

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В. Ф. УТКИНА

Р. Н. ДЯТЛОВ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Учебное пособие

Рекомендовано Научно-методическим советом ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений всех форм обучения по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» (уровень – бакалавриат) и специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» (уровень – специалитет)

Рязань 2023

УДК 621.3

Полупроводниковые устройства: учеб. пособие / Р. Н. Дятлов; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2023. 80 с.

Приведена информация о полупроводниковых приборах, в том числе о явлениях в *p-n*-переходах; подробно описаны различные типы полупроводниковых устройств и особенности их использования в электронной аппаратуре. Рассмотрены диоды и транзисторы; способы их включения и основные характеристики. Приводится классификация, условные обозначения, области применения приборов.

Предназначено для студентов направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов».

Табл. 4. Ил. 74. Библиогр.: 5 назв.

Диод, электроника, полупроводник, стабилитрон, транзистор

Печатается по решению научно-методического совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, почётный работник высшего профессионального образования РФ, профессор кафедры промышленной электроники РГРТУ им. В. Ф. Уткина Евгений Васильевич Мамонтов;

кандидат физико-математических наук, доцент, почётный работник высшего профессионального образования РФ, заведующая кафедрой "Информатика и информационные технологии" Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета Татьяна Александровна Асаева

Дятлов Роман Николаевич

Полупроводниковые устройства

Редактор И. В. Черникова

Корректор С. В. Макушина

Подписано в печать 25.05.23. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,0.

Тираж 30 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

© Рязанский государственный
радиотехнический университет
им. В. Ф. Уткина, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Аппаратура, построенная с использованием электронных приборов и называемая электронной, находит широкое применение во многих отраслях науки, техники и промышленной автоматизации. Электронным прибором называют устройство, действие которого связано с использованием электрических явлений в полупроводнике, в вакууме или газе. Рабочее пространство, в котором протекают характерные для электронного прибора физические процессы, изолировано от окружающей среды непроницаемой оболочкой. Поскольку рабочее пространство представляет собой либо кристалл полупроводника (твёрдое тело), либо вакуум, либо разреженный газ, соответственно различают полупроводниковые и электровакуумные приборы. Особо выделяют группу газоразрядных электровакуумных приборов.

Большинство электронных приборов, например транзисторы, полупроводниковые диоды, электронные лампы, предназначаются для преобразования одних электрических величин в другие электрические величины и называются электропреобразовательными. Существуют также электронные приборы, позволяющие преобразовывать энергию одного вида в другой, например энергию светового излучения в электрическую (фотоэлектрические приборы) или энергию электрических сигналов в видимое изображение (жидкокристаллический дисплей, электронно-лучевые трубки) и др.

Оборудование, построенное с использованием электронных приборов и называемое электронным, находит применение в аппаратуре связи, элементах автоматики, устройствах программного управления станками, электронно-вычислительными машинами и т. д.

1. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Фундамент для возникновения и развития электроники был заложен работами физиков в XVIII и XIX веках.

Первые в мире исследования электронных разрядов в воздухе осуществлены в XVII веке в России академиком М. В. Ломоносовым и профессором физики Г. В. Рихманом.

С целью упрощения устройства и повышения чувствительности радиоприёмника, изобретённого в 1895 г. русским учёным А. С. Поповым, в разных странах велись разработка и исследование различных типов детекторов – обнаружителей высокочастотных (вначале радиотелеграфных) колебаний, а также способов их генерирования.

В 1904 г. английским учёным Д. Флемингом была создана первая двухэлектродная электронная лампа (вакуумный диод), предназначенная для детектирования электрических колебаний, а в 1906-1907 гг. американским инженером Ли де Форестом была сконструирована трёхэлектродная лампа (триод), пригодная для усиления и генерирования радиосигналов.

В 1913 г. были разработаны схемы ламповых регенеративного приёмника и генератора незатухающих электрических колебаний. Электронные генераторы позволили заменить искровые и дуговые радиостанции ламповыми и решить проблему радиотелефонии.

Все изобретения и исследования в области электроники до Октябрьской революции представляли собой лишь героические усилия отдельных ученых. До 1917 г. в России не было создано ни одного научного учреждения, занимающегося вопросами электроники.

Резкий перелом наступил после 1917 г. В 1918 г. по указанию В. И. Ленина была создана Нижегородская радиолaborатория [1], в которой под руководством профессора М. А. Бонч-Бруевича разрабатывались усилительные и генераторные радиолампы.

В 30-е годы XX века появились многосеточные и комбинированные лампы, а также лампы для УКВ и СВЧ диапазонов.

Бурное развитие полупроводниковой электроники в нашей стране началось с 1948 г. после создания американским физиком Джоном Бардиным полупроводникового триода.

В 1949-1950 гг. был создан плоскостной бездрейфовый транзистор, в 1952 г. изготовлен полевой транзистор, в 1953 г. – дрейфовый, который полностью вытеснил точечные транзисторы.

Современные сложные электронные системы насчитывают сотни тысяч активных (диоды и транзисторы) и пассивных (резисторы и конденсаторы) радиоэлементов. Задачи уменьшения габаритов, массы, потребляемой мощности и стоимости этих систем, улучшение рабочих характеристик и достижение высокой надёжности в настоящее время успешно решает микроэлектроника – направление электроники, связанное с проектированием и изготовлением электронной аппаратуры в микроминиатюрном исполнении с полным или частичным исключением дискретных радиоэлементов.

Наиболее эффективной областью микроэлектроники является интегральная микроэлектроника, занимающаяся созданием интегральных микросхем.

В радиоэлектронных устройствах находят широкое применение полупроводниковые и гибридные интегральные микросхемы.

В России необходимо уделять большое внимание созданию автоматизированных промышленных систем и оснащению её новыми техническими средствами.

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

2.1. Электрофизические свойства полупроводников

Самые важные и, возможно, самые интересные электронные устройства, которые используются в настоящее время, созданы из полупроводниковых материалов. Диоды, транзисторы, тиристоры, термисторы, фотогальванические элементы, фототранзисторы, фоторезисторы, лазеры и интегральные схемы (рис. 1) – все эти электронные устройства изготовлены из полупроводниковых материалов, или полупроводников.

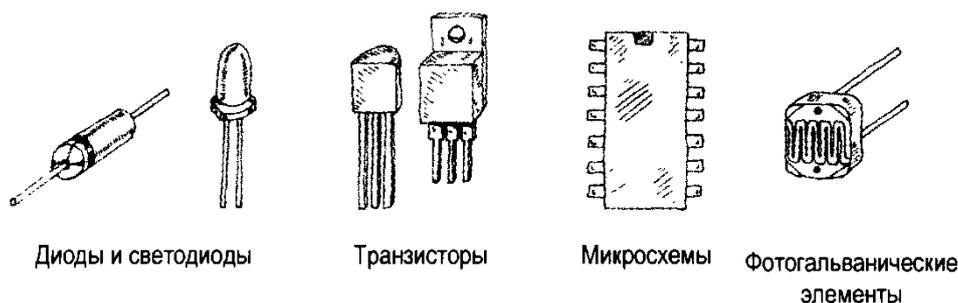


Рис. 1. Примеры полупроводниковых устройств

Материалы можно классифицировать согласно их способности проводить электричество. Вещества, которые свободно проводят электрический ток, такие как серебро и медь, называются проводниками. А материалы, которые не проводят электрический ток, такие как резина, стекло или тефлон, называются изоляторами. Правда, есть ещё и третья категория материалов, чьи свойства проводимости находятся между проводниками и изоляторами. Материалы этой категории называются полупроводниками. К полупроводникам относятся материалы с проводимостью в диапазоне от 10^{-7} до 10^3 (рис. 2). Одни полупроводники являются чистыми элементными материалами (например, кремний или германий), другие – сплавами, ещё другие – жидкостями.

