цепь всегда последовательно с некоторым сопротивлением. Скорость заряда/разряда конденсатора определяется **постоянной времени** электрической цепи – произведением емкости в фарадах на величину последовательно включенного сопротивления в Омах:

$$\tau = R \cdot C \quad (2.12)$$

Постоянная времени цепи измеряется в секундах. Полный заряд/разряд конденсатора происходит за время около 5τ . Так как типичное значение емкости конденсатора не превышает нескольких микрофард, время заряда/разряда при малых значениях последовательно включенного сопротивления очень мало. Энергия, накопленная в конденсаторе, определяется выражением:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}. \quad (2.13)$$

Конденсатор по запасаемой энергии значительно уступает электрическим батареям и аккумуляторам.

Постоянный электрический ток через конденсатор не протекает. После завершения заряда ток прекращается. Отметим, что полностью разряженный конденсатор при подключении его к источнику тока не представляет собой никакого сопротивления, другими словами, его сопротивление равно нулю. В этом случае ток в течение короткого времени - порядка $0,1 \tau$ будет ограничиваться только внешним сопротивлением в электрической цепи и может достигать больших значений при отсутствии в цепи резисторов.

2.4. Катушки индуктивности

Провод с током создает вокруг себя магнитное поле, при этом часть энергии электрического тока затрачивается на создание этого поля. Если провод намотать на сердечник, то при протекании тока по виткам катушки, магнитное поле, создаваемое отдельными витками складывается. Говорят, что у скрученного в катушку провода увеличивается **индуктивность**. Индуктивность связывает возникающую в проводнике ЭДС самоиндукции при изменении величины протекающего тока со скоростью этого изменения:

$$E = -L \frac{dI}{dt} . \quad (2.14)$$

Индуктивность – способность проводника при протекании по нему тока накапливать энергию в магнитном поле.

Единица индуктивности называется **генри** и сокращенно обозначается Гн. Определение единицы индуктивности дается через ЭДС самоиндукции:

*Проводник имеет индуктивность **один генри**, если при равномерном изменении в нем тока на 1 А за 1 с в нем возникает ЭДС самоиндукции 1 В .*

Скручивая провод, мы получаем новый электрический элемент – **катушку индуктивности**. Индуктивность катушки тем больше, чем больше ее диаметр, чем меньше ее длина и чем больше число витков. Зависимость индуктивности от конструкции катушки может быть представлена в виде:

$$L = \frac{k \mu D \omega^2}{l} , \quad (2.15)$$

где k – коэффициент пропорциональности, μ – магнитная проницаемость сердечника, D – диаметр катушки, ω – количество витков, l – длина катушки.

При последовательном и параллельном соединении катушек индуктивности их общая индуктивность определяется так же как общее сопротивление при соединении сопротивлений, при условии, что катушки своими магнитными полями не влияют друг на друга.

Катушки индуктивности с сердечниками из ферромагнитных материалов называются **дресселями**. На рис. 17 показано условное обозначение катушки индуктивности и дресселя на принципиальной схеме.



Рис. 17. Условное обозначение катушки индуктивности (слева) и дросселя (справа)

2.5. Электрические измерения

Ни один измерительный прибор не дает совершенно точных результатов измерения. Разницу между показаниями прибора и действительным значением измеряемой величины называют **погрешностью** прибора. Погрешность может быть **абсолютной** и **относительной**. Если абсолютная погрешность показывает величину ошибки, то относительная погрешность – это отношение ошибки к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах.

Погрешность измерительного прибора принято выражать в процентах по отношению к наибольшему показанию прибора.

***Пример 2.4.** С помощью вольтметра на 200 В измерялось напряжение 40 В, а вольтметр показал 38 В, абсолютная погрешность равна 2 В. По отношению к наибольшему показанию прибора погрешность составляет 1, хотя по отношению к измеряемому напряжению она равна 5.*

В зависимости от величины погрешности приборы делятся на **классы точности**. Класс точности обозначается величиной погрешности, выраженной в процентах. Чем больше цифра обозначающая класс точности, тем хуже точность прибора. Приборы с погрешностью более 4 не классифицируются. У стрелочных измерительных приборов измерительная шкала может быть **равномерной**, имеющей по всей длине равноотстоящие деления, и **неравномерной**, у которой деления уплотнены в конце или в начале. Измерения в начале шкалы, особенно в случае, если она неравномерная, всегда будут менее точными. Цифровые измерительные приборы преобразуют измеряемую величину в двоичное число. Точность такого преобразования тем выше, чем больше разрядов в двоичном

числе. Погрешность прибора считается равной половине значения младшего разряда двоичного числа.

Пример 2.5. Цифровой вольтметр на 1000 В осуществляет 8 разрядное преобразование измеряемой величины. Двоичное восьмиразрядное число может описать $2^8=256$ градаций уровня сигнала. Значение младшего разряда (самый малый измеряемый сигнал) составит $1000/256=3,9$ В, абсолютная погрешность прибора $3,9/2=1,95$ В, относительная погрешность 0,19. При измерении напряжения 100 В могут быть получены значения 98 В или 102 В, относительная погрешность этого измерения порядка 2.

Измерительные приборы, способные выполнять измерения в нескольких диапазонах, будут иметь разную величину погрешности для каждого диапазона измерений.

Для измерения электрического тока используют **амперметры**, их изображают на электрических схемах кружком с буквой **A** внутри рис. (18).



Рис. 18. Условное обозначение амперметра

Амперметр включается в цепь измеряемого тока последовательно, иногда говорят «в разрыв цепи», чтобы весь измеряемый ток прошел через прибор. Сопротивление амперметра стремятся сделать возможно меньше, чтобы оно не влияло на протекающий ток. Выводы прибора имеют полярность (иногда знаком + маркируется только один вывод), направление тока в приборе должно быть от плюсового вывода к минусовому. В этом случае его стрелка будет отклоняться в нужную сторону, если у прибора стрелочный индикатор, а на экране цифрового прибора будут положительные показания.

Амперметр нельзя подключать непосредственно к источнику тока, т.к.

вследствие малого сопротивления прибора произойдет короткое замыкание.

Для расширения пределов измерений амперметра применяют **шунтирование**. Параллельно прибору подключают шунт, - специальный резистор, имеющий сопротивление в несколько раз меньшее сопротивления амперметра.

Пример 2.6. *Чтобы расширить пределы измерения в 10 раз с 1 А до 10 А, нужно подключить к амперметру шунт, через который при максимальном значении тока пройдет 9 А, чтобы через амперметр по-прежнему проходил ток величиной 1 А. Поэтому сопротивление шунта должно быть в 9 раз меньше сопротивления прибора.*

Расчет шунта выполняют по формуле:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}, \quad (2.16)$$

где n - кратность увеличения предела измерений.

Так как сопротивление шунта обычно значительно меньше сопротивления амперметра, необходимо амперметр с шунтом включить так, чтобы сопротивление проводов, соединяющих шунт с прибором, не прибавлялось к сопротивлению шунта. Влияние соединительных проводов будет меньше, если их сопротивление добавляется к сопротивлению прибора, а не шунта, (рис. 19).

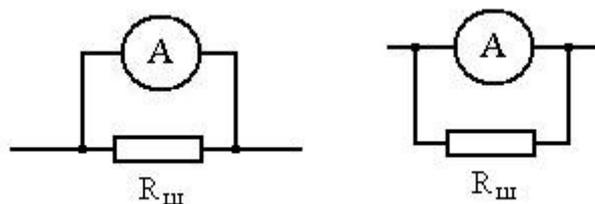


Рис. 19. Правильное (слева) и неправильное (справа) подключение шунта

Для измерения напряжения между двумя точками цепи используются **вольтметры**. Условное обозначение вольтметра от амперметра отличается тем, что вместо буквы А у вольтметра изображается буква V. Вольтметр включается

параллельно тому участку цепи, на котором выполняются измерения, поэтому, для уменьшения влияния на режим работы цепи, вольтметр должен иметь возможно большее сопротивление. О качестве вольтметра следует судить по величине его сопротивления, приходящегося на один вольт шкалы. Типичное значение - 20 кОм/В . При измерении напряжения в сотни вольт такой вольтметр имеет сопротивление в несколько мегаом. Однако в тех случаях, когда сопротивление цепи тоже велико, даже показания вольтметра с внутренним сопротивлением в несколько мегаом могут значительно отличаться от действительных значений напряжения. При этом сам вольтметр может быть высокого класса точности. Искажение показаний происходит не из-за погрешности измерения, а из-за влияния сопротивления прибора на режим работы электрической цепи.

Пределы показаний вольтметра также можно расширить с помощью включения последовательно с вольтметром **добавочного сопротивления**. Падение части напряжения на добавочном сопротивлении позволяет расширить диапазон измерений. Расчет добавочного сопротивления выполняется по формуле:

$$R_{\text{доб}} = (n - 1) \cdot R_{\text{вольтметра}} \quad (2.17)$$

В устройстве вольтметра и амперметра нет принципиальной разницы, поэтому любой амперметр с помощью добавочных сопротивлений может быть превращен в вольтметр.

Вопросы для самостоятельной проработки:

1. На какую величину номинальное значение сопротивления резистора может отличаться от его реального значения.
2. Как определяется общая мощность при параллельном соединении резисторов.
3. Как обозначается мощность резисторов на принципиальных схемах.
4. Из каких материалов изготавливают резисторы.

5. Поясните принцип работы делителя напряжения.
6. Почему конденсатор может накапливать заряды.
7. Что такое электрический дроссель.
8. Докажите, что при параллельном соединении емкостей их общая емкость будет равна сумме соединяемых емкостей, а при последовательном соединении обратная общей емкости величина будет равна сумме величин, обратных емкостям.
9. Как определить суммарную индуктивность при последовательном и параллельном соединении катушек индуктивности.
10. Каким образом можно точно определить внутреннее сопротивление источника тока.
11. Поясните назначение шунта и добавочного сопротивления.
12. Как определяется погрешность показаний электроизмерительного прибора

3. Переменный электрический ток

3.1. Закон изменения и характеристики переменного тока

Переменный ток – это ток, периодически изменяющий величину и направление протекания. Получить постоянный ток значительной величины гораздо сложнее, чем переменный. Поэтому на электрических станциях в мощных генераторах получают именно переменный ток, изменяющийся по синусоидальному закону (рис. 20). Периодические колебания такого вида называют **гармоническими**.

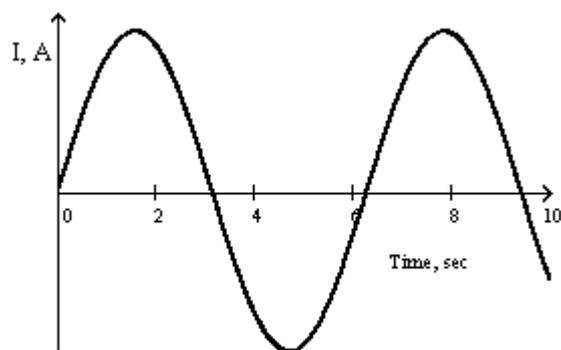


Рис. 20. Переменный ток, изменяющийся по синусоидальному закону.

Напряжение в цепи переменного тока, конечно, тоже изменяется по закону гармонических колебаний, ведь именно действие напряжения вызывает протекание тока.

Гармонический или синусоидальный сигнал замечателен тем, что он является сигналом наиболее простой формы и идеально подходит для анализа других сигналов. Производная по времени от гармонического сигнала, показывающая скорость изменения функции, как вы знаете, также является гармонической функцией. Т.е. гармонический сигнал оказывается настолько универсален, что способен описывать сам себя. При изучении негармонических переменных напряжений и токов различных форм было показано, что всякий сложный сигнал можно представить как сумму нескольких гармонических колебаний с разными амплитудами и частотами, кратными частоте повторения исходного сигнала. Простые гармонические колебания, входящие в состав переменного тока сложной формы, называются **гармониками**. Гармоники нумеруются в порядке возрастания частоты. Так, например, нулевая гармоника или гармоника нулевого порядка – это постоянная составляющая тока. Первая гармоника – это частота следования сложного сигнала, вторая гармоника – удвоенная частота и т.д. С повышением номера гармоники ее амплитуда обычно уменьшается, однако точное значение амплитуд гармонических составляющих в переменном токе сложной формы может дать только математический анализ сигнала. Некоторых гармоник в составе сигнала может не быть вовсе, их амплитуды окажутся равны

нулю, другие будут определять форму сигнала.

Гармонический анализ имеет важное прикладное значение и широко используется в различных областях науки и техники, в том числе и при изучении электронных схем и цепей.

Если по электрической цепи протекает переменный ток, то величина тока и напряжения непрерывно изменяются. Значение тока и напряжения в фиксированные моменты времени называют **мгновенными значениями**. Обычно мгновенные значения обозначают малыми латинскими буквами: i , u . Амплитудные или максимальные значения тока и напряжения обозначаются I_m , U_m . Изменение состояния переменного тока происходит во времени, поэтому по оси абсцисс на рис. 20 отложено время. Моделью гармонического колебания может служить вращение отрезка вокруг точки, совпадающей с началом этого отрезка. При этом проекция вершины отрезка на ось ординат будет описывать синусоиду, а для указания мгновенного положения отрезка можно использовать угол между отрезком и осью абсцисс рис. 21.

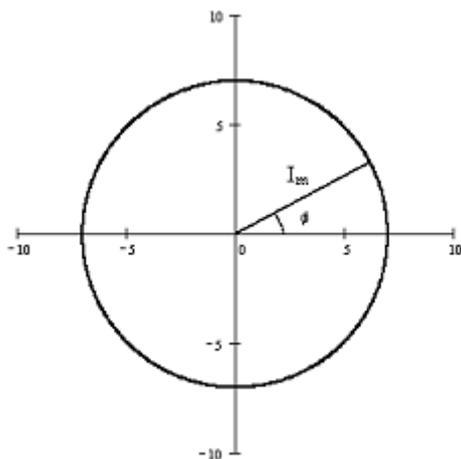


Рис. 21. Модель колебательного процесса

Полный цикл изменения тока от одного состояния до точно такого-же состояния называется **периодом** и обозначается T . Период измеряется в секундах и связан с такой величиной как **частота колебаний** следующей зависимостью:

$$T = \frac{1}{f}. \quad (3.1)$$

Частота колебаний измеряется в герцах и показывает, сколько периодов колебания уложится в одной секунде. В модели, использующей угловую меру вместо времени, период – это полный оборот отрезка или угол в 360° , в радианной мере это 2π радиан. Угол поворота отрезка, соответствующий мгновенному значению тока, называется **фазой** и измеряется обычно в радианах.

Математически выражение мгновенного значения тока и напряжения запишется в виде:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi_0), \quad u(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_0), \quad (3.2)$$

где ω - круговая (или угловая) частота, а ϕ_0 - начальная фаза колебания, в дальнейшем будем считать, что она равна нулю. Однако, фаза переменного тока используется не только для описания мгновенных состояний тока, но и для сравнения и определения результата действия двух (или более) различных токов. Если частота двух различных переменных токов совпадает, то их относительный фазовый сдвиг сохраняется постоянным, только при различной частоте сдвиг фаз будет непрерывно изменяться.

Таким образом, переменный ток характеризуется тремя параметрами: амплитудой, частотой и фазой.

Если в цепи переменного тока стоит резистор, то для него сохраняется закон Ома:

$$i(t) = u \frac{(t)}{R}, \quad (3.3)$$

конечно с учетом того, что ток и напряжение меняются во времени. Важной особенностью взаимного состояния тока и напряжения на резисторе является то, что они совпадают по фазе (иногда говорят «находятся в фазе»).

3.2. Емкость в цепи переменного тока

Мы знаем, что при воздействии на емкость постоянного напряжения, она заряжается и через нее протекает кратковременный ток, зависящий от скорости изменения напряжения, другими словами, от производной напряжения по времени. В случае переменного напряжения мы можем продифференцировать закон изменения напряжения на емкости по правилам дифференцирования:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} = C \omega U_m \cos(\omega t). \quad (3.4)$$

Таким образом мы получили выражение:

$$i(t) = C \omega u(t), \quad (3.5)$$

где $u(t) = U_m \cos(\omega t)$ - закон изменения напряжения на емкости. Он не совпадает с законом изменения напряжения на сопротивлении. Несовпадение заключается в том, что напряжение на емкости отстает от напряжения на резисторе ровно на $\pi/2$ радиан. Изменения напряжения на емкости не совпадают по фазе и с током через саму емкость (рис. 22).

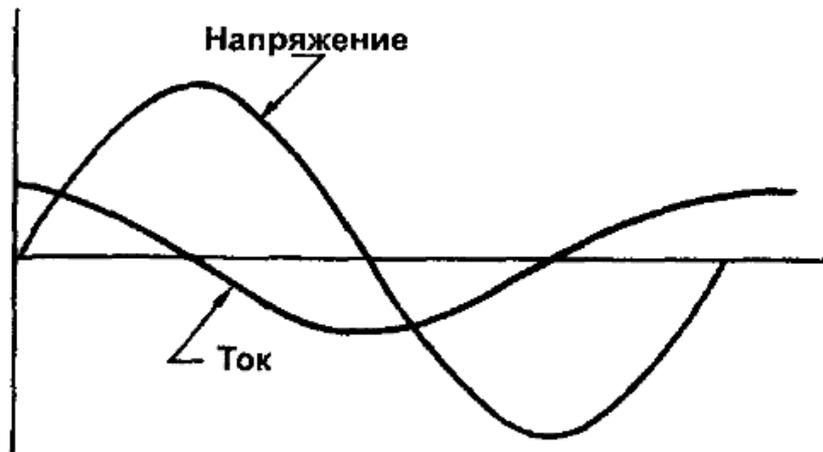


Рис. 22. Переменное напряжение и ток на конденсаторе

Такое несовпадение фазы тока и напряжения на емкости связано с процессами, происходящими при колебаниях напряжения на выводах конденсатора. Когда напряжение растет, конденсатор начинает заряжаться и в цепи протекает заряд-

ный ток. Напряжение на конденсаторе увеличивается, он накапливает энергию. К моменту достижения амплитудного значения напряжения ток заряда прекращается, но внешнее напряжение начинает убывать и теперь сам конденсатор становится источником тока, разряжающимся на электрическую цепь. Физический смысл емкостного сопротивления состоит в том, что заряженный конденсатор является, по существу, источником ЭДС, которая противодействует заряжающему генератору. Мы можем привести выражение (3.5) к виду (3.3):

$$i(t) = \frac{u(t)}{\frac{1}{C\omega}}, \quad (3.6)$$

Знаменатель дроби в преобразованном выражении имеет смысл сопротивления конденсатора переменному току. Это сопротивление обозначается X_C :

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3.7)$$

3.3. Индуктивность в цепи переменного тока

Индуктивное сопротивление представляет собой противодействие росту тока со стороны возникающей в катушке индуктивности ЭДС самоиндукции. Выполнив аналогичный анализ для катушки индуктивности, мы можем получить сопротивление индуктивности на переменном токе X_L :

$$X_L = \omega L \quad (3.8)$$

В ходе анализа мы обнаружим, что напряжение на индуктивности также не совпадает по фазе с током, только на этот раз оно не отстает, а опережает ток на $\pi/2$ радиан (рис. 23).