Кремний. Самым важным полупроводником, используемым в производстве электронных устройств, является кремний. Другие полупроводниковые материалы, такие как германий и селен, используются намного реже. В чистом виде уникальная атомная структура кремния (рис. 3) обладает очень важными свойствами, полезными для использования в создании электронных устройств.

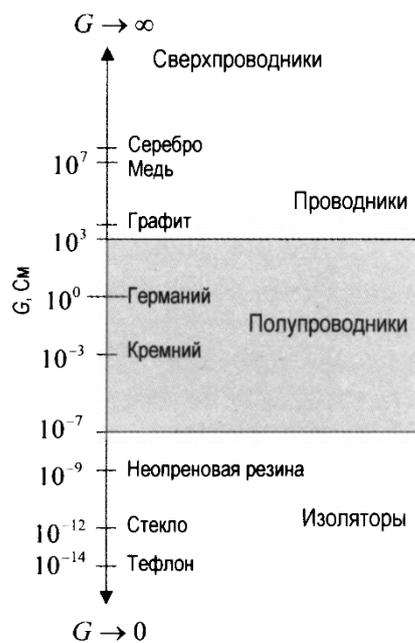
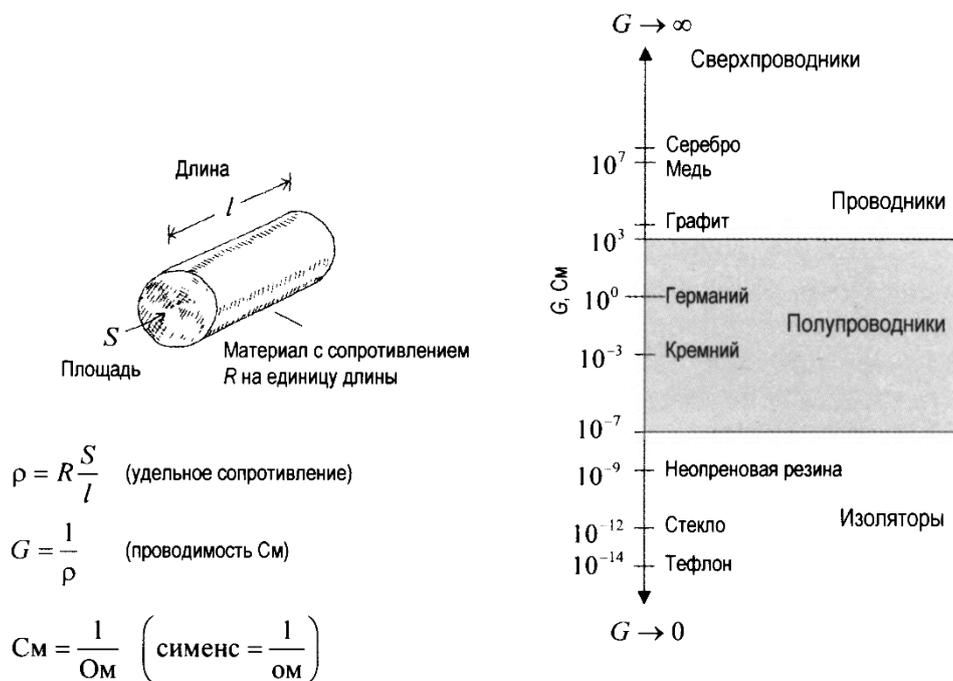


Рис. 2. Проводимость и категории материалов по проводимости

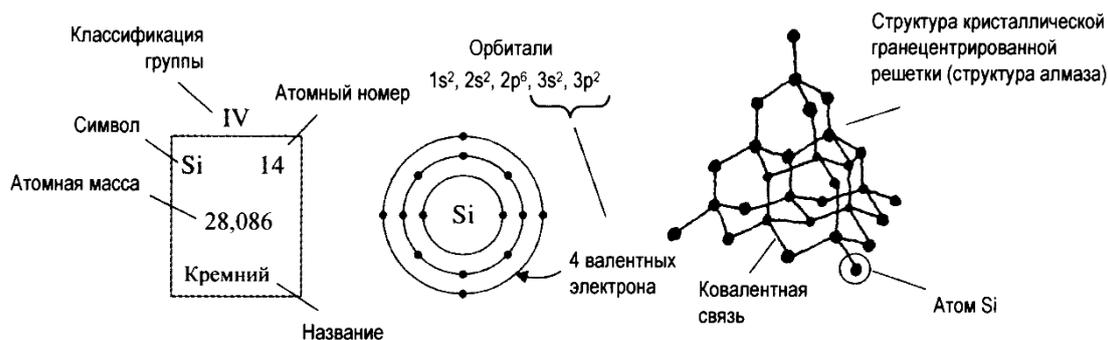


Рис. 3. Свойства и строение кремния

Кремний является вторым наиболее распространённым элементом в земной коре, составляя около 27 % по массе. По расчётам кубический километр морской воды содержит около 4 тыс. т кремния. Но в природе кремний очень редко встречается в чистом виде; поэтому, прежде чем его использовать для создания электронных устройств, его сначала необходимо очистить от примесей. Очищенный от примесей кремний расплавляют и формируют в массивный монокристалл, который нарезают на пластины, а затем используют для производства полупроводниковых устройств, в основном интегральных схем (рис. 4).

Однако полученные пластины ещё не годятся для производства полупроводниковых устройств, поскольку чистый кремний, из которого они изготовлены, не обладает свойствами полупроводника. Более того, чистый кремний является изолятором и не может изменять состояние проводимости при приложении внешней силы, как это делают полупроводники. Поэтому, чтобы придать кремниевым пластинам необходимые полупроводниковые свойства, при выращивании монокристалла в него добавляются специальные примеси. Этот процесс называется легированием.

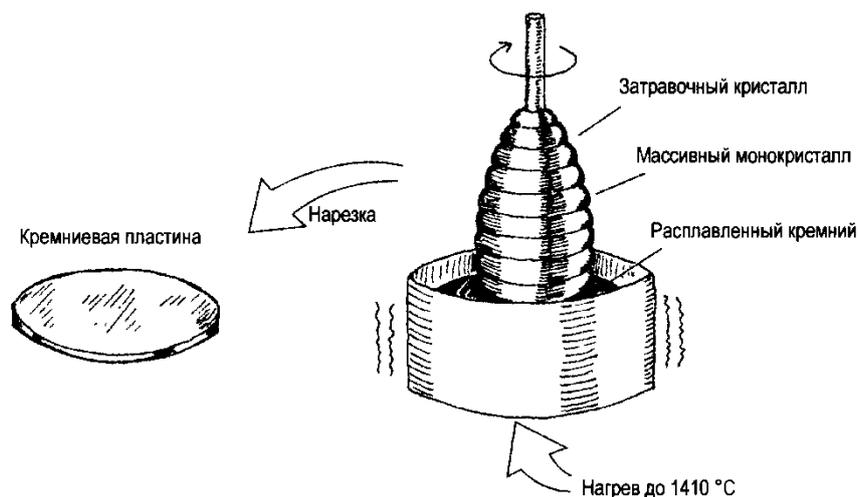


Рис. 4. Создание кремниевой пластины

Легирование – это добавление в кремний, из которого выращивается монокристалл, специальных примесей, изменяющих свойства проводимости кремния [2]. В качестве легирующих примесей используются такие элементы, как сурьма, мышьяк, алюминий, галлий, бор или фосфор. Добавление примесей в кремний позволяет изменить такие его свойства, как частотные характеристики, в зависимости от прикладываемого напряжения, и теплостойкость. В области производства полупроводниковых устройств самыми важными легирующими примесями кремния являются бор и фосфор, которые существенно изменяют его электрическую проводимость. Чистый кремний не содержит свободных электронов, поскольку все его четыре валентных электрона удерживаются ковалентными связями с прилегающими атомами (рис. 5). Без свободных электронов прикладываемое электричество не будет вызывать в кремнии никакого потока электронов.