Рис. 23. Переменное напряжение и ток на катушке индуктивности

В чем же причина противоположного поведения конденсатора и катушки индуктивности? Дело в том, что ЭДС самоиндукции катушки препятствует, сопротивляется изменению тока при его возрастании, выступая в этом случае, как сопротивление (при уменьшении тока ЭДС самоиндукции не препятствует, а способствует протеканию тока). В случае конденсатора его ЭДС наоборот, противодействует току во время заряда конденсатора, т.е. когда ток уменьшается.

Вследствие ЭДС самоиндукции в любом проводнике с переменным током наблюдается так называемый **поверхностный эффект**. Магнитное поле существует не только вокруг проводника с током, но и внутри него. При этом магнитный поток для центральной части проводника оказывается больше, чем для поверхностной. При изменениях тока наибольшая противодействующая ЭДС самоиндукции оказывается сконцентрированной вдоль оси проводника, в центральной части проводника как будто повышается сопротивление и ток вытесняется к поверхности. Поэтому сечение провода для переменного тока оказывается меньше и сопротивление провода прохождению тока увеличивается. Этот эффект проявляется очень сильно на высоких частотах, поэтому для высокочастотных токов используют трубчатые проводники, поверхность которых покрывают серебром, имеющим низкое удельное сопротивление.

3.4. Электрические цепи с частотно-зависимыми элементами

Сопротивления конденсатора и катушки индуктивности переменному току, в которых протекающий ток не совпадает по фазе с напряжением называются **реактивными**. В таких сопротивлениях не происходит выделения тепла, т.к. часть периода они потребляют энергию, а затем ее отдают. Сопротивление резисторов считается **активным**.

Если в электрической цепи присутствуют и активные и реактивные сопротивления, то результирующий ток будет определяться общим сопротивлением, однако сложив активное и реактивное сопротивление мы допустим ошибку. Во первых, мы должны определить реактивность какого типа в нашей цепи преобладает. По характеру эти реактивности противоположны, поэтому присутствие в цепи и катушек индуктивности и конденсаторов может привести либо к полной компенсации их друг другом, либо к преобладанию реактивности одного типа. При последовательном соединении сопротивление конденсатора и катушки индуктивности нужно вычесть друг из друга. Для вычисления полного сопротивления цепи переменному току нужно сложить активное и реактивное сопротивления по формуле:

$$R_{\text{общ}} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.9)$$

Интересным свойством реактивных сопротивлений является то, что они изменяют свою величину, в зависимости от частоты переменного тока. С ростом частоты сопротивление конденсатора уменьшается, а катушки индуктивности, наоборот, увеличивается. Это позволяет строить с использованием реактивных элементов фильтры, пропускающие электрические колебания одних частот и подавляющие колебания других частот. На рис. 24 показаны простые RC-фильтры высокой и низкой частот, представляющие собой делитель напряжения с частотно-зависимым плечом.

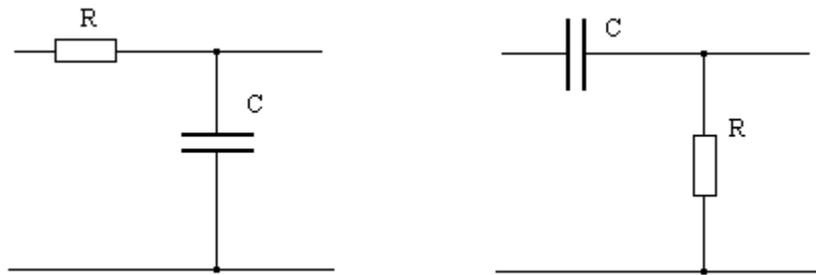


Рис. 24. Фильтры низкой (слева) и высокой (справа) частот

Характеристику, показывающую частотные свойства фильтра или другой электронной схемы называют **амплитудно-частотной (АЧХ)**. По оси ординат на этой характеристике откладывается уровень сигнала, а по оси абсцисс частота. На рис. 25 показана АЧХ фильтра высоких частот. Точкой излома или перегиба называют точку на АЧХ, в которой сигнал уменьшился относительно максимального значения в $\sqrt{2}$ раза. АЧХ фильтра ниже точки перегиба становится быстро и практически линейно убывающей.

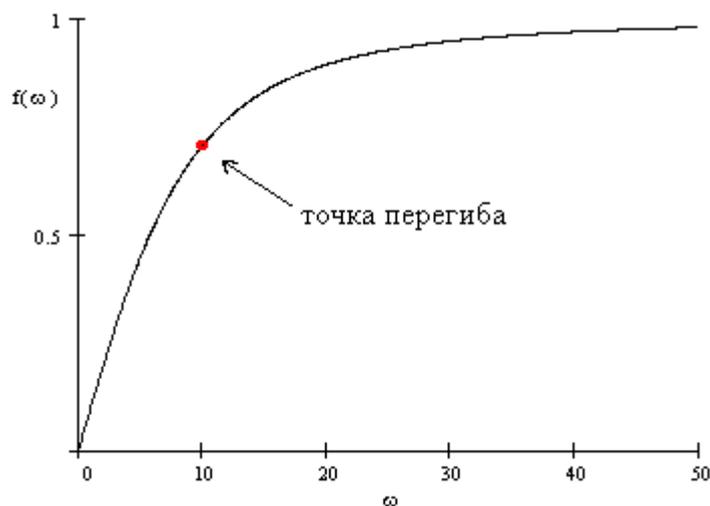


Рис. 25. Амплитудно-частотная характеристика фильтра высоких частот

Этой точке на оси частот соответствует значение:

$$\omega = \frac{1}{\tau}, \quad (3.10)$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени RC-цепи.

Ослабление электрических сигналов часто указывают не в размах, а в **децибелах**. Это позволяет сравнивать сигналы очень сильно различающиеся по амплитуде. Децибел – десятая часть бела, но бел слишком большая величина, поэтому ею не пользуются. Отношение амплитуд напряжений или токов двух сигналов в децибелах определяется выражением:

$$\text{Отношение в дБ} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \quad (3.11)$$

Например, указанное ослабление сигнала в точке перегиба в $\sqrt{2}$ раза соответствует ослаблению в 3 дБ. В то же время, относительное различие сигналов по амплитуде в 1000 раз, даст отношение в децибелах всего 60.

3.5. Действующие значения тока и напряжения, мощность в цепи переменного тока

Мы знаем, что тепловое действие электрического тока не зависит от его направления. Сопоставив тепловое действие переменного тока точно такому же действию постоянного тока, определили так называемые **действующие** или **эффективные** величины тока и напряжения.

Под действующим значением переменного тока понимается такой постоянный ток, который за то же время совершает ту же работу (или выделяет количество тепла), что и данный переменный ток.

Оказалось, что величина действующего постоянного тока и напряжения связана с амплитудным значением переменного тока и напряжения простым соотношением:

$$I_{д} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U_{д} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.12)$$

Например, в бытовой сети переменного тока амплитуда напряжения значительно превышает 220 В, рис. 26.

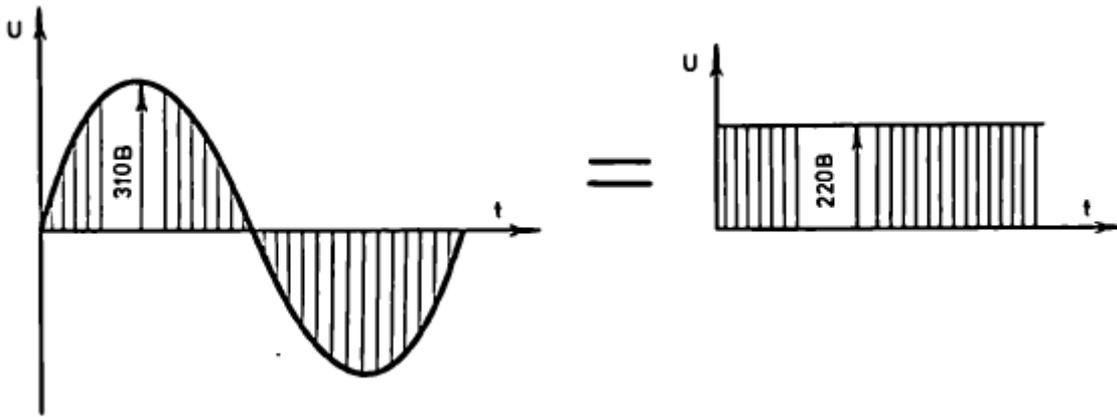


Рис. 26. Амплитудное и действующее значение напряжения в сети переменного тока

Когда говорят о величине переменного напряжения или тока, в большинстве случаев имеют в виду действующие значения этих величин. Различные электроизмерительные приборы для переменного тока градуируются на действующие значения. И эти же значения используются для расчета мощности переменного тока. Однако, оказывается в случае переменного тока есть несколько различных видов мощности.

Первая из них называется **активной мощностью**. Активную мощность в цепи переменного тока можно вычислить, используя следующее выражение:

$$P_a = U_d I_d \cos(\phi) \quad , \quad (3.13)$$

где ϕ - результирующий сдвиг фаз между током и напряжением на выводах генератора, питающего электрическую цепь. Измеряется активная мощность также в ваттах. Потери в цепи переменного тока оказываются несколько выше, чем в цепи постоянного тока из-за поверхностного эффекта, потерь на вихревые токи, индуцируемые во всех металлических телах, находящихся в магнитном поле переменного тока, потерь на излучение электромагнитных волн и электромагнитной индукции, потерь на магнитный и диэлектрический **гистерезис** (явления перемагничивания и изменения поляризации). Конечно при невысокой частоте переменного тока все эти виды потерь чрезвычайно малы, но они быстро растут с повышением частоты.

Второй вид мощности называется **реактивной** мощностью. Это мощ-

ность в реактивном сопротивлении. Она характеризует не расходуемую энергию, а временно запасаемую в магнитном поле катушки индуктивности или электрическом поле конденсатора, если эти элементы включены в цепь переменного тока. Реактивную мощность измеряют не ваттами, а вольтамперами реактивными (*var* или *VAR*) и рассчитывают по формуле:

$$P_r = I_d U_d \sin(\phi) . \quad (3.14)$$

Наконец, третий вид мощности – **полная** мощность. Эта мощность рассчитывается для цепи, в которой есть активное и реактивное сопротивления. Она измеряется в вольтамперах (*va* или *VA*). Полная мощность определяется выражением:

$$P_{\Pi} = U_d I_d . \quad (3.15)$$

Множитель $\cos(\phi)$ является коэффициентом мощности в цепях переменного тока. Часто его называют просто «косинус фи». Коэффициент мощности показывает, какую долю полной мощности составляет активная мощность. Если в цепи включено только реактивное сопротивление, $\cos(\phi)=0$ и $P_a=0$, если только активное — $\cos(\phi)=1$ и тогда $P_a=P_{\Pi}$, т.е. вся мощность чисто активная. При $\cos(\phi)<1$ генератор должен создавать напряжение и ток, произведение которых больше величины активной мощности.

Пример. 3.2. Если в некоторой цепи активная мощность 1000 Вт и $\cos(\phi)=0,8$, то полная мощность составит $P_{\Pi}=1250$ вА. При этом генератор, к примеру, должен будет создавать при токе 10 А напряжение 125 В, чтобы обеспечить полную мощность, хотя при отсутствии реактивной составляющей в цепи нагрузки для той же мощности достаточно было бы напряжения $U=100$ В (указаны действующие величины тока и напряжения).

Необходимость повышения напряжения генератора из-за наличия реактивной мощности характерна для последовательного соединения активного и реактивного сопротивлений. Если же эти сопротивления соединены параллельно, то генератор должен будет давать больший ток. Таким образом, хотя реактивный ток

и напряжение переносит от генератора и обратно реактивную энергию, которая сама не расходуется, при этом возникают лишние потери энергии в активном сопротивлении проводов и усложняется режим работы генератора.

Очевидно, что все три мощности связаны друг с другом соотношением:

$$P_{II} = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} . \quad (3.16)$$

3.6. Электрический трансформатор

Разместив две катушки индуктивности на общем сердечнике из ферромагнитного материала, мы получим электрический трансформатор. Катушки индуктивности в трансформаторе получили название первичной и вторичной обмоток. Сердечник служит магнитопроводом, усиливая и концентрируя магнитное поле. Трансформатор работает только на переменном токе. В нем используется закон электромагнитной индукции, позволяющий создавать ЭДС индукции во вторичной обмотке при изменении тока и создаваемого им магнитного потока в первичной обмотке. КПД трансформатора близок к 1. Главной величиной, характеризующий трансформатор является **коэффициент трансформации**:

$$n = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1}{U_2} , \quad (3.17)$$

Он равен отношению числа витков в обмотках и напряжений на них. В зависимости от соотношения числа витков, трансформатор может быть повышающим или понижающим напряжение. При повышении напряжения происходит соответствующее уменьшение тока во вторичной обмотке, при понижении – увеличение. На принципиальной схеме трансформатор изображается как показано на рис. 27.

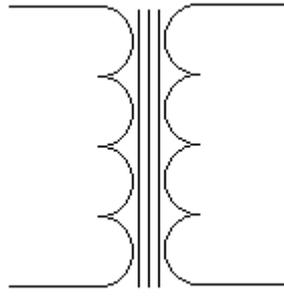


Рис. 27. Условное обозначение трансформатора

Питание электрической схемы с использованием трансформатора повышает безопасность работы, т.к. трансформатор осуществляет **гальваническую развязку** цепей первичной и вторичной обмоток, они связаны только через магнитный поток. В случае понижающего трансформатора электрическая схема не окажется под высоким напряжением даже в случае неисправности какой-то ее части.

Вариант трансформатора с одной обмоткой и несколькими отводами называется **автотрансформатором** рис. 28, его можно рассматривать, как делитель напряжения. У автотрансформатора одна из обмоток является частью другой. Автотрансформатор получается легче трансформатора не только за счет объединения обмоток. Ему не требуется такой массивный сердечник, как трансформатору, т.к. в автотрансформаторе не вся энергия передается через магнитный поток в сердечнике, часть ее проходит непосредственно из первичной сети во вторичную. Через общую часть обмотки проходит малый ток, равный разности токов первичной и вторичной цепи. Автотрансформатор не обеспечивает гальванической развязки первичной и вторичной цепей.

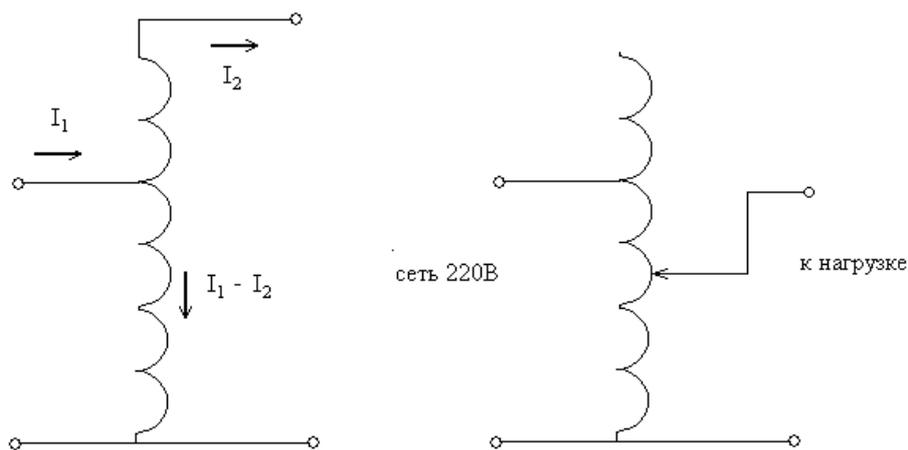


Рис. 28. Автотрансформатор

Важным свойством трансформатора является его способность преобразовывать не только переменное напряжение и ток, но и величину сопротивления.

Пример. 3.1. Трансформатор с коэффициентом трансформации 4, напряжение первичной обмотки 160 В, сопротивление нагрузки в цепи вторичной обмотки 20 Ом.

При таких данных напряжение во вторичной обмотке составит $U_2 = U_1 / 4 = 160 / 4 = 40$ В, ток во вторичной цепи $I_2 = U_2 / R_2 = 40 / 20 = 2$ А, Мощность вторичной цепи $P_2 = U_2 I_2 = 40 \cdot 2 = 80$ Вт.

Пренебрегая потерями будем считать, что мощность в первичной сети также равна 80 Вт, тогда $I_1 = P_1 / U_1 = 80 / 160 = 0,5$ А. Теперь определим, какое сопротивление представляет собой первичная обмотка для генератора: $R_1 = U_1 / I_1 = 160 / 0,5 = 320$ Ом, R_1 в 16 раз больше, чем R_2 .

Понижающий трансформатор, нагруженный на некоторое сопротивление R_2 , представляет для генератора сопротивление в n^2 раз большее, чем R_2 . Повышающий трансформатор уменьшает сопротивление в n^2 раз.

Вопросы для самостоятельной проработки:

1. Какие колебания называют гармоническими, что такое вторая гармоника переменного тока промышленной частоты.