Рис. 5. Структура кремния

Если же в кремний добавить примесь фосфора, его свойства существенно изменятся. Фосфор имеет пять валентных электронов, а не четыре, как кремний. Четыре из них войдут в ковалентные связи с валентными электронами прилегающих атомов кремния (рис. 6). Но пятому электрону не останется места, и он будет свободно перемещаться между атомами. Если теперь к противоположным концам легированного таким образом отрезка кремния приложить разность потенциалов, свободные электроны начнут мигрировать через кремний к концу с

положительным потенциалом. Интенсивность потока электронов прямо пропорциональна количеству добавленного в кремний фосфора. Проводимость легированного фосфором кремния обеспечивается носителями отрицательного заряда (электронами), поэтому она называется проводимостью *n*-типа, а данный вид кремния – кремнием *n*-типа (от англ. *negative*).

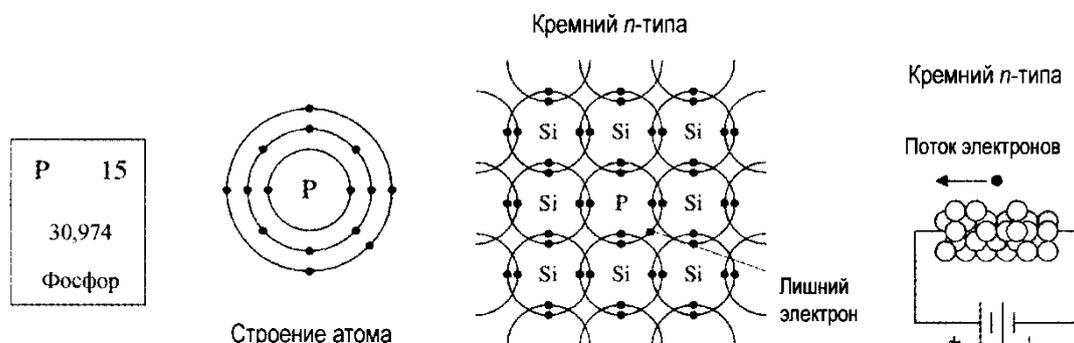


Рис. 6. Добавленный в кремний атом фосфора предоставляет дополнительный свободный электрон, который способствует проводимости *n*-типа

Если вместо фосфора в кремний добавить примесь бора, то легированный таким образом кремний также будет обладать свойствами проводимости, но эта проводимость будет другого типа, чем при легировании фосфором. Бор имеет только три валентных электрона, а не пять, как фосфор, или четыре, как кремний. При смешивании с кремнием все три валентных электрона бора вступают в ковалентную связь с прилегающими атомами (рис. 7).

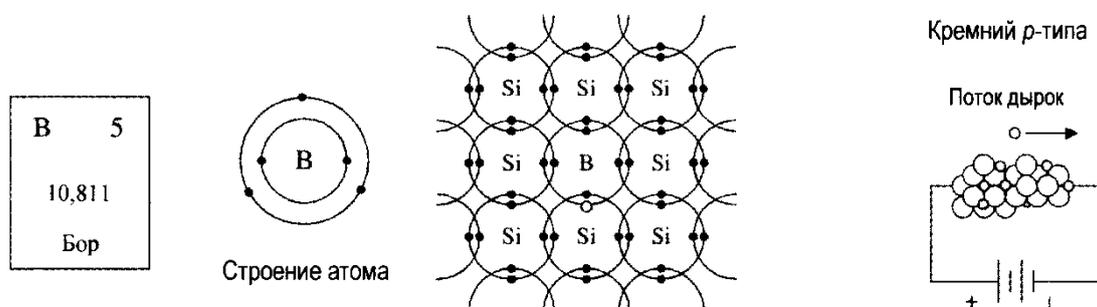


Рис. 7. При легировании кремния бором в структуре кремния создаются дырки, которые ведут себя как носители положительного заряда и создают проводимость *p*-типа

Но при этом в ковалентных связях между атомами бора и атомами кремния остаётся одно свободное место, которое называется дыркой. Если теперь к противоположным концам легированного таким образом кусочка кремния приложить разность потенциалов, дырки начнут мигрировать через кремний к концу с отрицательным потенциалом, а соседствующие электроны будут занимать их места. Дырки считаются носителями положительного заряда, хотя сами они не содержат никакого физического заряда. По сути, всего лишь создаётся видимость наличия положительного заряда у дырок вследствие неравновесия зарядов между протонами ядра кремния с дыркой и электронами в его внешней орбитали. Общий заряд атома электрона с дыркой будет казаться более положительным на

величину заряда, эквивалентного одному протону (или «отрицательному электрону»). Проводимость легированного бором кремния обеспечивается носителями положительного заряда (дырками), поэтому она называется проводимостью p -типа, а данный вид кремния – кремнием p -типа (от англ. *positive*).

Таким образом, кремний как n -, так и p -типа может проводить электричество: первый с помощью лишнего несвязанного электрона (проводимость n -типа), а второй с помощью дырок (проводимость p -типа).

2.2. Применение кремния

Практическая важность n - и p -типов кремния заключается в способе пропускания тока этими проводниками – один делает это с помощью дырок, а другой с помощью электронов. Особенности проведения тока кремнием n -типа (перемещение электронов) и p -типа (перемещение дырок) используются при изготовлении таких электронных устройств, как диоды, транзисторы, солнечные панели и микросхемы (рис. 8). Для этого фрагменты кремния разной формы – пластины, стержни, кубики и т. п. – обоих типов проводимости объединяют различными способами, чтобы при подаче на эти структуры напряжения или тока получить определённые полезные свойства.