2. Что вы можете сказать об относительных фазах тока и напряжения в случае: сопротивления, конденсатора, катушки индуктивности.
3. Поясните физический смысл емкостного сопротивления.
4. Почему емкостное и индуктивное сопротивление противоположны по характеру действия.
5. В чем состоит поверхностный эффект.
6. Как определить действующее значение напряжения: для синусоидального сигнала, для прямоугольного сигнала.
7. Усиление первой гармоники сигнала 60дБ, а второй 20 дБ, во сколько раз отличаются сигналы.
8. Какие виды мощности существуют в цепи переменного тока.
9. Что означает точка перегиба на частотной характеристике.
10. Чем отличается автотрансформатор от обычного трансформатора, обеспечивает ли он гальваническую развязку цепей, подключенных к его выводам.

4. Нелинейные элементы в электрических цепях

Ток через нелинейный элемент является нелинейной функцией напряжения. Класс нелинейных элементов очень широк. Существенно нелинейными могут быть магнитные цепи трансформаторов, специальные виды резисторов (термисторы, варисторы) и т.п. Для общего представления об использовании нелинейных элементов, мы рассмотрим лишь те из них, без которых построение электронных схем не обходится.

Зависимость тока от напряжения через элемент, получившая название **вольт-амперной характеристики (ВАХ)** имеет важное значение для понимания принципа работы конкретного элемента и особенностей его использования. Примерно до середины прошлого века все электронные схемы создавались на базе электровакуумных нелинейных элементов – **электронных ламп** различного типа. Сегодня электронные лампы практически не используются (за исключением немногих прикладных областей). Они вытеснены более экономичными, малогабаритными и надежными полупроводниковыми элементами. Полупроводниковые элементы в подавляющем большинстве изготавливаются из **кремния** – доступного и распространенного материала (обычный песок – это окись кремния). Конечно, полупроводниковые приборы не делают из песка, а получение чистого кристаллического кремния – непростая задача, но, тем не менее, недостатка в этом сырье нет. Для изготовления нелинейных электронных элементов используются и другие полупроводниковые материалы: арсенид галлия, германий, но кремний – это основа всей сегодняшней полупроводниковой электроники.

4.1. Полупроводниковый диод

Проводимость любого полупроводника, вообще говоря, плохая. Электрический ток полупроводники при комнатной температуре практически не прово-

дят. Но потому-то они и оказались подходящим материалом для создания электронных элементов, что их проводимостью можно легко управлять, добавляя в кристалл проводника примесь. Говорят: «Кристалл легируется определенной примесью». Кристалл кремния имеет четыре валентных электрона. Добавляя трехвалентную примесь можно получить легированный кристалл с проводимостью p -типа, когда подвижными носителями электрического заряда являются виртуальные положительно заряженные частицы – дырки. Если легировать кристалл примесью с пятью валентными электронами, то он приобретет электронную проводимость или проводимость n -типа. Изменяя концентрацию и тип примеси мы можем управлять проводимостью кристалла. Легированный кристалл оказывается хорошим проводником.

Работа полупроводникового диода основана на использовании свойств p - n перехода, образующегося на границе двух областей кристалла кремния, легированных примесями разного типа. Из-за значительной разности концентраций дырок в p и n - областях, дырки начинают мигрировать в область n -типа, стремясь выровнять концентрацию дырок по всему кристаллу. Процесс распространения частиц под действием разности концентраций (иначе можно сказать «градиента концентраций») называется диффузией. Точно такой же процесс развивается и со стороны n - области кристалла, откуда происходит диффузия электронов в p - область. Однако и электроны, и дырки – это заряженные частицы. Перемещаясь они несут свой заряд, электроны в p - область, а дырки в n - область. Очень скоро на границе областей возникает и начинает увеличиваться разность потенциалов, рис. (29). Эта разность растет до тех пор, пока диффузионное движение частиц не остановится.

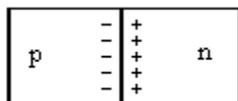


Рис. 29. Формирование внутреннего напряжения на границе раздела областей легированного кристалла

Если теперь приложить к кристаллу внешнее электрическое поле, оно может нарушить установившееся равновесие и через кристалл потечет электрический ток. Но это случится только в том случае, если полярность внешнего поля не совпадет с полярностью внутреннего. Если же внешнее поле будет совпадать с внутренним и усилит его, то тока не будет. Таким образом, кристалл, легированный указанным образом, приобретает свойство односторонней проводимости.

Полупроводниковый диод представляет собой $p-n$ переход, заключенный в корпус и снабженный выводами. Диод имеет два вывода: анод и катод (названия, сохранившиеся со времен ламповых электронных приборов). Вывод анода соединен с p - областью кристалла, вывод катода – с n - областью.

На рисунке 30 показано условное обозначение наиболее распространенного вида диодов – выпрямительного диода.

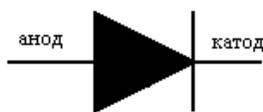


Рис. 30. Условное обозначение полупроводникового диода

Изображение диода символизирует стрелку, указывающую направление протекания тока. Диод проводит ток при положительном потенциале на аноде и отрицательном на катоде, такое включение называется **прямым** включением диода, другое включение получило название **обратного**. При обратном включении ток через диод все же протекает, но очень слабый. Этот ток обусловлен собственной проводимостью полупроводникового кристалла, какой она была бы в отсутствии легирования. Носители заряда, образующиеся в кристалле за счет примеси, называют **основными**, их концентрации задаются в процессе легирования и не могут изменяться. Те же носители, которые присущи самому кристаллу полупроводника, называют **неосновными** (хотя они-то в этом кристалле настоящие аборигены). Неосновные носители всегда рождаются парами: дырка и электрон. Концентрация неосновных носителей сильно зависит от температуры, с ростом температуры их число значительно увеличивается. Если концен-

трация неосновных носителей сравниться с концентрацией основных, диод теряет свойство односторонней проводимости, поэтому кремниевый диод, как впрочем и другие полупроводниковые приборы, работает в ограниченном температурном диапазоне, его температура не должна превышать $150 - 200^{\circ}\text{C}$.

При включении выпрямительного диода в цепь переменного тока, ток в цепи протекает только в течении одной полувольты напряжения, соответствующей прямому включению диода (рис. 31).

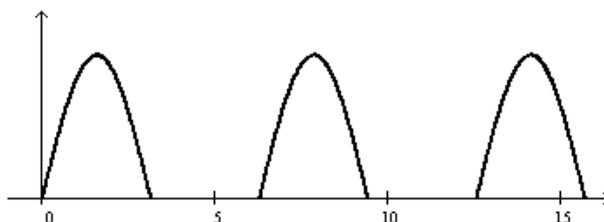


Рис. 31. Переменное напряжение после выпрямления

Во время действия второй полувольты, тока в цепи не будет из-за односторонней проводимости диода. Таким образом из тока, периодически меняющего направление протекания можно получить импульсный ток, протекающий в одном направлении, говорят: «выпрямить переменный ток».

Отметим, что пропускать значительный ток в прямом направлении диод начинает тогда, когда внешнее электрическое поле превысит по величине поле внутреннее. В кремниевом диоде потенциальный барьер на границе раздела p и n областей составляет около $0,6\text{ В}$. Поэтому амплитуда напряжения на выходе диода меньше входного напряжения на $0,6\text{ В}$. Если амплитуда переменного напряжения достигает нескольких сотен вольт, то столь малым ее снижением можно просто пренебречь. Однако, если эта амплитуда всего 1 В , то на выходе будет менее половины от входного напряжения, если же она еще меньше и не достигает $0,6\text{ В}$, диод просто «не откроется» и напряжения на выходе не будет. Зависимость тока через диод от напряжения на его выводах описывается его вольт-амперной характеристикой, (рис. 32). Основные параметры, характеризующие эксплуатационные характеристики выпрямительного полупроводникового диода, это **максимальный ток** в прямом направлении и **максимальное**

напряжение в обратном. Кроме того, важное значение имеет максимально допустимая частота переменного тока. Для выпрямительных диодов она обычно не превышает 1000 Гц .

Существует несколько вариантов построения схем для выпрямления переменного тока (рис. 33). В однополупериодной схеме (рис. 33, а) используется один диод и на выходе частота пульсирующего тока, протекающего в одном направлении, совпадает с частотой переменного тока на входе выпрямителя (рис. 31). Использование двух других схем (рис. 33, б и в) позволяет удвоить частоту тока на выходе (рис. 34) и, таким образом, в значительной степени сгладить выходной ток. Поскольку выпрямители предназначены для преобразования переменного тока в постоянный и пульсации как правило сглаживаются с помощью фильтра, схемы с удвоением частоты применяются чаще всего.

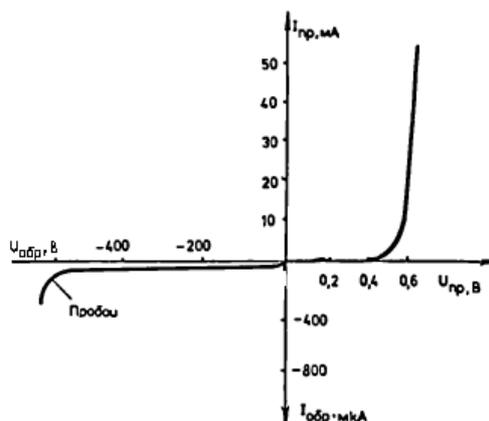


Рис. 32. Вольт-амперная характеристика диода

В случае использования двухполупериодной схемы выпрямления (рис. 33, б), в обмотке трансформатора, подключенной к выпрямителю, необходим средний вывод. При таком включении в каждом полупериоде нагруженной оказывается только часть этой обмотки. Трансформатор — один из дорогостоящих элементов, поэтому его стремятся использовать максимально эффективно. Увеличение числа диодов в мостовой схеме (рис. 33, в) позволяет избежать недостатков двухполупериодного выпрямителя, однако в данном случае каждая полувольтна переменного тока проходит в нагрузку через два диода, поэтому амплитуда вы-

ходного напряжения уменьшается уже на $1,2 В$. В некоторых случаях такое уменьшение может быть недопустимым.

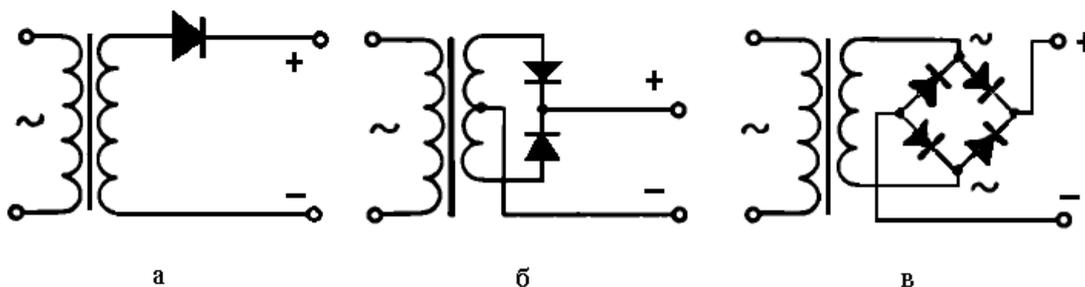


Рис. 33. Варианты выполнения выпрямительных схем: а) однополупериодный выпрямитель, б) двухполупериодный выпрямитель, в) мостовой выпрямитель

В качестве фильтрующего элемента на выходе выпрямителя параллельно нагрузке включается электролитический конденсатор с достаточно большой емкостью (рис. 35). Конденсатор накапливает энергию в то время, когда на выходе выпрямителя высокое напряжение, и отдает ее в нагрузку, когда напряжение на выходе выпрямителя падает до нуля (рис. 36). Пульсации напряжения не устраняются полностью, их величина зависит от тока, отдаваемого выпрямителем в нагрузку.

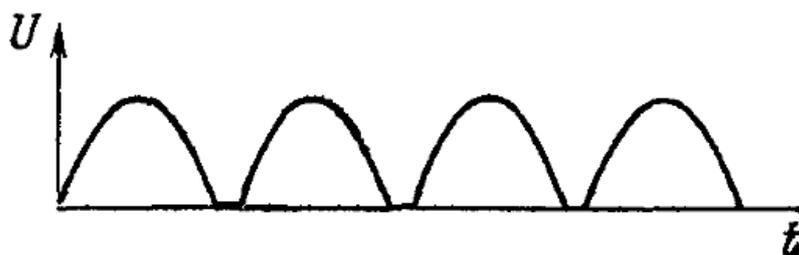


Рис. 34. Напряжение на выходе двухполупериодного и мостового выпрямителей

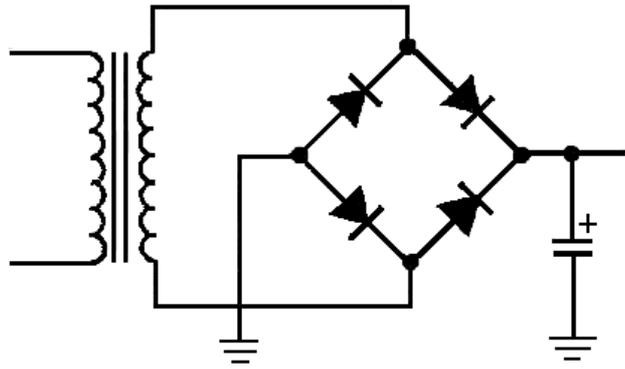


Рис. 35. Включение фильтрующего конденсатора на выходе выпрямителя

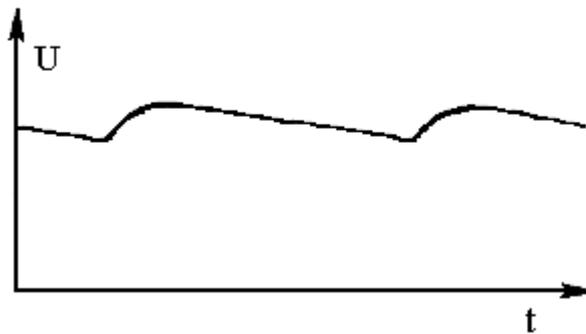


Рис. 36. Напряжение на выходе выпрямителя с фильтрующим конденсатором

Амплитуду пульсаций выпрямленного напряжения при использовании мостового выпрямителя и фильтрующей емкости можно определить количественно, воспользовавшись выражением (2.11), описывающим протекание тока через конденсатор. Заменяя в нем производную по времени на малые приращения:

$$I = C \frac{\Delta U}{\Delta t}, \quad (4.1)$$

И учитывая, что для мостового выпрямителя:

$$\Delta t \approx \frac{1}{2 \cdot f}, \quad (4.2)$$

Легко получить:

$$\Delta U = \frac{I_{нагр}}{2 f C} \quad (4.3)$$

Из этого выражения хорошо видно, что пульсации тем меньше, чем меньше ток

нагрузки и чем больше емкость фильтра.

Выпрямительный полупроводниковый диод может использоваться не только для выпрямления переменного тока. Это хороший **ограничитель** напряжения. Например, когда нужно ограничить амплитуду сигнала, чтобы не повредить вход чувствительной схемы усилителя применяется двусторонний диодный ограничитель (рис. 37). Напряжение на выходе которого не превысит $0,6 В$.

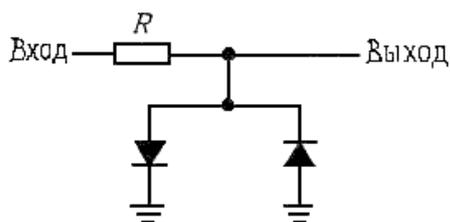


Рис. 37. Двусторонний диодный ограничитель амплитуды сигнала

Диод используется также в качестве защиты в схемах с индуктивностями, через которые протекает постоянный ток (рис. 38). При разрыве цепи протекания тока, в катушке возникает ЭДС самоиндукции, способная очень сильно повысить потенциал вывода, соединенного с выключателем. Диод, включенный параллельно с индуктивностью, создает замкнутую цепь для протекания индуктивного тока. В результате энергия магнитного поля катушки просто преобразуется в тепло при протекании этого тока. Когда же выключатель замкнут, диод оказывается заперт обратным напряжением источника и не влияет на работу схемы.

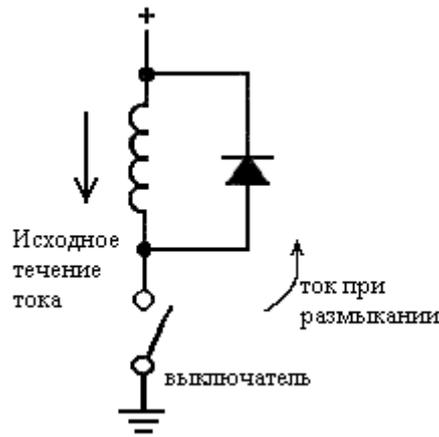


Рис. 38. Диодная защита от напряжения самоиндукции

Полупроводниковый диод – один из самых широко распространенных элементов современной электроники. Мы еще не перечислили всех возможностей применения обычных выпрямительных диодов, с их помощью, например, можно строить логические схемы, схемы логарифмических преобразователей, умножителей напряжения и многое другое. Кроме того, в семействе диодов есть и другие представители:

- Импульсные – предназначены для работы с высокочастотными, импульсными сигналами;
- Светодиоды – при протекании тока в прямом направлении в $p-n$ переходе такого диода происходит преобразование энергии электрического тока в энергию светового излучения;
- Фотодиоды – в них происходит преобразование световой энергии в электрическую, на основе фотодиодов создаются солнечные батареи;
- Варикапы – диоды, $p-n$ переход которых играет роль конденсатора, емкость $p-n$ перехода зависит от величины приложенного обратного напряжения;
- Стабилитроны (другое название – опорные или Зенеровские диоды) – диоды, использующие эффект малого изменения напряжения при электрическом пробое $p-n$ перехода, эти приборы также работают при обратном включении;

- Туннельные – в этих диодах используется квантовый эффект проникновения (туннелирования) электронов сквозь энергетический барьер.

Все виды диодов построены на основе $p-n$ перехода.

4.2. Биполярный транзистор

Биполярный транзистор содержит два $p-n$ перехода и три легированных области на одном кристалле полупроводника. Средняя область называется **базой**, крайние – **эмиттером** и **коллектором**. От каждой области имеется соответствующий вывод: вывод базы, коллектора и эмиттера. Таким образом биполярный транзистор имеет три вывода. Различают биполярные транзисторы двух типов:

- $p-n-p$ транзистор или транзистор **прямой** проводимости;
- $n-p-n$ транзистор или транзистор **обратной** проводимости.

На рисунке 39 показаны структурная и принципиальная схемы транзисторов. Цепи база-эмиттер и база-коллектор работают как диоды (рис. 40). Транзистор содержит две цепи протекания тока: входную и выходную. Входная цепь – всегда переход база-эмиттер. Здесь прикладывается небольшое напряжение, смещающее переход в прямом направлении.



Рис. 39. Два типа биполярных транзисторов и их обозначение на принципиальной схеме

В результате начинает протекать базовый ток. Выходная цепь транзистора зави-

сит от схемы его включения, но часто это цепь коллектор-эмиттер. Между коллектором и эмиттером действует значительно большее напряжение, смещающее переход коллектор-база в обратном направлении. Базовый ток вызывает проникновение из эмиттера в область базы большого числа неосновных носителей заряда. Запирающий потенциал коллектора не препятствует переходу неосновных носителей заряда в область коллектора, а наоборот, притягивает их. Поэтому они в большинстве своем уходят в область коллектора. Таким образом возникает ток в цепи коллектор-эмиттер. Величина этого тока намного больше тока в цепи базы, послужившего источником заряженных частиц для протекания тока в цепи коллектор-эмиттер. Так мы получаем возможность управлять большим током с помощью небольшого.

Транзисторы разных типов по разному подключаются к источнику питания. Для транзистора *p-n-p* наивысший потенциал имеет эмиттер, к выводу базы прикладывается отрицательное напряжения порядка $0,6 В$. Противоположная полярность необходима для транзистора *n-p-n*, в этом случае наивысший потенциал имеет коллектор, а к выводу базы прикладывается небольшое положительное напряжение. Из описания механизма работы транзистора очевидно, что транзистор может использоваться как **усилитель** тока или напряжения (или того и другого). В этом качестве транзистор используется чаще всего. Показателем усилительных свойств транзистора служит **коэффициент усиления по току** - β . Приближенное выражение (4.4) показывает, как связан ток коллектора с током базы.

$$I_K = \beta \cdot I_B \quad (4.4)$$

А все токи в транзисторе связаны между собой соотношением (4.5):

$$I_E = I_K + I_B \quad (4.5)$$

При значительном базовом токе и небольшом напряжении коллектор-эмиттер, транзистор входит в режим **насыщения**, иногда говорят: «полностью открывается». В режиме насыщения сопротивление участка коллектор-эмиттер снижа-

ется до долей ома. Это позволяет использовать транзистор в качестве электронного **переключателя**.

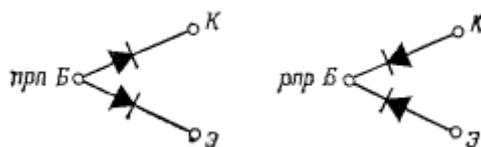


Рис. 40. Переходы транзистора эквивалентны диодам

Транзистор не только имеет две цепи протекания тока, но и используется как правило таким образом, что через него одновременно протекают два вида тока: постоянный и переменный. Постоянный тока возникает под действием источника питания схемы, включающей транзистор. С помощью вспомогательных элементов, постоянный ток задает **режим работы** транзистора. Переменный ток или **сигнал** обычно является внешним, он не вырабатывается самой схемой, а обрабатывается (усиливается или видоизменяется) с помощью нее.

Так как входная и выходная цепи требуют наличия двух выводов каждая, а транзистор имеет только три вывода, один из них должен быть общим для входа и выхода. В зависимости от того, какой из выводов транзистора играет эту роль, различают три схемы включения транзистора: схема с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором (рис. 41).

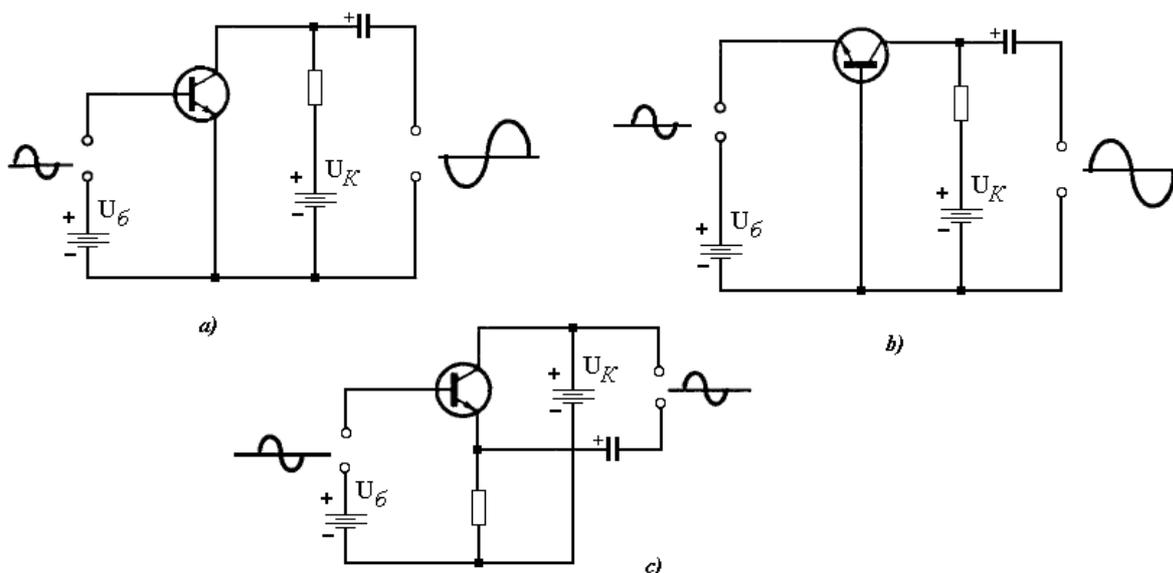


Рис. 41. Схемы включения транзистора: а) ОЭ, б) ОБ, с) ОК

На рисунке 41 показано, как изменяется сигнал, поступающий на вход транзистора, при разных схемах включения. Для схемы ОЭ характерно изменение фазы сигнала на π радиан. Схема ОЭ дает максимально возможное усиление сигнала по мощности, сигнал усиливается и по напряжению и по току. Схемы ОБ и ОК фазы сигнала не меняют. В схеме ОБ сигнал усиливается только по напряжению, в схеме ОК – только по току. Несмотря на это практическое применение находят все схемы включения. Отметим тот факт, что если в схемах ОЭ и ОБ общий вывод соединяется с точкой наименьшего потенциала непосредственно, то в схеме ОК коллектор соединен с ней через очень малое сопротивление источника питания в коллекторной цепи.

Наличие в биполярном транзисторе двух взаимно зависимых цепей протекания тока обуславливает существование для него двух видов ВАХ: входной и выходной. При этом ВАХ транзистора – это не одна кривая, а семейство характеристик, например, выходных, снятых при заданном значении входных параметров. Так выходные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ (рис. 42), показывают как меняется ток коллектора транзистора при изменении напряжения коллектор-эмиттер и некотором постоянном токе базы (или напряжении база-эмиттер).

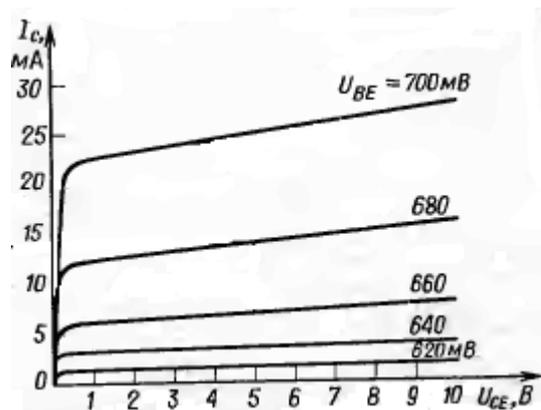


Рис. 42. Выходные ВАХ биполярного транзистора в схеме ОЭ

Из приведенного графика видно, что зависимость тока от напряжения через транзистор имеет нелинейный характер. Практически же приходится решать задачи определения тока в цепи, содержащей наряду с транзистором и другие эле-

менты. Графический метод решения задачи определения тока при последовательном соединении транзистора (или любого другого элемента с нелинейной ВАХ) и сопротивления нагрузки получил название **метода нагрузочных линий**. Оказывается график изменения тока через сопротивление легко построить прямо на графике с семейством ВАХ транзистора. В соответствии с законом Ома эта зависимость имеет вид прямой линии, поэтому для ее построения достаточно задать две точки. Первая точка лежит на оси абсцисс, она соответствует нулевому току через сопротивление, в этом случае напряжение на транзисторе будет равно напряжению источника питания. Вторая точка лежит на оси ординат, она соответствует максимальному току через сопротивление, что равносильно нулевому напряжению на транзисторе. Ток через сопротивление будет равен $U_{ИП}/R$. Все остальные возможные значения тока лежат на прямой, соединяющей эти точки (рис. 43).



Рис. 43. Построение нагрузочной прямой

Точка, соответствующая току через транзистор в отсутствие сигнала получила название **рабочей точки**. Положение рабочей точки устанавливается с помощью задания определенного тока в цепи базы. Для этого к переходу база-эмиттер прикладывается напряжение **смещения**, открывающее транзистор.

Основные характеристики биполярного транзистора: максимальный ток коллектора, максимальное напряжение между выводами коллектор-эмиттер, максимальная рассеиваемая мощность, коэффициент усиления по току, граничная частота усиления (соответствует частоте на которой усиление транзистора

становиться равным единице, т.е. он перестает усиливать). Важной характеристикой транзистора является передаточная проводимость (отношения выходного тока к входному напряжению) или **крутизна**.

4.3. Полевой транзистор

Полевой транзистор может иметь четыре вывода, три из них основные: **сток**, **исток** и **затвор**. Четвертый вывод, который иногда присутствует у полевых транзисторов, - вывод **подложки**. Вывод подложки обычно соединяют с истоком. В полевом транзисторе в отличие от биполярного используются носители заряда одного знака, только основные. Ток в полевом транзисторе проходит по **каналу**. Канал легирован носителями одного вида, поэтому и говорят «транзистор с каналом *n*- типа». Управляется он напряжением, а не током, как биполярный транзистор. Различают шесть видов полевых транзисторов, на рисунке 44 показаны их условные обозначения.

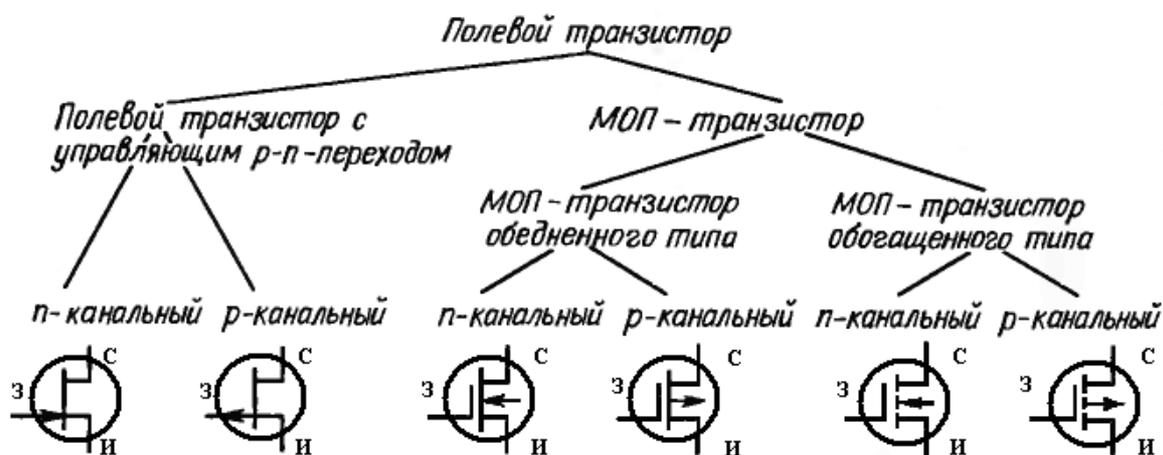


Рис. 44. Виды и условные обозначения полевых транзисторов

В целом полевые транзисторы делятся на две группы:

- Полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом;
- Полевые транзисторы с изолированным затвором. На рисунке они названы МОП-транзисторы, сокращение Метал-Окисел-Полупроводник. Можно встретить также название МДП-транзисторы – Металл-Диэлектрик-

Полупроводник. Затвор этих транзисторов изолирован непроводящим материалом от проводящего канала.

Рассмотрим принцип работы такого транзистора на примере транзистора с управляющим $p-n$ переходом (рис. 45). Напряжение между выводами стока и истока прикладывается «плюсом» к стоку (Для канала p - типа – «минусом» к стоку). Хотя канал практически симметричен и при неправильном включении ток будет протекать все равно. Здесь правильнее считать стоком не конкретный вывод транзистора, а именно более положительный вывод. Сток и исток просто меняются местами при изменении полярности питания.

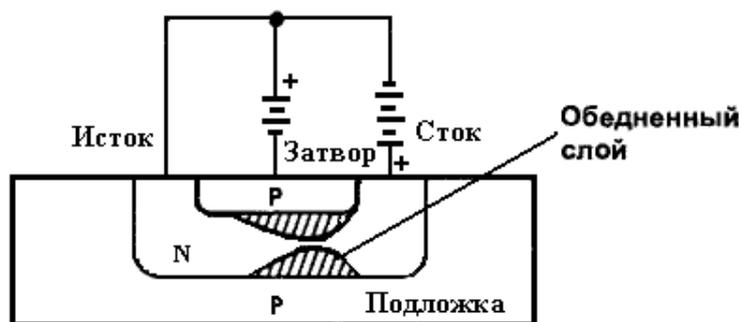


Рис. 45. Структура полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом и каналом n -типа

Напряжение между затвором и истоком прикладывается «минусом» к затвору, так что $p-n$ переход оказывается обратнo смещенным. Отметим, что обратнo смещенный $p-n$ переход имеет очень высокое сопротивление, можно считать, что ток в цепи затвора не протекает. Включение $p-n$ перехода в цепи затвора в прямом направлении недопустимо, транзистор в этом случае неработоспособен. Отрицательное напряжение затвора вытесняет электроны из области канала, непосредственно прилегающей к затвору, обедняя ее носителями заряда (отсюда и название – обедненного типа). Сечение канала уменьшается, а его сопротивление проходящему току увеличивается.

Обедненный слой шире у стока, т.к. напряжение стока складывается с напряжением затвора, создавая ближе к стоку более высокое запирающее напряжение, чем у истока. Ток через транзистор максимален, когда напряжение на за-

творе равно нулю. Напряжение на затворе, при котором ток прекращается совсем, называется **напряжением отсечки**.

Интересной особенностью полевых транзисторов является то, что ток стока имеет отрицательный температурный коэффициент, т.е. с ростом температуры он уменьшается. Напряжение отсечки, также уменьшается с повышением температуры, это приводит к увеличению тока стока за счет увеличения разности между напряжением затвор-исток и напряжением отсечки. При определенном значении тока стока и напряжения затвор-исток эти процессы компенсируют друг друга (так называемая «**термостабильная точка**»).

Транзисторы обедненного типа называют еще полевыми транзисторами с **встроенным каналом**, подчеркивая этим, что физический канал определенного типа создается внутри транзистора в ходе его изготовления. Транзисторы с управляющим $p-n$ переходом бывают только обедненного типа. В отличие от этого, транзисторы обогащенного типа или транзисторы с **индуцированным каналом** не имеют физически созданного канала. Канал в них формируется при приложении на затвор напряжения (рис. 46). Отрицательное напряжение на затворе транзистора с p -каналом притягивает из области подложки к затвору дырки, создавая канал p -типа. Без напряжения, приложенного к затвору, такой транзистор будет закрыт, т.е. он работает подобно биполярному транзистору. Полевые транзисторы обогащенного типа – это только МОП-транзисторы. У МОП-транзисторов сопротивление в цепи затвора еще больше, чем у полевых транзисторов с $p-n$ переходом. Затвор в них изолирован от канала тонким слоем стекла. При работе с МОП-транзисторами необходимо соблюдать меры предосторожности, т.к. напряжение на затворе в несколько десятков вольт может вывести их из строя, а на поверхности кожи может накопиться статическое электричество, создающее напряжение в сотни вольт.

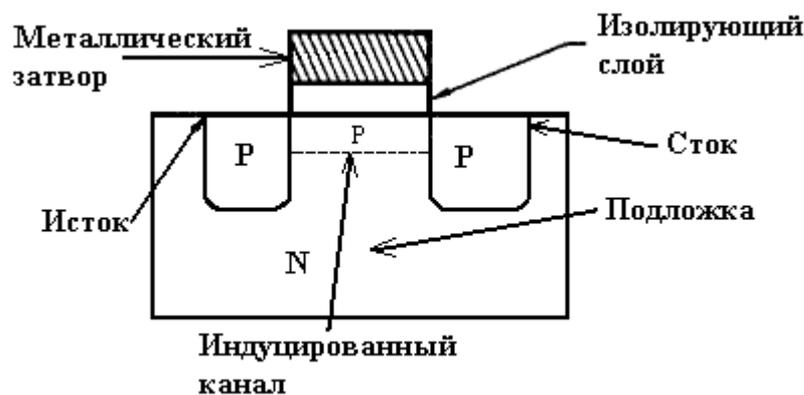


Рис. 46. Структура полевого транзистора обогащенного типа с p -каналом

Несмотря на то, что ток в цепи затвора полевых транзисторов не протекает, для анализа свойств полевых транзисторов также используются два вида ВАХ:

- **Стоко-затворная характеристика** – показывает зависимость тока стока от напряжения затвор-исток;
- **Выходные характеристики** – отображают зависимость тока стока от напряжения сток-исток при заданном напряжении затвор-исток, подобны выходным характеристикам биполярного транзистора.

Полевой транзистор характеризуется максимальным током стока, максимально допустимыми значениями напряжения между выводами сток-исток и затвор-исток, напряжением отсечки, максимальной рассеиваемой мощностью, крутизной стоко-затворной характеристики и частотными свойствами.

4.4. Тиристор

Тиристор – электронный элемент, работающий в ключевом режиме. Это значит, что он может находиться в двух состояниях: открытом и закрытом. В открытом состоянии тиристор имеет очень малое сопротивление току, в закрытом он не пропускает ток. Переход тиристора из закрытого состояния в открытое происходит быстро под действием кратковременного импульса тока, подаваемого на управляющий электрод приложением положительного относительно катода потенциала к управляющему электроду. В структуре тиристора четыре легированных области и три p - n перехода (рис. 47).