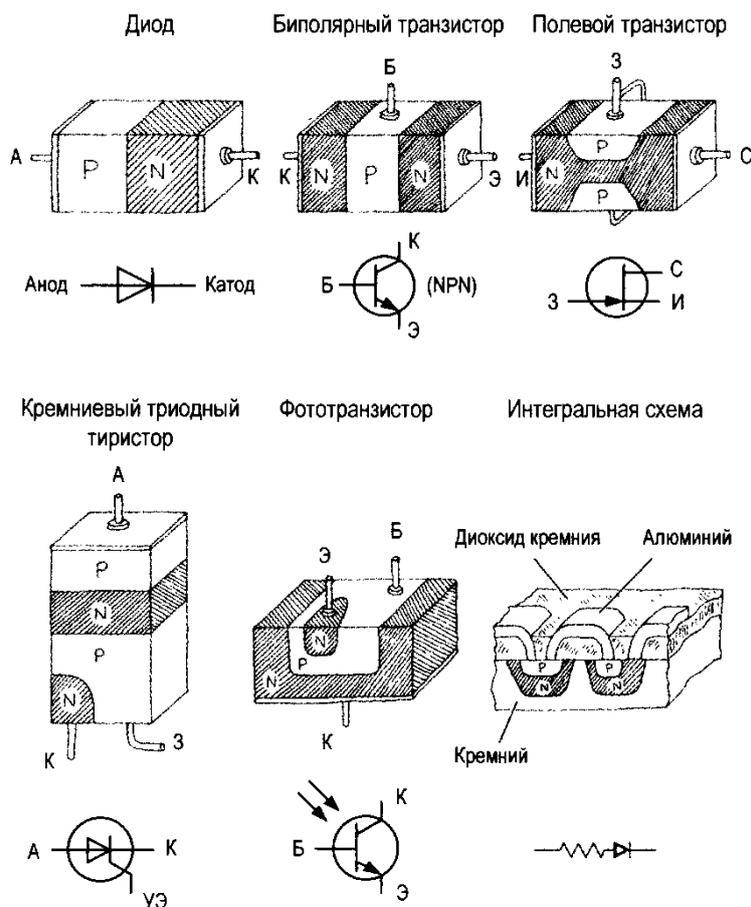


Рис. 8. Полупроводниковые устройства, полученные посредством объединения разными способами фрагментов кремния двух типов проводимости.

А – анод; К – катод; Б – база; Э – эмиттер, З – затвор; С – сток; И – исток, УЭ – управляющий электрод

Эти свойства становятся возможными благодаря взаимодействию дырок и электронов, перемещающихся между полупроводниками *n*- и *p*-типов. Из обладающих этими свойствами кремниевых структур создаются специальные вентили, пропускающие ток только в одном направлении или закрывающие и открывающие каналы для протекания тока под управлением внешнего напряжения и/или тока. Так, из полупроводниковых структур из кремния с разными типами проводимости создаются устройства, излучающие свет, или фотоны, под воздействием внешнего напряжения или тока, или наоборот, создающие электрический ток при воздействии на них света. Кроме вышеописанных многие другие разнообразные воздействия на свойства электрических сигналов могут выполняться посредством различных комбинаций кремния двух типов проводимости.

3. ДИОДЫ

Диод – это полупроводниковое устройство с двумя выводами, которое функционирует как однонаправленный вентиль для электрического тока (рис. 9). Когда на диод подаётся напряжение, положительный потенциал на анод, а отрицательный на катод (такое приложение напряжения называется прямым смещением), диод может пропускать ток. Но при обратной полярности прикладываемого напряжения – положительный потенциал на катод, а отрицательный на анод (такое приложение напряжения называется обратным смещением) – диод пропускать ток не будет.



Рис. 9. Условное графическое обозначение диода

Диоды наиболее широко используются в схемах для преобразования переменных напряжения и тока в постоянные (например, в источниках питания постоянного тока) [3]. Они также применяются в схемах умножения, смещения, ограничения и регулирования напряжения.

3.1. Принцип работы диодов с *p-n*-переходом

Диод с *p-n*-переходом (выпрямительный диод) состоит из слоёв кремния *n*- и *p*-типов. На практике такие диоды изготавливают, сначала выращивая кремниевый кристалл *n*-типа, а потом меняя его на кристалл *p*-типа. Затем полученная таким образом комбинация кристаллов кремния двух типов заключается в стеклянную или пластмассовую оболочку. Сторона кристалла *n*-типа служит катодом, а *p*-типа – анодом.

Чтобы полученное таким образом устройство функционировало как однонаправленный вентиль, носители заряда в областях кремния каждого типа должны взаимодействовать таким образом, чтобы при подаче на выводы устройства напряжения соответствующей полярности ток протекал в одном направлении. Кремний обоих типов проводит электрический ток – кремний *n*-типа делает

это посредством электронов, а p -типа – посредством дырок. Но определяющим аспектом работы диода (т. е. его свойства проводить ток только в одном направлении) является, как именно эти два типа носителей заряда взаимодействуют друг с другом и как они реагируют на прилагаемое внешнее напряжение.

Диод в режиме прямого смещения. Когда на диод подаётся напряжение прямого смещения (рис. 10, а), создаваемое им электрическое поле принуждает электроны со стороны кремния n -типа и дырки со стороны p -типа двигаться по направлению к границе соединения этих двух типов кремния (которая называется p - n -переходом). В этой области электроны заполняют дырки, в результате чего через диод протекает ток. Работающий в таком режиме диод называется прямосмещённым.

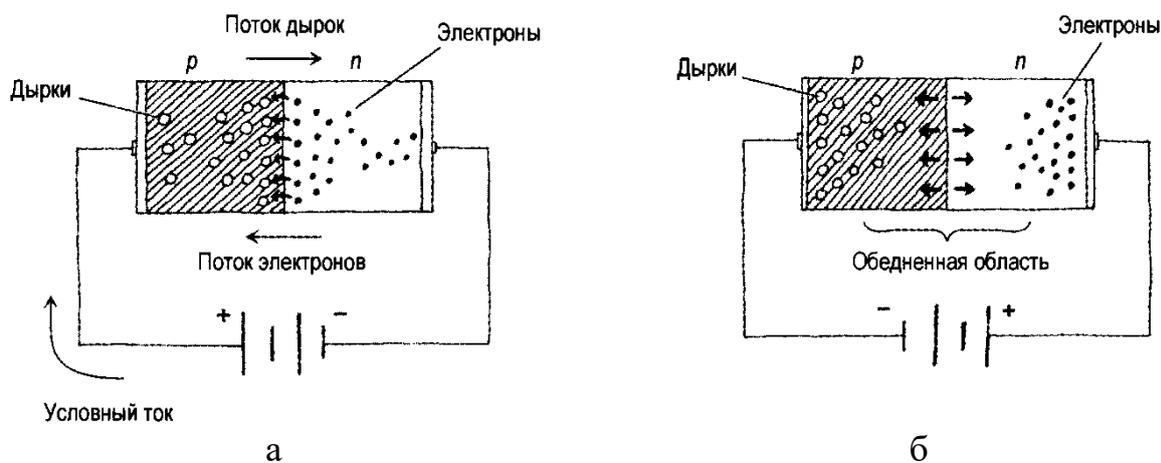


Рис. 10. Диод: а) в режиме прямого смещения; б) в режиме обратного смещения

Диод в режиме обратного смещения. Когда на диод подаётся напряжение обратного смещения (рис. 10, б), оно принуждает дырки со стороны кремния n -типа перемещаться к отрицательному потенциалу, а электроны со стороны p -типа – к положительному. В результате этого вокруг p - n -перехода создаётся свободная от носителей заряда зона, называемая обеднённой областью. Данная обеднённая область обладает изоляционным свойством, которое предотвращает протекание тока через диод. Работающий в таком режиме диод называется обратносмещённым.

Свойство однонаправленности диодов не является постоянным, т. е. для его активации при работе диода в режиме прямого смещения напряжение должно быть определённого минимального уровня. Обычно для кремниевых диодов это 0,6 В или больше; в противном случае диод не будет проводить ток. Это требование минимального напряжения прямого смещения может казаться недостатком, но в действительности оно очень полезно, чтобы диод можно было использовать как чувствительный к напряжению выключатель. В отличие от кремниевых диодов, для германиевых диодов минимальный уровень напряжения прямого смещения, при котором диод может проводить ток, составляет всего лишь 0,2 В или больше. На рис. 11 показана зависимость тока от прилагаемого напряжения для кремниевых и германиевых диодов.