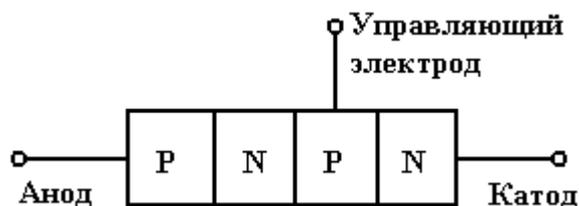


Рис. 47. Структура тиристора

Подобно транзистору тиристор имеет три вывода: **анод**, **катод** и **управляющий электрод**. Подобно диоду тиристор имеет одностороннюю проводимость. В открытом состоянии он пропускает ток только если вывод анода имеет более высокий потенциал по сравнению с выводом катода. При обратной полярности приложенного напряжения тиристор закрывается. Тиристор также закрывается при снижении величины тока через него ниже предельной величины, называемой **током удержания**.

ВАХ тиристора имеет S - образный вид (рис. 48). На характеристике есть участок с отрицательным сопротивлением, он преодолевается мгновенно при включении тиристора.

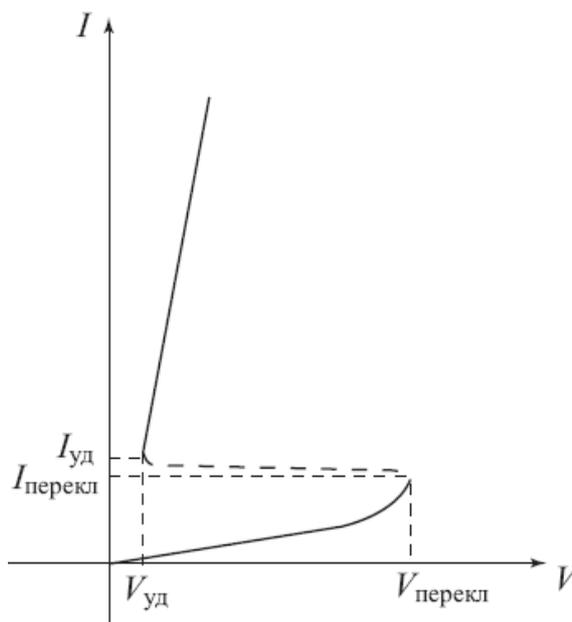


Рис. 48. Вольт-амперная характеристика тиристора

На принципиальной схеме тиристор обозначается как показано на рисунке 49. Тиристоры широко используются в устройствах автоматики для коммутации

больших токов, однако не могут работать на высоких частотах, – несколько килогерц, – типичное значение предельной частоты для основных типов тиристоров.

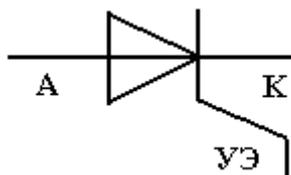


Рис. 49. Обозначение тиристора на принципиальной схеме

Основные параметры, характеризующие тиристор: максимально допустимый прямой ток, максимальное обратное напряжение, минимальное отпирающее значение тока и напряжения на управляющем электроде, величина тока удержания, максимально допустимая частота следования тока.

Вопросы для самостоятельной проработки:

1. Почему полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью.
2. Какой переменный ток полупроводниковый диод не сможет выпрямить.
3. Что такое основные носители заряда.
4. Если вам поставлена задача выбрать полупроводниковый диод для электронной схемы, какие характеристики диода нужно учитывать.
5. Какие виды выпрямительных схем вы знаете, чем они отличаются, каковы их преимущества и недостатки.
6. Кроме выпрямления переменного тока, как еще может использоваться полупроводниковый диод.
7. Какие типы биполярных транзисторов вы знаете, нарисуйте их структурную схему и условное обозначение на принципиальных схемах. Объясните принцип работы биполярного транзистора.
8. Какие схемы включения биполярного транзистора вы знаете, нарисуйте

- их для транзистора обратной проводимости, укажите полярность подключения источника питания к выводам транзистора. Какие особенности есть у каждой схемы включения.
9. Чем отличается ВАХ биполярного транзистора от ВАХ полупроводникового диода.
 10. Как выглядит входная характеристика биполярного транзистора.
 11. Каков принцип работы полевого транзистора.
 12. Чем отличаются полевые транзисторы обогащенного и обедненного типов.
 13. Попробуйте нарисовать стоко-затворную характеристику полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом и каналом n -типа.
 14. Какие основные характеристики имеет тиристор.
 15. Как выглядит ВАХ тиристора, поясните ее поведение.

5. Построение аналоговых электронных схем

Очень редко электронные компоненты работают отдельно, «сами по себе», в схемах, не содержащих ничего более, кроме источника питания и одного элемента, например, схема нагревателя или освещение. Такие схемы считаются даже не электронными, а электротехническими. Электронные схемы, как правило, содержат несколько электронных элементов, порой десятки и сотни элементов, соединенных между собой для согласованной работы и выполнения той или иной задачи. Построение хорошей, надежно работающей электронной схемы требует не только хорошего знания физических законов, управляющих работой элементов, но и определенного таланта, смекалки и гибкости ума. Недаром многие опытные разработчики электроники считают этот процесс искусством, родственным живописи или поэзии. Вот, например, стоит задача: соединить три лампочки и один звонок с помощью трех переключателей таким образом, чтобы при нажатии на переключатель загоралась соответствующая лампочка и звенел звонок. Источником питания служит обычная сеть переменного тока, и лампочки, также, как и звонок, рассчитаны на полное напряжение этой сети, т.е. включаться лампочка и звонок должны параллельно, иначе напряжения будет недостаточно. Но один переключатель должен включать только одну лампочку. Эта простая на первый взгляд задачка многих заставляет поломать голову и кое-кто даже утверждает, что она вообще не решается. Известен случай, когда в один из американских университетов абитуриент, решивший эту задачку был принят без экзаменов. Умение мастерски решить задачу, из какой бы области эта задача ни была, - всегда искусство. Но мастерство начинается с простых упражнений. Рассмотрим как выполняется построение некоторых простых электронных схем.

5.1. Параметрический стабилизатор

Параметрический стабилизатор – простейшее устройство для стабилизации напряжения, основанное на свойствах **зенеровского** или **опорного диода**, называемого также **стабилитроном** (рис. 50)



Рис. 50. Условное обозначение стабилитрона

Стабилитрон работает на обратной ветви ВАХ диода, при приложении к *p-n* переходу обратного напряжения, когда ток между анодом и катодом практически не протекает. Мы говорим «практически», т.е. ток все же есть, только очень небольшой, обусловленный неосновными носителями заряда. Если обратное напряжение увеличивать, то энергия движущихся заряженных частиц будет расти и она может возрасти настолько, что эти частицы при соударениях с узлами кристаллической решетки начнут выбивать новые заряженные частицы, начнут, как говорят, «размножаться». Ток в этом случае резко возрастает и наступает пробой. Но пробой тоже бывает разный, различают **электрический** пробой, когда начинается лавинообразный процесс размножения носителей, ток при этом растет настолько быстро, что обратная ветвь ВАХ поворачивается почти вертикально (рис. 51). И возникает эффект сохранения значения напряжения практически неизменным, эффект стабилизации напряжения. Если ток ограничить, не давая ему расти до опасных значений, то энергия приложенного электрического поля будет преобразовываться в *p-n* переходе в энергию размножающихся носителей, не повреждая его. Если же ток не ограничивать, то он растет дальше, разогревает *p-n* переход до высоких температур и разрушает его. Это уже **тепловой** пробой.

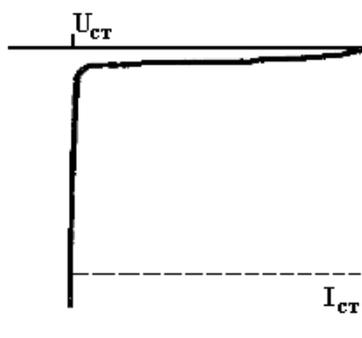


Рис. 51. График изменения тока при пробое стабилитрона

Отсюда ясно, что работа стабилитрона ограничена рамками минимального и максимального тока, протекающего через стабилитрон. Схема включения параметрического стабилизатора приведена на рис. 52.

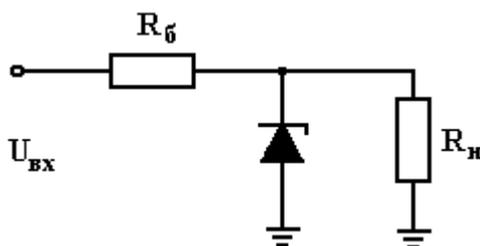


Рис. 52. Подключение параметрического стабилизатора к нагрузке

Стабилитрон подключается параллельно нагрузке, обеспечивая на ней при пробое постоянное напряжение. Входное напряжение нестабилизированное и может колебаться. Балластное сопротивление – необходимая часть схемы параметрического стабилизатора, его задача – не допустить увеличения тока через стабилитрон выше максимальных значений. Но через балластное сопротивление протекает вообще весь ток, поэтому оно ограничивает ток и через нагрузку. Рассматриваем два крайних случая:

- Напряжение на входе минимально. Рассчитаем величину балластного сопротивления:

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх min}} - U_{\text{стаб}}}{I_{\text{нагр}} + I_{\text{стаб min}}} \quad (5.1)$$

- Напряжение на входе максимально. Рассчитаем необходимую мощность рассеивания стабилитрона:

$$P_{\text{стаб}} = \left(\frac{U_{\text{вх max}} - U_{\text{стаб}}}{R_{\sigma} - I_{\text{нагр}}} \right) \cdot U_{\text{стаб}} \quad (5.2)$$

Конечно, сначала мы определяем сопротивление балластного резистора, а уже затем мощность стабилитрона и, казалось бы, только тогда можем выбрать стабилитрон. Но уже при расчете балластного резистора мы должны задать минимальный ток стабилизации – параметр еще не выбранного стабилитрона. Многие задачи расчета электронных схем таковы, на первом этапе мы должны воспользоваться некоторыми типовыми, в некоторой степени произвольными, значениями, затем они уточняются и выбор конкретизируется. Иногда это может потребовать повторного расчета с новыми параметрами.

5.2. Эмиттерный повторитель

Эмиттерный повторитель – это схема включения биполярного транзистора с ОК (рис. 53). Выходной сигнал в этой схеме снимается с эмиттера, напряжение на выходе меньше напряжения на входе на величину падения напряжения на переходе база-эмиттер - $0,6 \text{ В}$. Усиления по напряжению поэтому нет, но есть усиление по току.

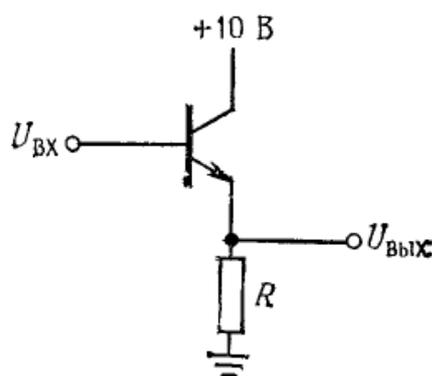


Рис. 53. Эмиттерный повторитель

Резистор в коллекторной цепи в эмиттерном повторителе отсутствует. Определим входное и выходное сопротивление эмиттерного повторителя. Пусть напряжение на базе изменилось на величину ΔU_B , соответствующее изменение напряжения эмиттера будет в точности равно ему, если только абсолютная ве-

личина напряжения на базе не станет меньше $0,6 В$

$$\Delta U_{\text{э}} = \Delta U_{\text{б}} . \quad (5.3)$$

С учетом того, что эмиттерное сопротивление обычно меньше сопротивления нагрузки, подключаемого параллельно, изменение тока эмиттера составит:

$$\Delta I_{\text{э}} = \Delta U_{\text{э}} / R_{\text{э}} . \quad (5.4)$$

Соответствующее изменение базового тока:

$$\Delta I_{\text{б}} \approx \Delta I_{\text{э}} / \beta . \quad (5.5)$$

И входное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{б}} / \Delta I_{\text{б}} = \beta \cdot R_{\text{э}} \quad (5.6)$$

Коэффициент усиления по току β для многих транзисторов величина порядка 100, поэтому вход эмиттерного повторителя оказывается высокоомным и незначительно нагружает источник сигнала.

Включение эмиттерного повторителя как буфера между параметрическим стабилизатором и нагрузкой значительно улучшает характеристики стабилизатора (рис. 54)

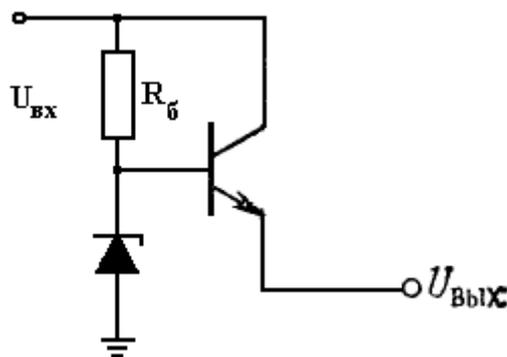


Рис. 54. Улучшенный вариант стабилизатора напряжения

Ток стабилитрона в таком стабилизаторе относительно независим от тока нагрузки. Балластный резистор одновременно выполняет функцию подачи смещения в базу транзистора. Напряжение на выходе будет меньше напряжения стабилизации на $0,6 В$. Когда входное напряжение на транзисторе увеличивается, выходное напряжение также пытается увеличиться. Напряжение на базе транзистора установлено с помощью стабилитрона. Если на эмиттере появляется по-

ложительный потенциал больший, чем на базе, проводимость транзистора уменьшается. Когда транзистор уменьшает свою проводимость, это действует так же, как включение между входом и выходом большого резистора. Большая часть добавившегося входного напряжения падает на транзисторе и только малая его часть увеличит выходное напряжение.

Недостатком стабилизатора с эмиттерным повторителем является то, что стабилитрон должен быть рассчитан на достаточно высокую мощность

Связь между несколькими каскадами усилителя обычно осуществляется с помощью емкостей. Чтобы передавать сигнал из одного каскада и обеспечить независимое управление режимом работы внутри каждого каскада. Рассмотрим включение эмиттерного повторителя в качестве одного из каскадов усилителя (рис. 54).

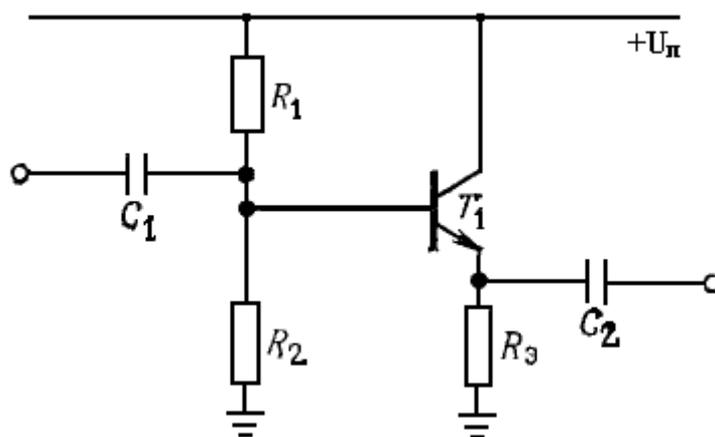


Рис. 54. Эмиттерный повторитель в составе усилителя

Рассчитаем режим работы транзистора. Пусть $U_{пит} = 15 В$, сигнал имеет полосу частот от $20 Гц$ до $20 кГц$, ток покоя (ток в отсутствии сигнала) $1 мА$. Для того, чтобы биполярный транзистор мог усиливать сигнал, необходимо подать напряжение смещения в цепь базы. На схеме рис. 54 это сделано с помощью базового делителя. Усиливается переменный сигнал, поэтому рабочая точка должна находиться равноудаленно между положительным и отрицательным выводом питания. Это определяет напряжение на эмиттере:

$$U_{\text{э}} = U_{\text{пит}} / 2 \quad (5.7)$$

Зная ток покоя и напряжение на эмиттере легко определить сопротивление в цепи эмиттера:

$$R_{\text{э}} = \frac{U_{\text{пит}}}{2 \cdot I_{\text{покоя}}} = 7,5 \text{ кОм} \quad (5.8)$$

Напряжение на базе транзистора:

$$U_{\text{б}} = U_{\text{э}} + 0,6 \text{ В} \quad (5.9)$$

С учетом заданной величины напряжения питания, падение на верхнем сопротивлении делителя должно составить $7,5 \text{ В} - 0,6 \text{ В} = 6,9 \text{ В}$, на нижнем $8,1 \text{ В}$. Рассчитаем значения сопротивлений делителя. Чтобы сигнал напряжения эффективно передавался в нагрузку, ее сопротивление должно быть больше сопротивления источника. В нашей схеме источником сигнала для входа транзистора выступает базовый делитель. Сопротивления делителя подключены к источнику: верхнее к плюсовому выводу, нижнее – к минусовому. Но сопротивление источника очень мало, поэтому можно считать, что сопротивления базового делителя соединены параллельно. Таким образом, условие эффективной передачи сигнала напряжения в базу транзистора можно записать:

$$R_1 // R_2 \ll R_{\text{вх}} \quad (5.10)$$

Сопротивление со стороны входа эмиттерного повторителя больше сопротивления эмиттерного резистора в β раз, считая $\beta = 100$, $R_{\text{вх}} = 750 \text{ кОм}$.

Если величины различаются в 10 раз, то можно считать, что одна много меньше другой, поэтому, параллельное соединение резисторов базового делителя должно иметь сопротивление $750/10 = 75 \text{ кОм}$, или меньше. Учитывая относительные величины сопротивлений, выбираем из стандартного ряда: верхнее плечо делителя 130 кОм , нижнее плечо 150 кОм .