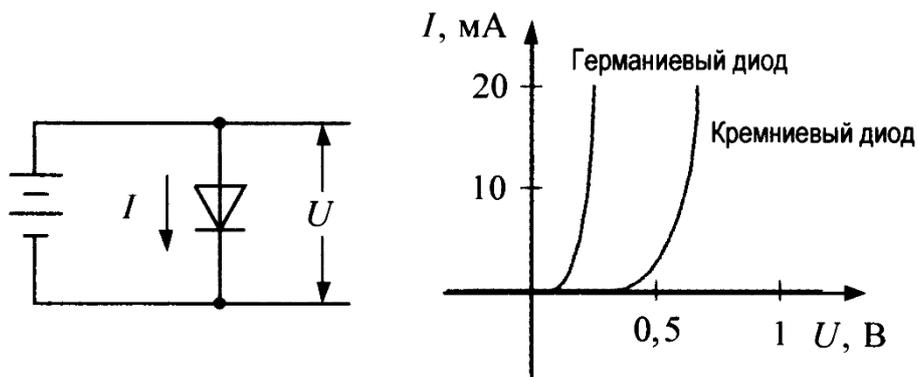


Рис. 11. Зависимость тока от напряжения для диодов

Кроме разных минимальных напряжений прямого смещения, другая фундаментальная разница между кремниевыми и германиевыми диодами состоит в их способностях рассеивать тепло. Кремниевые диоды с этой задачей справляются лучше, чем германиевые. При нагреве германиевого диода до температуры свыше $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ воздействие тепловых колебаний на физические процессы в кристаллической решётке препятствует нормальной работе диода. Иными словами, при температуре выше $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ германиевый диод теряет свои свойства диода.

Вольт-амперная характеристика диода. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) – зависимость тока, протекающего через двухполюсник, от напряжения на этом двухполюснике. Описывает поведение двухполюсника на постоянном токе. Также ВАХ называют функцию, описывающую эту зависимость, и график этой функции.

Поведение диода (или выпрямителя) относительно протекания электрического тока походит на работу однонаправленного вентиля и сравнимо с поведением обратного клапана для воды.

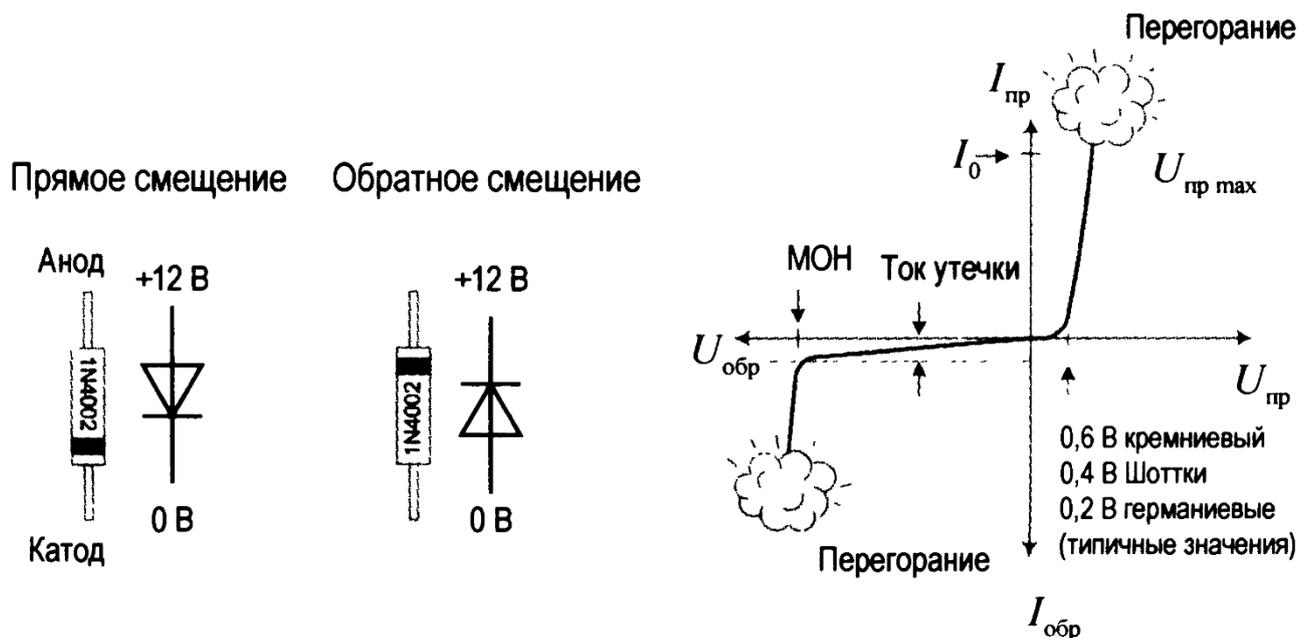


Рис. 12. Кривая зависимости тока диода от напряжения: МОН – максимальное обратное напряжение; $I_{\text{пр}}$, $U_{\text{пр}}$ – ток и напряжение прямого смещения; $I_{\text{обр}}$, $U_{\text{обр}}$ – ток и напряжение обратного смещения

На рис. 12 ток в диоде протекает от анода (+) к катоду (-) при условии, что напряжение прямого смещения $U_{пр}$ превышает так называемое пороговое напряжение перехода. Как правило, пороговое напряжение кремниевых диодов с $p-n$ -переходом составляет около 0,6 В, германиевых диодов – около 0,2 В, а диодов Шоттки – около 0,4 В. Но это довольно условное правило, поскольку пороговое напряжение настоящих компонентов может отличаться от указанных значений на несколько десятых вольта в ту или иную сторону. Например, пороговое напряжение кремниевых диодов с $p-n$ -переходом может быть каким угодно в диапазоне от 0,6 до 1,7 В, германиевых диодов – в диапазоне от 0,2 до 0,4 В, а диодов Шоттки – в диапазоне от 0,15 до 0,9 В.

Следует обратить внимание, что, если на диод действительно подать напряжение прямого смещения величиной 12 В, как показано на рис. 12, через диод будет протекать очень сильный ток, вследствие чего диод, скорее всего, будет выведен из строя или, простым языком, сгорит. Также необходимо обратить внимание на то, что значения осей на рис. 12 показаны относительно, а не по масштабу.

Что касается предельных значений, необходимо избегать напряжений прямого смещения, при которых протекающий по диоду ток прямого смещения $I_{пр}$ будет превышать его максимальный рабочий ток $I_{0\max}$. Превышение этого значения вызовет перегорание $p-n$ -перехода диода. Следует избегать обратных напряжений, превышающих максимальное обратное напряжение (МОН) диода, что также может вывести диод из строя (рис. 12).

3.2. Типы диодов

Существует множество типов диодов, каждый из которых специально разработан для определённого применения. На рис. 13 показано несколько примеров распространённых типов диодов и выпрямительных диодных мостов.

Диоды для силовых приложений (переключение, источники питания и т. п.), которые потребляют большой ток или выпрямляют высокие напряжения, обычно называются выпрямительными диодами. А диоды, которые называются импульсными, коммутирующими, быстро восстанавливающимися или высокоскоростными, имеют низкую внутреннюю ёмкость (они накапливают меньший заряд, но обычно имеют более слабый переход, неспособный работать с большими токами). При высоких частотах прилагаемого сигнала эти диоды имеют пониженную постоянную времени переключения, что означает меньшие задержки и меньшие потери сигнала.