Определим величину емкости разделительного конденсатора C_1 . Совместно с нагрузкой, в качестве которой выступает параллельное соединение сопротивлений базового делителя и входного сопротивления эмиттерного повторителя, этот конденсатор образует фильтр высокой частоты. Поэтому необходи-

мо рассчитать его на пропускание нижней частоты сигнала - 20 Гц . Эквивалентное сопротивление делителя $130 \parallel 150 = 70 \text{ кОм}$. Параллельное соединение с входом эмиттерного повторителя уменьшит его до 64 кОм . Из условия:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{2\pi R_{\text{ЭКВ}} C_1} = f < 20 \text{ Гц} , \quad (5.11)$$

находим C_1 , емкость составит по крайней мере $0,15 \text{ мкФ}$.

Определим величину C_2 , емкость этого конденсатора с неизвестным сопротивлением нагрузки также образует фильтр высоких частот и должна быть рассчитана на пропускание нижней частоты 20 Гц . Если считать, что сопротивление нагрузки будет не меньше сопротивления в цепи эмиттера, то из условия, аналогичного (5.11), находим C_2 - 1 мкФ . Так как фильтр получился двухкаскадный, возьмем значения емкостей из стандартного ряда большие полученных: $C_1 = 0,5 \text{ мкФ}$, $C_2 = 3,3 \text{ мкФ}$.

5.3. Усилитель на транзисторе ОЭ

Рассмотрим усилительный каскад с транзистором, включенным по схеме с ОЭ (рис. 55).

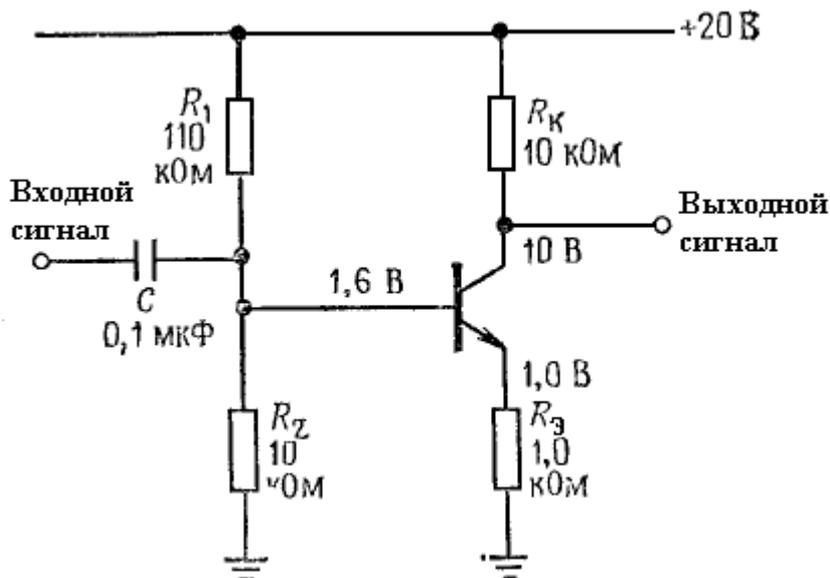


Рис. 55. Усилительный каскад на транзисторе с ОЭ

При заданных на схеме параметрах элементов определим усиление схемы.

Напряжение на коллекторе транзистора (и на выходе усилителя) определяется выражением:

$$U_K = U_{пит} - I_K R_K . \quad (5.12)$$

Оно меньше напряжения питания на величину падения на коллекторном резисторе.

Если на вход схемы поступает сигнал, изменяющий напряжение базы ΔU_B , то в эмиттере возникают такие же по амплитуде изменения $\Delta U_{Э} = \Delta U_B$. Они приводят к изменению эмиттерного тока (см. (5.4)): $\Delta I_{Э} = \Delta U_{Э} / R_{Э}$ и к примерно таким же изменениям коллекторного тока $\Delta I_K \approx \Delta I_{Э}$. Это приводит к изменению величины падения напряжения на коллекторном резисторе и напряжения на коллекторе:

$$\Delta U_K = -\Delta I_K R_K = \frac{\Delta U_B \cdot R_K}{R_{Э}} \quad (5.13)$$

Колебания напряжения на коллекторе – это выходной сигнал, а в базе – входной, коэффициент усиления каскада, равный их отношению, определяется выражением:

$$K = \Delta U_K / \Delta U_B = R_K / R_{Э} \quad (5.14)$$

Коэффициент усиления сигнала по напряжению в усилительном каскаде на транзисторе с ОЭ равен отношению сопротивления коллекторного резистора к эмиттерному. В примере рис. 55, каскад усилит сигнал по напряжению в 10 раз.

При уменьшении сопротивления резистора в цепи эмиттера до нуля усиление не возрастет до бесконечности. Дело в том, что эмиттерный переход имеет собственное сопротивление, оно «включено» последовательно с внешним резистором. Когда внешнего резистора нет, внутреннее сопротивление определяет общую величину сопротивления в цепи эмиттера и величину коэффициента усиления каскада. Собственное сопротивление эмиттера невелико, при комнатной температуре:

$$r_{Э} = 25 / I_{Э} (\text{мА}) , \quad (5.15)$$

но оно зависит от величины тока коллектора. Когда на транзистор действует напряжение сигнала, ток коллектора меняется и если в цепи эмиттера нет внешнего сопротивления, то вместе с внутренним сопротивлением эмиттера будет изменяться и усиление для различных уровней сигнала. Это приведет к сильным искажениям формы сигнала.

5.4. Использование обратной связи в усилительных схемах

Обратной связью (ОС) в усилителях называют явление передачи части сигнала из выходной цепи во входную. Электрическая цепь, обеспечивающая эту передачу, называется **цепью** или **петлей обратной связи**.

Обратную связь называют **отрицательной**, если ее сигнал вычитается из входного сигнала, и **положительной**, если сигнал ОС суммируется с входным. При отрицательной обратной связи коэффициент усиления уменьшается, при положительной – увеличивается.

Для количественной оценки степени влияния цепи обратной связи используют **коэффициент обратной связи**, показывающий, какая часть выходного сигнала поступает на вход усилителя.

$$k_{OC} = \frac{U_{OC}}{U_{ВЫХ}} \quad (5.16)$$

На рис. 56 схематически показана петля ОС в усилителе. Коэффициент усиления в усилителе с ОС:

$$K_{OC} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \quad (5.17)$$

Напряжение на входе схемы рис. 56 в случае отрицательной ОС:

$$U_1 = U_{вх} - U_{OC}, \quad (5.18)$$

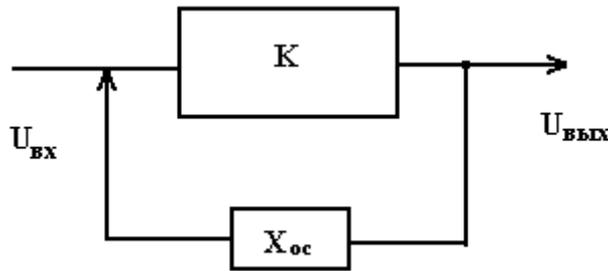


Рис. 56. Схема усилителя, охваченного ОС

Напряжение обратной связи по определению:

$$U_{OC} = X_{OC} \cdot U_{вых} \quad (5.19)$$

Напряжение на выходе без обратной связи:

$$U_{ВЫХ} = K \cdot U_1, \quad (5.20)$$

Тогда:

$$K_{OC} = \frac{K \cdot U_1}{U_1 + U_{OC}} = \frac{K \cdot U_1}{U_1 + K \cdot X_{OC} \cdot U_1} = \frac{K}{1 + K \cdot X_{OC}} \quad (5.21)$$

Произведение $K \cdot X_{OC}$ называют **петлевым усилением**, а $(1 + K \cdot X_{OC})$ - глубиной обратной связи.

Несмотря на то, что отрицательная обратная связь снижает величину коэффициента усиления, она положительно влияет на такие характеристики усилителя, как равномерность усиления в полосе частот, устойчивость к возбуждению. На рис. 57 приведены амплитудно-частотные характеристики усилителя без отрицательной обратной связи (кривая 2) и с такой связью (кривая 1).

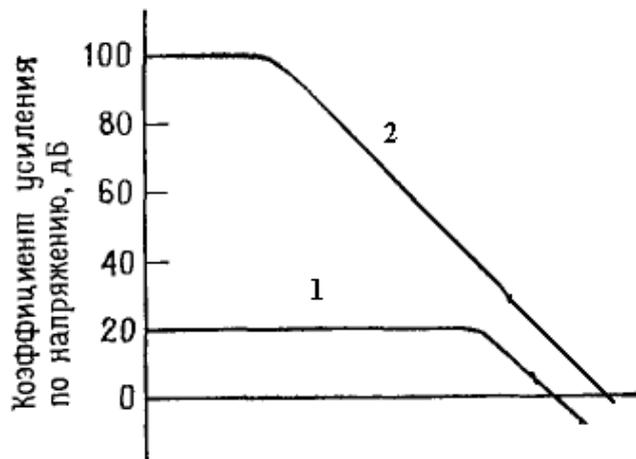


Рис. 57. АЧХ усилителя с ООС (1) и без нее (2)

Чем более сильной обратной связью охвачен усилитель, тем меньше его свойства зависят от параметров самого усилителя и тем больше они определяются цепью обратной связи.

5.5. Стабилизатор с обратной связью

Он содержит цепь обратной связи, контролирующую выходное напряжение. При изменениях выходного напряжения появляется управляющий сигнал. Этот сигнал управляет проводимостью транзистора. На рис. 58 изображена блок-схема стабилизатора с обратной связью. Нестабилизированное напряжение постоянного тока подается на вход стабилизатора. Более низкое стабилизированное постоянное напряжение появляется на выходе стабилизатора. К выходу стабилизатора подключена цепь выбора напряжения. Цепь выбора напряжения — это делитель напряжения, который подает выходное напряжение для сравнения на цепь регистрации ошибок. Это напряжение изменяется при изменениях выходного напряжения.

Цепь регистрации ошибок сравнивает выходное напряжение с опорным напряжением. Для получения опорного напряжения используется стабилитрон. Разность между выходным и опорным напряжением называется **напряжением ошибки**. Напряжение ошибки усиливается усилителем ошибки. Усилитель ошибки управляет проводимостью последовательно включенного транзистора. Проводимость транзистора меняется в ту или иную сторону для компенсации изменений выходного напряжения.

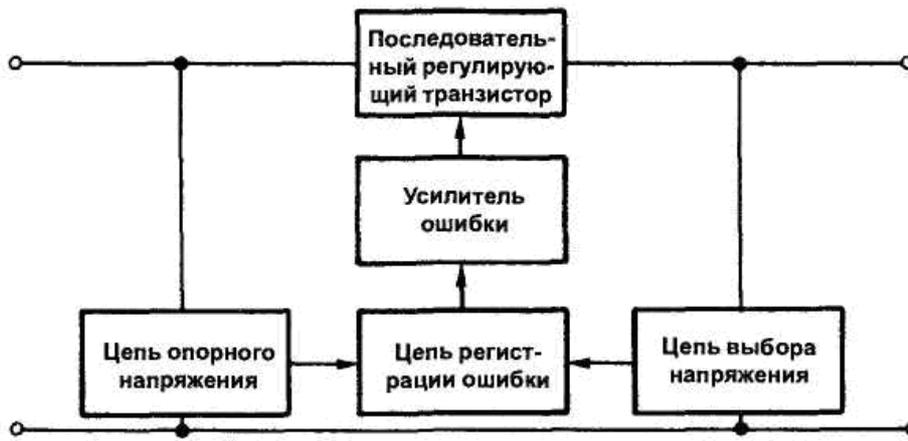


Рис. 58. Функциональная схема стабилизатора с обратной связью

На рис. 59 изображена схема стабилизатора напряжения с обратной связью. Резисторы R_3 , R_4 и R_5 — цепь выбора напряжения. Транзистор T_2 работает в качестве и регистратора, и усилителя ошибки. Стабилитрон D_1 и резистор R_1 задают опорное напряжение. Транзистор T_1 — последовательно включенный регулирующий транзистор. Резистор R_2 является коллекторной нагрузкой транзистора T_2 и подает смещение на базу транзистора T_1 .

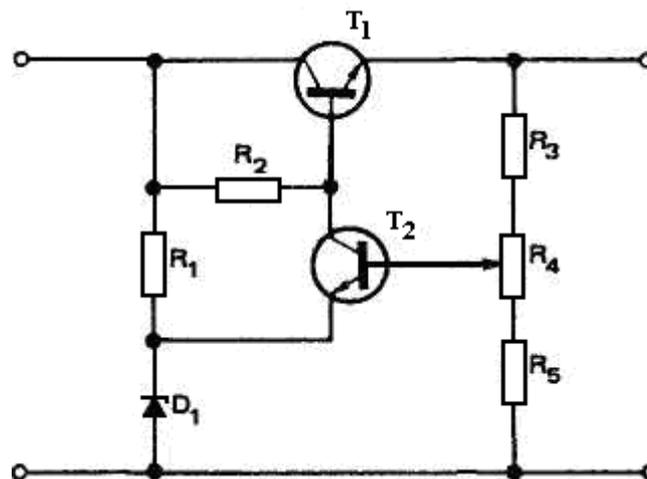


Рис. 59. Принципиальная схема стабилизатора с обратной связью

Если выходное напряжение начинает увеличиваться, то увеличится и напряжение, передаваемое для сравнения. Это увеличит напряжение смещения на базе транзистора T_2 . Напряжение на эмиттере транзистора T_2 удерживает постоянным стабилитрон D_1 . Это приводит к увеличению проводимости транзистора

T_2 и увеличению тока через резистор R_2 . А это, в свою очередь, приведет к уменьшению напряжения на коллекторе транзистора T_2 и на базе транзистора T_1 . Теперь уменьшатся прямое смещение транзистора T_1 и его проводимость. Когда проводимость транзистора убывает, через него течет меньший ток. Это снижает падение напряжения на нагрузке и компенсирует увеличение напряжения.

Выходное напряжение может быть точно установлено с помощью потенциометра R_4 . Для увеличения выходного напряжения стабилизатора движок потенциометра R_4 вращают в отрицательном направлении, что уменьшает напряжение база-эмиттер на базе транзистора T_2 , снижая его прямое смещение. Это приводит к уменьшению проводимости транзистора и к увеличению напряжения на коллекторе транзистора T_2 и на базе транзистора T_1 . Последнее увеличивает прямое смещение транзистора T_1 и его проводимость. Через нагрузку теперь будет течь больший ток, что увеличит выходное напряжение.

Серьезным недостатком последовательного стабилизатора является то, что транзистор включен последовательно с нагрузкой. Короткое замыкание в нагрузке приведет к большому току через транзистор, а это может вывести его из строя. Необходима цепь, поддерживающая ток, проходящий через транзистор, на безопасном уровне.

На рис. 60 изображена цепь, которая ограничивает ток через транзистор последовательного стабилизатора. Как видно из рисунка, в цепь обратной связи добавлен последовательный регулятор напряжения. Транзистор T_3 и резистор R_6 образуют цепь ограничения тока. Для того чтобы транзистор T_3 проводил, его переход база-эмиттер должен быть смещен в прямом направлении напряжением не менее $0,7\text{ В}$. Когда между базой и эмиттером под действием большого тока через резистор R_6 окажется приложено напряжение $0,7$ вольта, транзистор откроется.

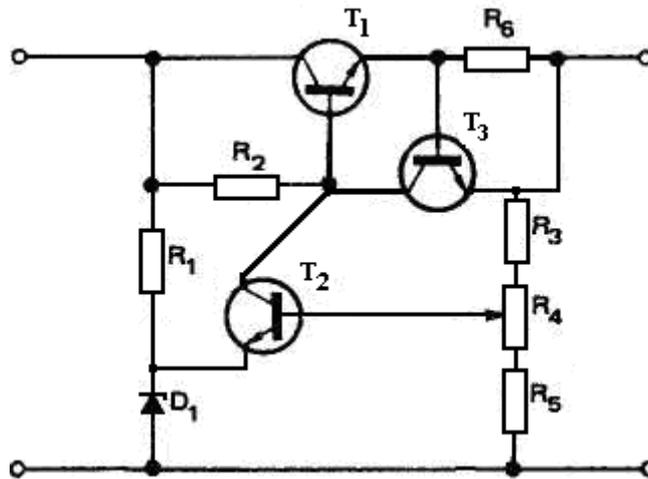


Рис. 60. Стабилизатор с цепью ограничения тока

Пусть $R_6 = 1 \text{ Ом}$, тогда ток, необходимый для получения на базе транзистора T_3 напряжения $0,7 \text{ В}$, равен: $I = 0,7 \text{ В} / 1 \text{ Ом} = 0,7 \text{ А}$.

Если через нагрузку протекает ток, меньший 700 мА , напряжение база-эмиттер транзистора T_3 меньше, чем $0,7 \text{ В}$, и он закрыт. Когда транзистор T_3 закрыт, цепь работает так, как будто его не существует. Когда ток превышает 700 мА , падение напряжения на резисторе R_6 превышает $0,7 \text{ В}$. Это приводит к тому, что транзистор T_3 начинает проводить ток через резистор R_2 . Это уменьшает напряжение на базе транзистора T_1 , и его проводимость уменьшается. Ток нагрузки не может превышать 700 мА . Величина предельного тока может быть изменена путем изменения величины резистора R_6 . Увеличение R_6 уменьшает величину предельного тока.

Последовательный стабилизатор с обратной связью содержит значительное количество компонентов, это можно рассматривать как недостаток. Малые габариты и вес имеют современные стабилизаторы в интегральном исполнении, они дешевы и просты в применении. Большинство стабилизаторов на интегральных микросхемах имеют только три вывода (вход, выход и земля) и могут быть подсоединены непосредственно к выходу фильтра выпрямителя (рис. 61).



Рис. 61. Схема включения стабилизатора в интегральном исполнении

Стабилизаторы на интегральных микросхемах обеспечивают широкий диапазон выходных напряжений как положительной, так и отрицательной полярности. Если стабилизатора с нужным напряжением нет среди стандартных микросхем, то существуют микросхемы стабилизаторов с регулируемым напряжением.

При выборе микросхемы стабилизатора необходимо знать напряжение и ток нагрузки, а также электрические характеристики нестабилизированного блока питания. Микросхемы стабилизаторов классифицируются по их выходному напряжению. Микросхемы стабилизаторов с фиксированным выходным напряжением имеют три вывода и обеспечивают только одно выходное напряжение. Существуют микросхемы стабилизаторов напряжения как положительной, так и отрицательной полярности. Двухполярные стабилизаторы напряжения обеспечивают и положительное и отрицательное напряжения. Микросхемы стабилизаторов с регулируемым напряжением существуют как в однополярном, так и в двухполярном вариантах. При использовании любых микросхем стабилизаторов напряжения обращайтесь к данным, предоставляемым производителем.

Вопросы для самостоятельной проработки:

1. Чем различаются электрический и тепловой пробой стабилитрона.
2. Каковую роль в параметрическом стабилизаторе напряжения играет балластное сопротивление.
3. Может ли ток нагрузки параметрического стабилизатора превышать максимально допустимый ток стабилитрона.

4. Каково входное сопротивление эмиттерного повторителя.
5. Нарисуйте схему стабилизатора напряжения, использующего эмиттерный повторитель
6. Как определить коэффициент усиления каскада на транзисторе, включенном по схеме ОЭ, ОК.
7. В чем суть действия обратной связи в усилителях, применение какого вида обратной связи используется в усилительных схемах и почему.
8. Поясните принцип работы стабилизатора напряжения с обратной связью.
9. Как избежать повреждения схемы стабилизатора при коротком замыкании в нагрузке, поясните принцип работы ограничителя тока.
10. Какие особенности имеют стабилизаторы напряжения в интегральном исполнении.

6. Цифровая электроника

6.1. Принципы цифровой электроники

Все развитие современной кибернетики и цифровой электроники основано на двух краеугольных камнях, заложенных в фундамент математики в далеком прошлом. Еще в 17 веке немецкий математик и философ Готфрид Лейбниц показал, что двоичная система счисления позволяет выполнять все численные операции и является простейшей из позиционных систем счисления. А в середине 19 века английский математик Джордж Буль, анализируя логику с точки зрения математики, создал алгебру логики. Использование алгебры логики или, как ее часто называют, булевой алгебры, позволило записать алгоритм выполнения логически связанных операций в виде математических функций, оперирующих двумя понятиями: «Истина» и «Ложь».

С развитием электроники быстро пришло понимание того, что реализовать два устойчивых и хорошо различимых состояния электронного элемента достаточно просто, это состояния, когда на элементе низкое напряжение (он пропускает ток) и, наоборот, - высокое (он не пропускает ток). Электроника, основанная на элементах, способных находиться в двух состояниях, получила название **цифровой**. Процессы, происходящие между конечными состояниями, при переходе элемента из одного состояния в другое, цифровая электроника не рассматривает и учитывает лишь постольку, поскольку они могут помешать элементам выполнять свои функции. Идеальный элемент цифровой электроники должен переходить из одного состояния в другое мгновенно.

Цифровая электроника позволила практически реализовать устройства, выполняющие логические и математические операции, создать множество автоматически выполняющих работу механизмов-роботов и, наконец, такой универсальный электронный инструмент, как компьютер. Основой цифровой электро-

ники являются так называемые **логические элементы** – элементы, выполняющие логические операции, а также элементы электронной **памяти**, необходимые в том случае когда логические операции выполняются одновременно и необходимо сохранить результат одной операции для выполнения другой. Электронные элементы памяти способны сохранять свое состояние неограниченно долго при наличии питания. Развитие полупроводниковой цифровой электроники потребовало разработки специальных электронных устройств, выполняющих определенные действия с цифровыми электрическими сигналами, такие как сравнение, преобразование, подсчет и другие. Такие устройства были реализованы в виде комбинационных логических схем внутри **цифровых микросхем**. Цифровые микросхемы состоят из большого числа логических элементов, соединенных определенным образом и могут рассматриваться как самостоятельное электронное устройство, т.к. выполнены в одном корпусе, и реализуют строго определенные действия. Специальные цифровые микросхемы комбинационной логики дополняют элементный состав цифровой электроники.

6.2. Алгебра булевой алгебры

В алгебре логики рассматриваются переменные, которые могут принимать только два значения: «Ложь» и «Истина» или 0 и 1. Между логическими переменными определены три операции:

- Операция логического отрицания (инверсия, операция НЕ), обозначается чертой над логической переменной: \bar{x} , читается «не икс»;
- Операция логического умножения (конъюнкция, операция И), обозначается точкой между логическими переменными, точку можно опускать: $x \cdot y$ или xy ;
- Операция логического сложения (дизъюнкция, операция ИЛИ), обозначается знаком $\square \vee \square$ или + между логическими переменными: $x \vee y$.

Следующие законы алгебры логики позволяют упрощать логические выраже-

ния:

законы отрицания:

$$x \vee \bar{x} = 1 \quad , \quad (6.1)$$

$$x \cdot \bar{x} = 0 \quad , \quad (6.2)$$

$$0 \vee x = x \quad , \quad (6.3)$$

$$1 \cdot x = x \quad , \quad (6.4)$$

$$1 \vee x = 1 \quad , \quad (6.5)$$

$$0 \cdot x = 0 \quad , \quad (6.6)$$

законы двойственности (теоремы де Моргана):

$$\overline{x \vee y} = \bar{x} \cdot \bar{y} \quad , \quad (6.7)$$

$$\overline{x \cdot y} = \bar{x} \vee \bar{y} \quad , \quad (6.8)$$

закон двойного отрицания:

$$\bar{\bar{x}} = x \quad (6.9)$$

законы поглощения:

$$x \vee x \cdot \bar{y} = x \quad (6.10)$$

$$x(x \vee y) = x \quad (6.11)$$

Любая логическая функция описывает связи между логическими переменными, например, мы можем сформулировать условие получения зачета автоматом по предмету (переменная Zch), если учитывается выполнение лабораторных работ (переменные $lab_1, lab_2, lab_3, lab_4$), посещаемость занятий (переменная Pos) и наличие хорошего конспекта лекций (K):

$$Zch = lab_1 \cdot lab_2 \cdot lab_3 \cdot lab_4 \cdot Pos \cdot K \quad . \quad (6.12)$$

Все переменные связаны логическим умножением, потому что условие получения зачета автоматом строгое, т.е. логическая функция будет истинной только тогда, когда будут истинными все входящие в выражение логические переменные. Условие допуска к зачету может выглядеть так:

$$Zch = lab_1 \cdot lab_2 \cdot lab_3 \cdot lab_4 \cdot (1 + Pos + K) \quad (6.13)$$

Т.е. при условии выполнения всех лабораторных работ, даже если переменные

Pos и K не являются истинными, студент допускается к сдаче зачета.

6.3. Логические элементы

Так как в алгебре логики определены три действия над переменными, то и основных логических элементов, реализующих эти действия также три. Общее же количество логических элементов больше трех. В первую очередь из-за того, что наибольшее распространение получили логические элементы, совмещающие несколько логических операций.

При выборе того, какой уровень напряжения считать за 1 – низкий или высокий, существует определенный произвол. Если за 1 принимается высокий уровень напряжения, то логика называется **положительной**, если наоборот, - то **отрицательной**. Выбор типа логики определяет способ реализации конкретного логического элемента и никак не влияет на результат работы его работы. Очевидно, что при разработке цифровой схемы выбираются логические элементы, использующие один тип логики – или положительную, или отрицательную.

При использовании положительной логики и напряжении питания логических элементов $+5 В$, 1 – это $+5 В$, а 0 – это $0 В$, но для устранения неточности при разделении значений 0 и 1 диапазон напряжений, определяемых как 0 и 1, расширяется, например, может приниматься за 1 напряжение $+2,4 В$, а за 0 – $+0,4 В$.

Реальные электронные элементы обязательно имеют выводы для подключения питания. На принципиальной схеме эти выводы никогда не показываются.

6.2.1. Элемент НЕ

Элементом НЕ называют элемент, выполняющий операцию логического отрицания. На рис. 50 показано его условное обозначение на принципиальной схеме и **таблица истинности** – таблица, показывающая зависимость состояния

выхода от состояний входа(входов) элемента.

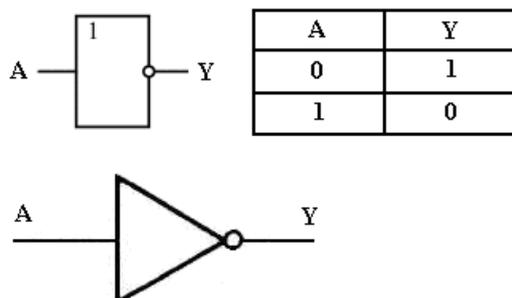


Рис. 50. Варианты условных обозначений и таблица истинности логического элемента НЕ

Этот элемент обычно называют **инвертором**. Инвертор имеет один вход. Задача инвертора — сделать состояние выхода противоположным состоянию входа. При использовании положительной логики состояние 1 называют **высоким**, для указания того, что напряжение в этом состоянии выше, чем в состоянии 0, состояние 0 называют **низким**. Если 1, или высокое состояние, подано на вход инвертора, на выходе появится низкое состояние, или 0. Если на вход инвертора подать 0, или низкое состояние, то на выходе появится высокое состояние, или 1.

6.2.2. Элемент И

Элементом И называют элемент, выполняющий операцию логического умножения (конъюнкции). На рис. 51 показано условное обозначение этого элемента на принципиальной схеме.

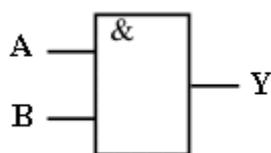


Рис. 51. Условное обозначение логического элемента И

Обычно элемент И имеет два входа и один выход, хотя количество входов может быть большим. На выходе элемента И появляется 1 только тогда, когда на все его входы поступает сигнал 1. Если на какой-либо из входов поступает 0, на выходе появляется 0. Другими словами, логическая переменная Y истинна тогда,

когда переменная A И переменная B обе истинны. (рис. 52)

A	B	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Рис. 52. Таблица истинности логического элемента И

6.2.3. Элемент ИЛИ

Элемент ИЛИ выполняет логическую операцию сложения. На выходе элемента ИЛИ появляется 1, если на любой из его входов подана 1. На его выходе появляется 0, если на все его входы поданы 0. Условное обозначение элемента и значения на выходе элемента ИЛИ с двумя входами приведены в таблице истинности на рис. 53.

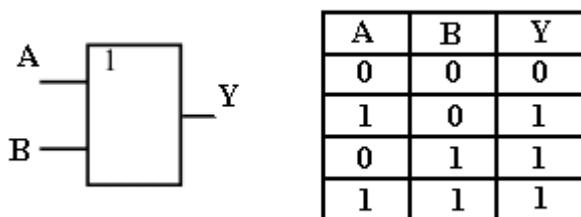


Рис. 53. Условное обозначение и таблица истинности элемента ИЛИ

6.2.4. Элементы И-НЕ, ИЛИ-НЕ

Это элементы, последовательно выполняющие две операции, сначала логическое умножение (сложение), а затем инверсию. Условные обозначения и таблицы истинности элементов показаны на рис. 54. С помощью соединения нескольких элементов И-НЕ (ИЛИ-НЕ) можно реализовать любую из логических функций, поэтому они более распространены, чем элементы И, ИЛИ, НЕ.

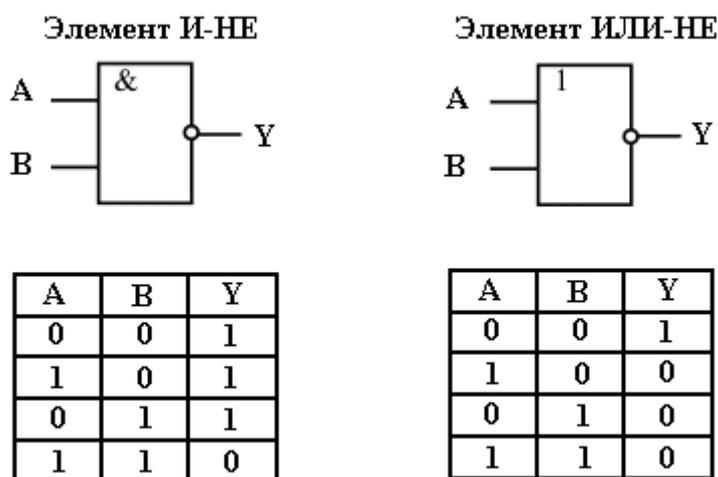


Рис. 54. Условные обозначения и таблицы истинности элементов И-НЕ, ИЛИ-НЕ

6.2.5. Элемент исключающее ИЛИ

Этот логический элемент также называют НЕРАВНОЗНАЧНОСТЬ. Элемент реализует логическую операцию «сумма по модулю два». Эта операция появилась в алгебре логики уже в новое время. Обозначается она символом \oplus и эквивалентна последовательности нескольких простых логических операций: $x \oplus y = \bar{x} \cdot y \vee x \cdot \bar{y}$. Результат выполнения операции сложения по модулю два совпадает со значением младшего разряда суммы двух двоичных чисел. Условное обозначение логического элемента и его таблица истинности показаны на рис. 55.

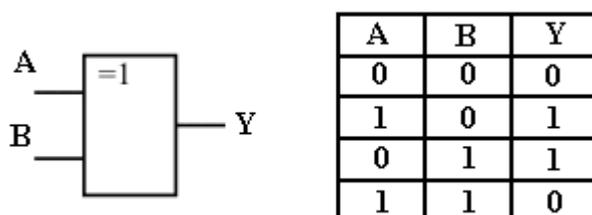


Рис. 55. Условное обозначение и таблица истинности элемента исключающее ИЛИ

Как же практически создаются электронные элементы, реализующий логические функции? Это можно сделать различными способами, например, на рисунке 56 показан вариант логического элемента ИЛИ на диодах.

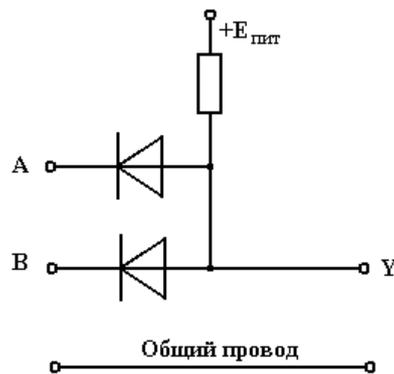


Рис. 56. Реализация логического элемента ИЛИ с использованием диодов

Здесь применена отрицательная логика. При заземлении любого из входов схемы на выходе также оказывается низкий уровень, при отсутствии входного сигнала – на выходе высокий уровень. Современные логические элементы построены на транзисторах.

6.3. Элементы памяти

6.3.1. Триггеры

Триггер – элементарная электронная ячейка памяти, способная хранить один разряд двоичного числа. Триггер имеет два устойчивых состояния, в каком из них он окажется зависит от его текущего состояния, он его «помнит». Существует несколько разновидностей триггеров, простейшим видом триггера является **RS-триггер**. Он образован двумя элементами И-НЕ (рис. 57).

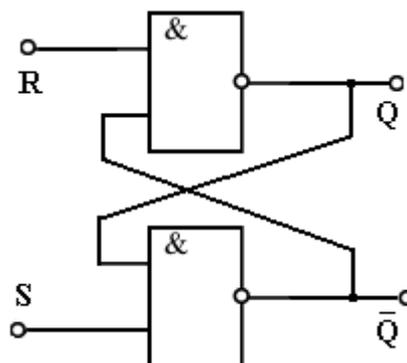


Рис. 57. Схема RS-триггера

RS-триггер имеет два выхода Q и \bar{Q} и два управляющих входа, R (Reset —

сброс) и S (Set — установка). На выходах триггера уровни всегда противоположны: если $Q = 1$, то $\bar{Q} = 0$ и наоборот. Когда на выходе Q низкий уровень, говорят, что триггер находится в исходном состоянии (RESET). Он остается в этом состоянии неопределенно долго, до тех пор, пока на вход S элемента не будет подан высокий уровень. Когда это произойдет, на выходе Q появится высокий уровень, триггер перейдет в единичное состояние (SET). Триггер будет оставаться в этом состоянии пока на вход R не будет подан высокий уровень. На рис. 58 изображено условное обозначение RS-триггера.

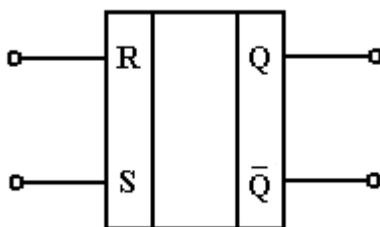


Рис. 58. Условное обозначение RS-триггера

«Недопустимое» или «неразрешенное» состояние имеет место, когда одновременно на оба входа, R и S, подается высокий уровень. В этом случае оба выхода Q и \bar{Q} пытаются перейти в низкое состояние, но они не могут быть одновременно в одинаковом состоянии. Поскольку всегда логические элементы немного отличаются друг от друга, то один из них перейдет в состояние с высоким уровнем раньше. Это заставит другой элемент перейти в состояние с низким уровнем. Однако какой из выходов окажется в состоянии с высоким уровнем предсказать невозможно и, следовательно, состояние выходов триггера не может быть определено. На рис. 59 изображена таблица истинности для RS-триггера.

Входы		Выходы	
S	R	Q	\bar{Q}
0	0	НС	НС
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	?	?

НС = не изменяется

Рис. 59. Таблица истинности RS-триггера

Чтобы избежать запрещенных состояний на входе триггера, был разработан **синхронный RS-триггер**, в котором схема RS-триггера дополнена управляю-

щим блоком (рис. 60).

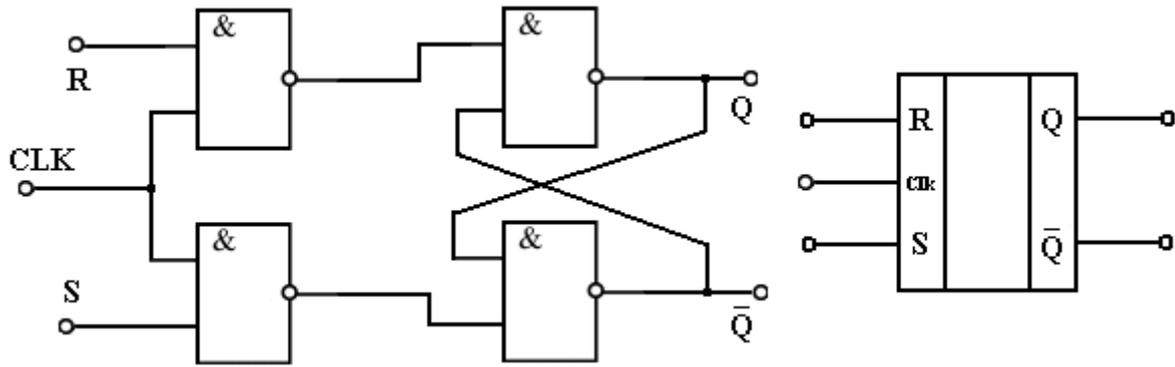


Рис. 60. Схема и условное обозначение синхронного RS-триггера

Триггер с синхронизирующим входом (Clock) управляется логическими состояниями входов R и S только при наличии тактового импульса. Пока уровень на тактовом входе низкий, уровни входов R и S могут изменяться, не влияя на состояние триггера. Входы R и S становятся чувствительными только в течение тактового импульса. Это называется синхронной работой. Триггер работает синхронно с тактовым сигналом. Синхронная работа важна в компьютерах, когда каждый шаг выполняется в определенном порядке.