Особенно низкую ёмкость перехода и высокую скорость переключения (≈ 10 нс) по сравнению с кремниевыми диодами с $p-n$ -переходом имеют диоды Шоттки, благодаря их специальному переходу «металл-полупроводник». У них также более низкое пороговое напряжение перехода, которое может быть всего лишь 0,15 В, но обычно немного более высокое (в среднем 0,4 В). Эти два свойства позволяют диодам Шоттки обнаруживать низковольтные сигналы низкой частоты, которые не обнаруживаются обычными кремниевыми диодами с $p-n$ -переходом. Диод Шоттки, который имеет пороговое напряжение перехода 0,3 В,

может пропускать сигналы, начиная с 0,3 В, в то время как кремниевый диод с *p-n*-переходом и пороговым напряжением 0,7 В может пропускать сигналы, только начиная с 0,7 В. По этой причине диоды Шоттки широко используются в выпрямителях слабых сигналов в радиочастотных схемах, для коммутации телекоммуникационных сигналов, в преобразователях невысоких напряжений постоянного тока, в источниках питания низкого напряжения, в схемах защиты и схемах фиксирования напряжения. Их способность проводить токи высокой плотности при низком падении напряжения также делает их полезными для использования в источниках питания, поскольку они меньше нагреваются, что позволяет использовать для них радиаторы меньшего размера.

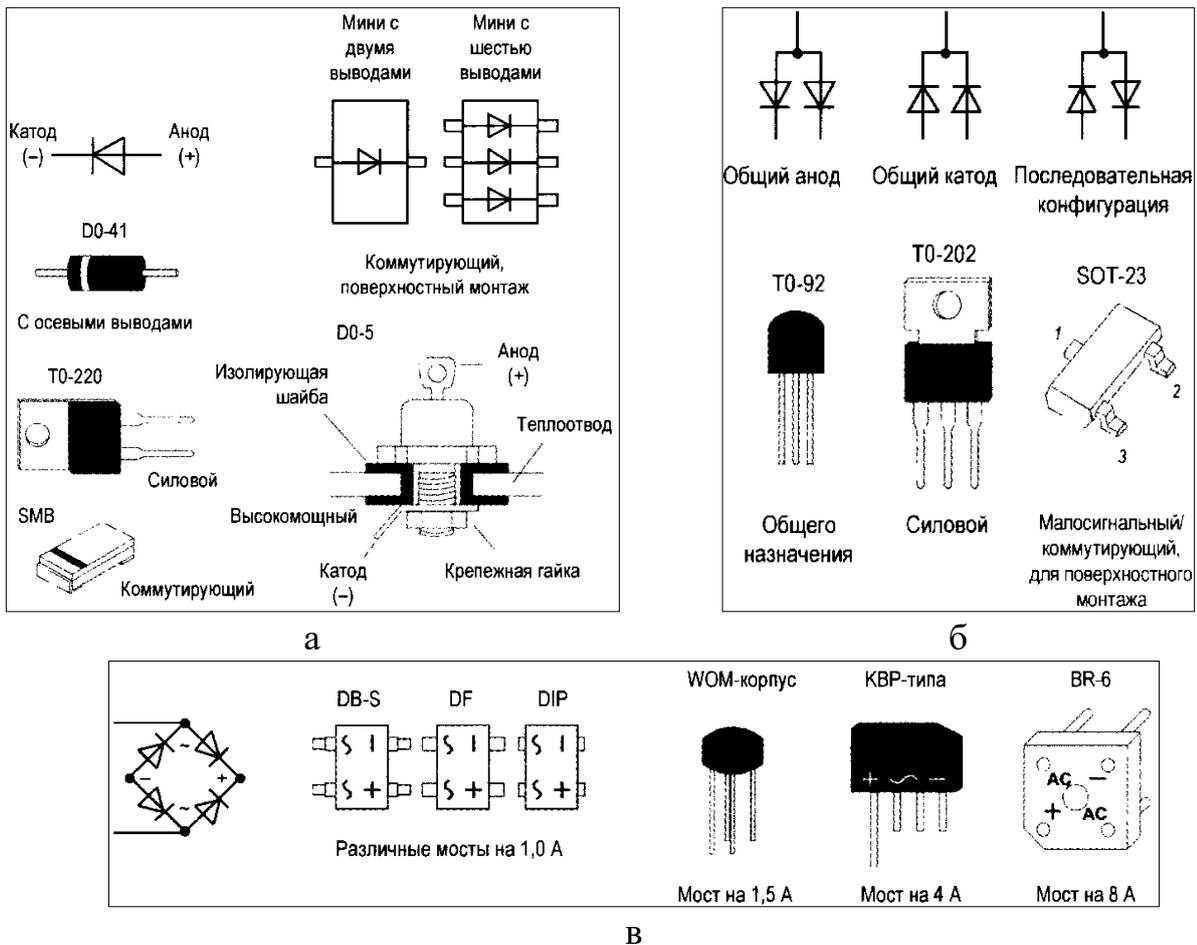


Рис. 13. Примеры распространённых диодов и выпрямительных диодных мостов: а) диоды разных типов; б) двойные диоды; в) мостовые выпрямители

Вследствие низкого порогового напряжения, составляющего приблизительно 0,2 В, германиевые диоды в основном используются для задач обнаружения радиочастотных сигналов и низкоуровневой логики. Но эти диоды не годятся для задач выпрямления больших токов по причине их слабого перехода и большего тока утечки при повышенных температурах. Во многих приложениях германиевые диоды можно заменять диодами Шоттки.

3.3. Практические рекомендации

При выборе диода для определённой задачи следует руководствоваться следующими его характеристиками (табл. 1):

- максимальное обратное напряжение (МОН);
- допустимая нагрузка по прямому току – $I_{\text{пр max}}$ ($I_{\text{O max}}$);
- время реакции – t_p (t_R) (время, требуемое диодом для включения и выключения);
- максимальный обратный ток утечки – $I_{\text{обр max}}$ ($I_R \text{ max}$);
- максимальное прямое напряжение – $U_{\text{пр max}}$ ($V_F \text{ max}$);
- ударный прямой ток выпрямительного диода – $I_{\text{пр. уд}}$ (I_{FSM}).

Таблица 1 – Характеристики распространённых диодов

Диод	Тип	МОН, В	$I_{\text{пр max}}$	$I_{\text{обр max}}$	$I_{\text{пр. уд}}$	$U_{\text{пр max}}$, В
1N34A	Сигнальный (<i>Ge</i>)	60	8,5 мА	15 мкА	–	1,0
1N914	Быстрый коммутационный	90	75 мА	25 нА	–	0,8
1N4148	Сигнальный	75	10 мА	25 нА	450 мА	1,0
1N4001	Выпрямитель	50	1 А	0,03 мА	30 А	1,1
1N5817	Шоттки	20	1 А	1 мА	25 А	0,75

Для каждой из этих характеристик можно задать необходимое значение в процессе изготовления диода, в зависимости от его назначения. Для приложений выпрямления напряжения (например, источники питания, защита от бросков при переходных процессах) самыми важными являются максимальное обратное напряжение (МОН) и максимальная нагрузка по прямому току ($I_{\text{пр max}}$). Максимальное обратное напряжение, прилагаемое к диоду, не должно превышать указанное значение МОН, а прямой ток через диод не должен превышать указанный ток $I_{\text{пр max}}$. Для приложений коммутации и обработки малых сигналов важность представляют время реакции (t_p) и максимальное прямое напряжение ($U_{\text{пр max}}$).

Диоды доступны в большом количестве разных корпусов. Корпуса одних напоминают корпуса обычных резисторов с двумя осевыми выводами, а другие имеют мощный корпус (рис. 14) для работы с большими токами и оснащены теплоотводами (например, диоды *TO-220* или *DO-5*). Также доступны версии диодов в корпусах для поверхностного монтажа и сборки диодов в корпусах наподобие корпусов микросхем, которые применяются в приложениях коммутирования. Существуют двойные диоды и выпрямительные диодные мосты, которые доступны для различных уровней мощности и в корпусах разных размеров и форм.



Рис. 14. Вид корпусов диодов: *DO-5* (слева) и *TO-220* (справа)

3.4. Применение выпрямительных диодов

Гаситель напряжения. Протекание тока через кремниевый диод с *p-n*-переходом вызывает на нём падение напряжения около 0,6 В. Падение напряжения на германиевых диодах составляет около 0,2 В, а на диодах Шоттки – около 0,4 В. Эти значения обычно немного варьируются для каждого отдельного диода. Соединив последовательно несколько диодов, можно получить падение напряжения, равное сумме падений напряжений на каждом отдельном диоде в последовательности. Это иллюстрируется на рис. 15. Гасители напряжения часто применяются в случаях, когда необходимо получить небольшую фиксированную разность напряжений между двумя каскадами схемы. В отличие от резисторов, роль которых как гасителей напряжения более известна, диодные гасители обычно не вызывают таких больших тепловых потерь, а также обеспечивают более стабильное напряжение, которое в меньшей степени подвержено воздействию колебаний тока.

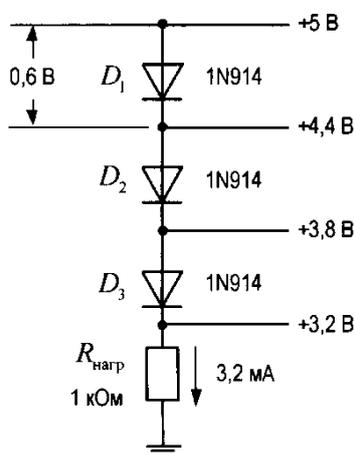


Рис. 15. Использование диодов для понижения напряжения

Стабилизатор напряжения. Данное применение выпрямительного диода основано на предыдущей схеме. В нём несколько последовательных диодов (в данном случае три) создают стабильное низковольтное напряжение, равное сумме пороговых напряжений каждого диода: 0,6 В + 0,6 В + 0,6 В = 1,8 В (рис. 16). Подключённый последовательно к диодам резистор задаёт требуемый выходной ток *I*; его значение должно быть меньшим, чем результат следующей формулы, но не таким низким, чтобы превышалась номинальная мощность самого резистора или диодов:

$$R_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{I}.$$

Номинальная мощность диодов и резистора должна быть достаточной, чтобы выдержать протекающий по ним ток. Требуемая мощность рассчитывается по формуле $P = IU$. Для критических источников питания с более высоким напряжением обычно используется стабилитрон или специальная микросхема-стабилизатор.

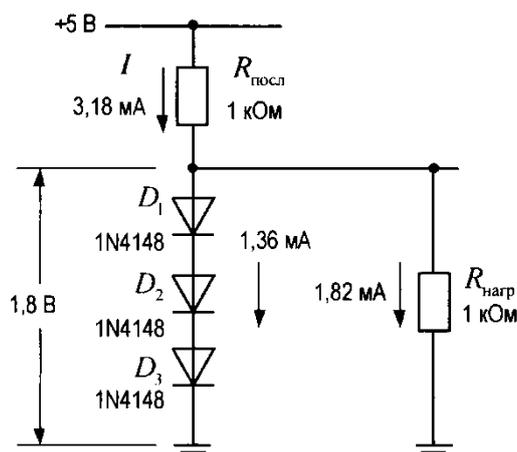
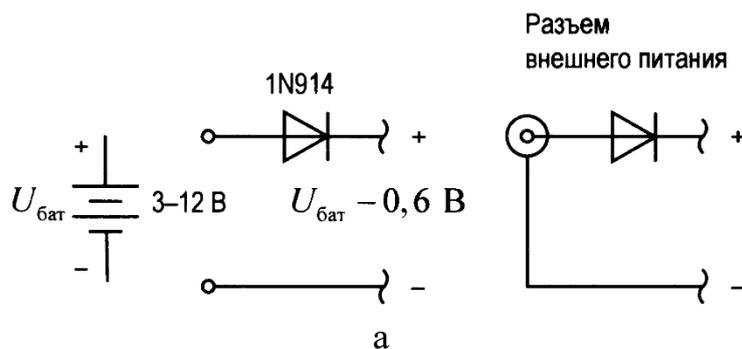


Рис. 16. Использование выпрямительного диода для стабилизации напряжения низковольтное

Защита от подачи обратного напряжения. Подключение батареи или источника питания к портативному (и не только портативному) устройству в обратной полярности может оказаться фатальным для данного устройства. Лучшим способом избежать такого развития событий будет использовать какое-либо механическое приспособление, предотвращающее неправильное подключение питания. Но если такое приспособление может предотвратить полное неправильное подключение, оно может оказаться неспособным предотвратить кратковременный контакт выводов при попытке неправильного подключения, что может вывести устройство из строя. Это особенно относится к устройствам, которые запитываются от щелочных, *NiCad*- или *NiMH*-элементов типоразмера *AA*. Для таких устройств необходимо обеспечить достаточно низкий любой обратный ток, чтобы он не мог повредить схему устройства или саму батарею.

Использование последовательного диода. На рис. 17, а представлена самая простая схема защиты от обратной полярности с помощью диода. Её также можно использовать для устройств, оснащённых разъёмом для подключения внешнего питания. При правильном подключении питания (батареи или внешнего источника питания) диод пропускает ток, но блокирует его при подключении с обратной полярностью. Недостаток этого подхода в том, что диод должен работать с полным током нагрузки. Вдобавок падение напряжения на диоде сокращает время работы устройства от батареи – на диод расходуется 0,6 В. В этом отношении использование диода Шоттки даст лучший результат.