Еще один вид триггера – **D-триггер**, триггер данных. В нем только один вход записи информации (рис. 61).

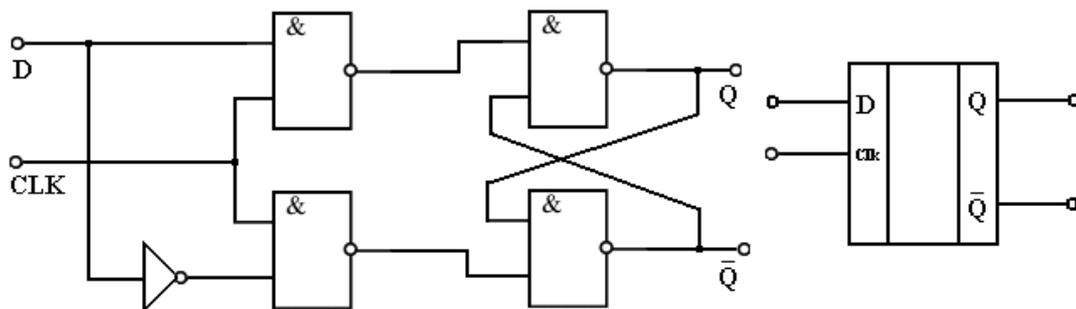


Рис. 61. Схема и условное обозначение D-триггера

Наконец, самым универсальным считается **JK-триггер**, он обладает всеми особенностями триггеров других типов. Схема и обозначение JK-триггера показаны на рис. 62.

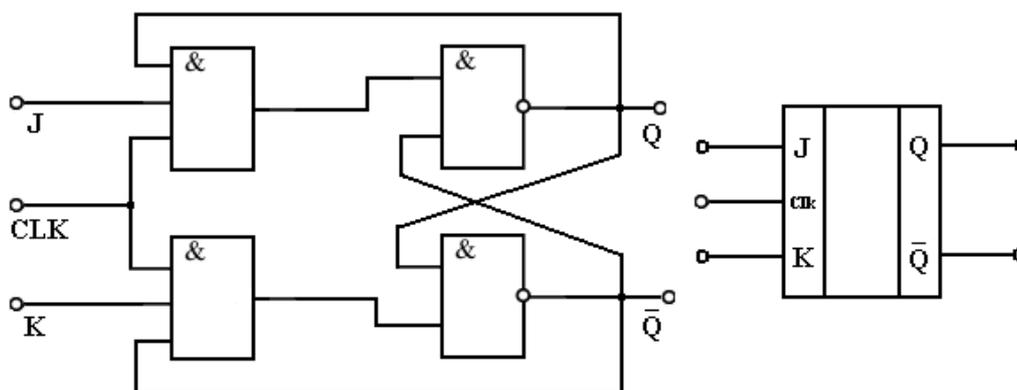


Рис. 62. Схема и условное обозначение JK-триггера

Важная особенность JK-триггера состоит в том, что при подаче на оба входа J и K высокого уровня сигнала, повторяющиеся тактовые импульсы заставляют выход переключаться и изменять состояние. При этом необходимо поступление двух тактовых импульсов, чтобы на выходе триггера сформировался один импульс, т.е. триггер может делить частоту последовательности импульсов на два. Это свойство триггеров развивается в **счетчиках** – логических схемах, способных делить частоту поступающих импульсов, в зависимости от реализации логической схемы, не только на два, но и на восемь, десять или даже программируемых на любое заданное число.

6.3.2. Регистры

Триггер обрабатывает один разряд двоичного числа. Для одновременной работы с несколькими разрядами созданы логические схемы, названные **регистрами**. По существу, регистры – это набор триггеров с единой схемой управления. Различают регистры нескольких видов. Например, **регистр-защелка** хранит записанную информацию, если на управляющем входе низкий уровень напряжения, в случае высокого уровня – информация с входов поступает на выходы. **Регистр сдвига** позволяет преобразовывать параллельный двоичный код в последовательный и наоборот.

6.4. Микросхемы комбинационной логики

6.4.1. Шифратор

Шифратор — это комбинационная логическая схема, выполняющая преобразование одного двоичного числа в другое, как правило, оба числа представляют собой некий условный код. Например, на рис. 63 изображен десятично-двоичный шифратор. Он преобразует сигналы в так называемом унитарном коде (отдельные биты), поступающие на один из входов и символизирующие десятичные цифры (от 0 до 9), в соответствующий четырехразрядный двоичный код на выходе.

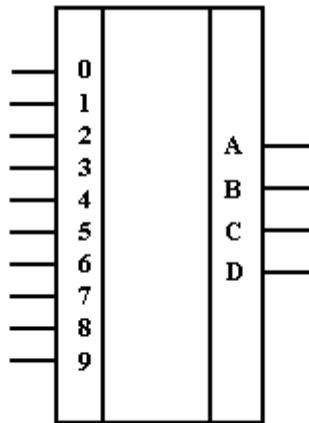


Рис. 63. Условное обозначение шифратора

Например, если на вход 4 будет подан высокий уровень, или 1, то на выходе появится 4-разрядный код 0100. Сигнал должен поступать только на один из входов. **Приоритетные шифраторы** допускают поступление на вход нескольких сигналов одновременно, все входы таких шифраторов имеют приоритеты и обрабатывается только вход со старшим приоритетом.

6.4.2. Дешифратор

Выполняет операцию, обратную выполняемой шифратором. Например, он может преобразовать двоичное число в унитарный код на одном из десяти выходов (рис. 64).

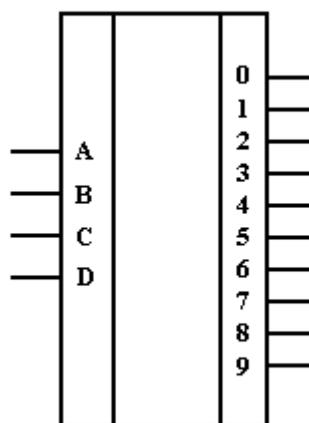


Рис. 64. Двоично-десятичный дешифратор

Специальным типом дешифратора является дешифратор двоичного кода в коды семи-сегментного индикатора (рис. 65).

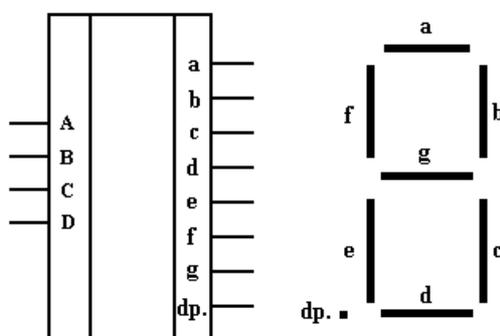


Рис. 65. Дешифратор двоично-десятичного кода для 7-сегментного индикатора

Индикатор состоит из семи светодиодных сегментов, которые загораются в различных комбинациях, отображая каждую из десяти десятичных цифр, от 0 до 9. Например, чтобы зажечь цифру 1 на индикаторе, должны появиться высокие уровни на выходах *b* и *c*, эти уровни появляются при подаче на вход двоичной единицы – числа 0001. Кроме семисегментных светодиодных индикаторов существуют индикаторы накаливания, люминесцентные и жидкокристаллические индикаторы

6.4.3. Мультиплексоры

Мультиплексор — это электронный многопозиционный коммутатор (переключатель). Обычные механические многопозиционные переключатели

широко используются в электронных цепях. Однако, механический переключатель не может обеспечить высокую скорость переключения. Поэтому мультиплексоры, используемые для выполнения высокоскоростного переключения, состоят из электронных компонентов. Типичный мультиплексор имеет несколько входов и один выход. Входы мультиплексора активируются установкой двоичного кода на входе выбора данных, определяющих вход, по которому данные будут приниматься. На рис. 66 изображена схема восьмивходового мультиплексора. Заметим, что мультиплексор имеет три линии управления входами, обозначенные А, В и С. Путем подачи соответствующего двоичного кода на линии управления, может быть выбран любой из восьми входов.

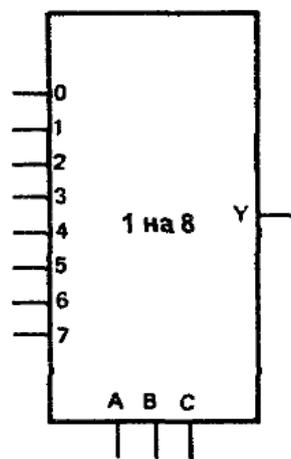


Рис. 66. Восьмивходовый мультиплексор

Кроме селекции потоков данных, мультиплексоры используются для преобразования данных из параллельного кода в последовательный. Двоичное слово, представленное параллельным кодом, подается на вход мультиплексора. Подавая на управляющие входы последовательность разрешающих кодов, можно получить на выходе последовательное представление параллельного двоичного слова, поданного на вход.

Обратную операцию соединения одного входа с одним из нескольких выходов выполняют демультиплексоры.

6.4.4. Сумматор

Сумматор — главный вычислительный элемент цифрового компьютера. Для суммирования одного разряда двоичного числа необходимо выполнить логические операции, дающие в результате таблицу истинности, показанную на рис. 67 и составленную по правилам сложения.

Входы		Выходы	
A	B	Σ	C_0
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

Рис. 67. Таблица истинности для сумматора

Столбец Σ представляет собой результат суммирования, мы видим, что таблица истинности элемента исключающее ИЛИ совпадает с этим столбцом. Столбец C_0 — это перенос в старший разряд, он возникает, если мы складываем две единицы, таблица истинности столбца C_0 совпадает с таблицей элемента И. Таким образом, для реализации операции сложения необходимо соединить параллельно элементы И и исключающее ИЛИ (рис. 68). Выход переноса обеспечивается элементом И, а выход суммы обеспечивается элементом исключающее ИЛИ. Данная схема выполняет суммирование одного разряда двоичного числа и перенос результата суммы в старший разряд, однако, в случае многоразрядных двоичных чисел, необходимо учесть и перенос из младшего разряда. По причине неполноты действий приведенная схема называется **полусумматором**, она используется в операциях суммирования для младшего разряда двоичного числа.

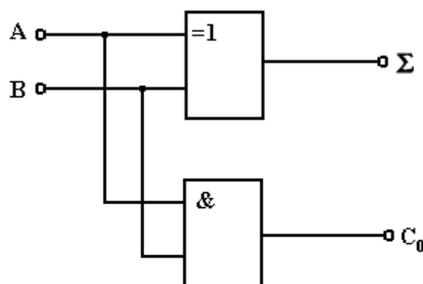


Рис. 68. Схема полусумматора

Сумматор, учитывающий перенос из младшего разряда, называется полным сумматором. Полный сумматор имеет три входа: А, В и перенос C_1 (рис. 69).

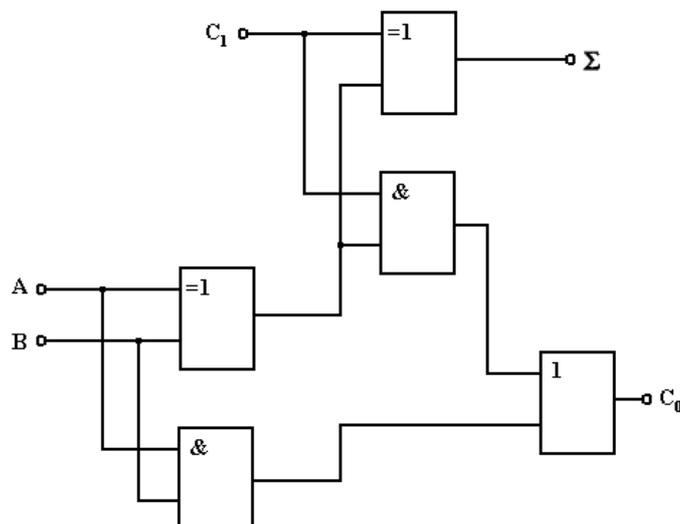


Рис. 69. Схема полного сумматора

Он состоит из двух полусумматоров. Выходы элементов И обоих полусумматоров поданы на входы элемента ИЛИ для получения выхода переноса. На выходе переноса будет 1, если на двух входах либо первого, либо второго элемента И будут высокие уровни. На рис. 70 показаны условные обозначения полусумматора и полного сумматора.

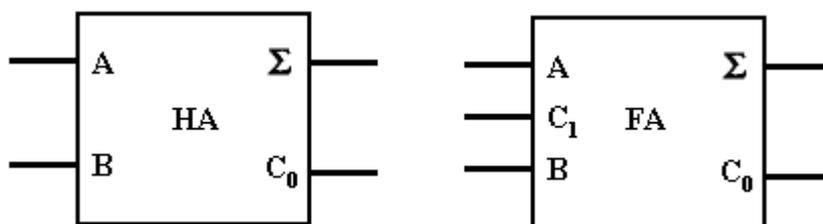


Рис. 70. Условные обозначения полусумматора и сумматора

6.4.5. Компаратор

Компаратор используется для сравнения величин двух двоичных чисел. Схема определяет, равны два числа или нет. Компаратор не только сравнивает два двоичных числа, но также определяет какое из них больше, а какое меньше. На рис. 65 показано условное обозначение компаратора. Основу компаратора

составляет элемента исключающее ИЛИ с инверсией, также известный, как исключающее ИЛИ-НЕ.

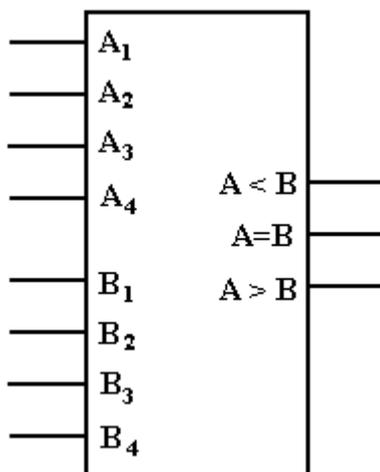


Рис. 71. Условное обозначение компаратора

6.5. Программируемые логические микросхемы

Используя специальные интегральные схемы, содержащие на одном кристалле большое количество логических элементов. С помощью специального инструмента - **программатора** можно создать внутри такой интегральной схемы свою, уникальную логическую схему, решающую конкретную задачу. Такие интегральные схемы имеют общее название **ПЛИС** (программируемые логические интегральные схемы). Существует несколько вариантов таких устройств:

- в устройствах **ПМЛ** (программируемая матричная логика) существует встроенная структура, изменить которую невозможно;
- микросхемы **ПЛМ** (программируемая логическая матрица) имеют большую гибкость, связи между логическими элементами в ней можно создавать произвольно.

В зависимости от конкретной модели, создание (или разрушение существующих) связей в ПЛИС может быть однократным, а может выполняться неоднократно с предварительным стиранием предыдущей логической схемы.

Вопросы для самостоятельной проработки:

1. Что показывает таблица истинности.
2. В чем разница между положительной и отрицательной логикой.
3. На чем основана цифровая электроника
4. Какие функции выполняет компаратор
5. Нарисуйте логическую схему полусумматора, поясните принцип его работы
6. Какие логические элементы наиболее распространены и почему.
7. Нарисуйте логическую схему, условное обозначение и таблицу истинности D-триггера.
8. Почему триггер считается элементом памяти.
9. Какие операции выполняет мультиплексор, нарисуйте его условное обозначение.
10. Какие виды дешифраторов вы знаете.
11. Можно ли регистр заменить набором триггеров
12. На чем основан принцип работы цифровых микросхем-счетчиков.
13. Можно ли нарисовать таблицу истинности для шифратора.
14. Нарисуйте логическую схему, выполняющую функции элемента исключающее ИЛИ с использованием только трех основных логических элементов.

Список рекомендуемой литературы

1. Гейтс Э.Д. Введение в электронику. Серия «Учебники и учебные пособия». Пер. с англ. Ростов-на Дону: «Феникс», 1988 . — 640 с.
2. Войцеховский Я. Радиоэлектронные игрушки: Электроника дома, на работе, в школе. Пер. с польск. — М., Сов. Радио, 1979. — 608 с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Пер. с англ. — М.: Мир, 1993.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Справочное руководство: Пер. с нем. — М.: Мир, 1983. — 512 с.
5. Справочная книга радиолюбителя-конструктора / Под ред. Н.И.Чистякова – М.: Радио и связь, 1990. — 624 с.
6. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы: В 2-х ч. Ч.1 -336 стр., Ч.2 – 360 с.: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988.
7. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. — М.: Высш. шк. 1991. —622 с.
8. Фигьера Б., Кноэрр Р. Введение в электронику. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 208 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=856
9. Барыбин В.Г. Физико-технологические основы электроники. Санкт-Петербург, Лань, 2001. – 270 с.
10. Оптическое приборостроение: Учебное пособие/ И.Г. Половцев, Г.В. Симонова/ Под ред. И.В. Самохвалова. – Томск: Томский государственный университет, 2004. – 397 с.
11. Введение в электронику : Пер. с фр. / Бернар Фигьера, Робер Кноэрр; Пер. В. А. Марченко. - М. : ДМК, 2001. - 202[6] с. : ил. - (В помощь радиолюбителю). - ISBN 5-94074-061-8 (в пер.)

Периодическая литература (за последние 5 лет). Журналы: “Физика и химия обработки материалов”, “Электронная промышленность”, “Компьютер пресс”, реферативные журналы: ”Электроника”, “Физика”, “Химия”.

Учебное пособие

Агеев Евгений Юрьевич
Введение в электронику

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40