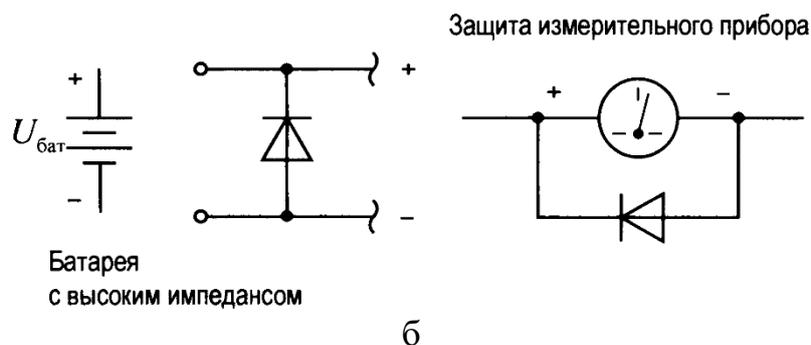


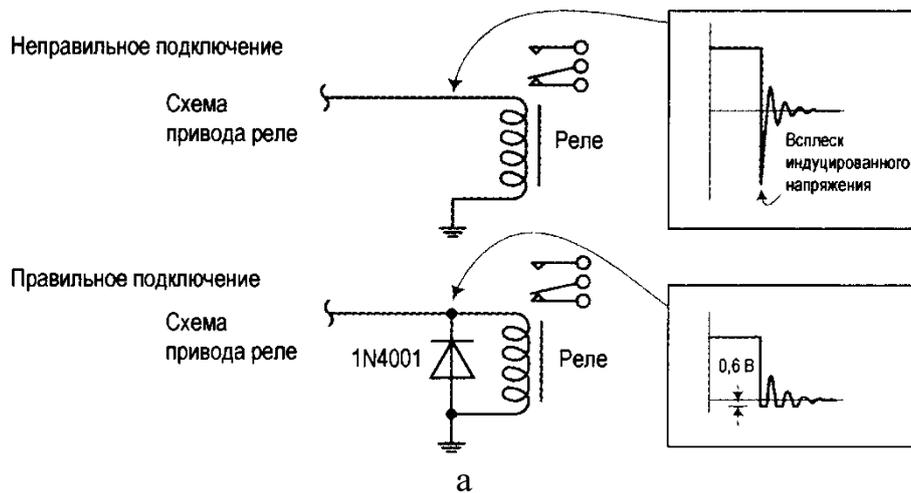
Рис. 17. Предотвращение повреждения устройства при подключении питания в обратной полярности: а) с помощью последовательного диода; б) с помощью параллельного диода

Использование параллельного (шунтирующего) диода. В приложениях, в которых используются щелочные или другие батареи с высоким выходным импедансом (комплексное электрическое сопротивление), защиту от ошибочного подключения питания можно организовать, подключив диод параллельно линиям питания (рис. 17, б). Такой диод называется шунтирующим. При этом также устраняется падение напряжения. Этот подход защищает нагрузку, но при неправильно подключённой батарее через диод протекает большой ток. Поэтому диод должен иметь соответствующие рабочий ток и мощность. С помощью шунтирующего диода можно также защищать измерительные приборы, где он отводит большие токи, входящие в отрицательный вывод прибора.

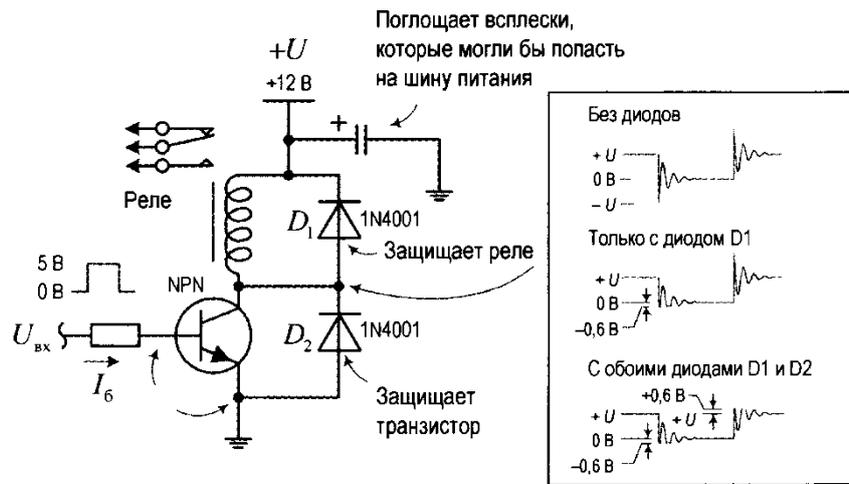
Существуют более сложные устройства защиты на микросхемах или транзисторах с питанием от батареи, у которых практически нулевое падение напряжения и которые кроме защиты от обратной полярности предоставляют другие типы защиты, например от перегрева или превышения напряжения.

Защита от всплесков напряжения посредством диода обратного хода.

Защита от всплесков напряжения. При резком прерывании протекающего по индуктору тока убывающее магнитное поле создаёт всплеск высокого напряжения в катушке индуктора, амплитуда которого может достигать сотен или даже тысяч вольт (рис. 18, а). Это явление особенно распространено с катушками реле. Защитить схемы, которые потенциально могут быть повреждены таким всплеском, можно, подключив к выводам катушки реле диод, который для этого приложения называется диодом обратного хода тока. Этот диод также защищает механические контакты реле, которые часто замыкаются с большой силой под воздействием индуцированного всплеска напряжения. Этот подход обеспечивает защиту только при выключении питания реле, но не при его включении. Также следует использовать выпрямительный диод достаточной номинальной мощности (например, 1N4001, 1N4002 и т. п.). Подойдёт и выпрямительный диод Шоттки (например, 1N5818).

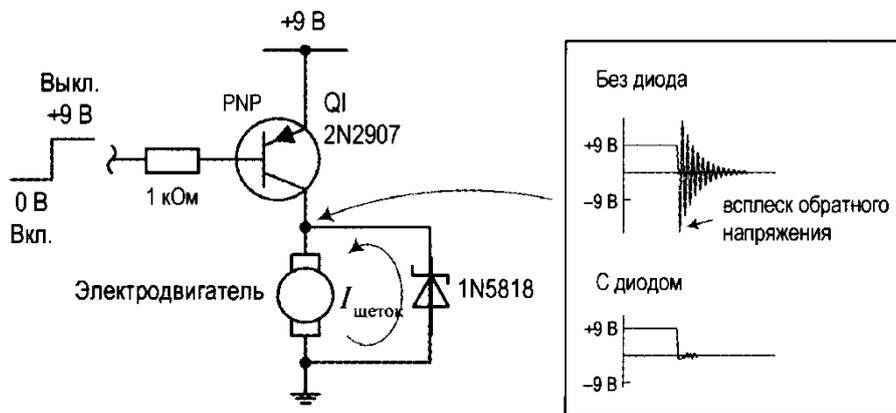


а



Реле вкл. при $U_{вх} = +5 В$ и выкл. $U_{вх} = 0 В$

б



в

Рис. 18. Схема: а) защиты от бросков напряжения с помощью диода обратного хода; б) привода реле с защитными диодами; в) защиты от выброса индуцированного обратного напряжения при выключении электродвигателя

Транзисторная схема привода реле с защитными диодами. На рис. 18, б показана практическая схема для активации реле, в которой кроме диода на контактах реле ещё один диод подключён на коллектор и эмиттер транзистора, чтобы защитить его от всплесков индуцированного напряжения как при выключении, так и при включении транзистора. Такая схема защиты с двумя диодами

иногда используется в схемах стабилизаторов напряжения, где один диод подключается между выходом и входом, а другой – между выходом и землёй. Таким образом предотвращается попадание создаваемых нагрузкой всплесков напряжения обратно на выход микросхемы.

Защита от выброса индуцированного напряжения при выключении электродвигателя. На рис. 18, в показана схема защиты электроники управления двигателя (в данном случае это транзистор 2N2907) от выброса индуктивного напряжения, создаваемого при резком отключении питания. Защита состоит в том, что диод перенаправляет, или закорачивает, индуцированное напряжение на противоположный вывод двигателя. В данном случае используется диод Шоттки 1N5818, но можно также использовать другие диоды с *p-n*-переходом. Диод Шоттки немного быстрее и подавляет всплеск сильнее – приблизительно до 0,4 В.

Для подавления всплесков напряжения используются специальные устройства и варисторы.

Диодные фиксаторы уровня. Диодные фиксаторы уровня используются для ограничения уровня сигнала; с их помощью также можно сместить сигнал переменного тока вверх или вниз, создав так называемый сигнал пульсирующего постоянного тока, т. е. сигнал, который не пересекает линию опорного напряжения 0 В.

Регулируемый ограничитель сигнала. На рис. 19, а показана схема для ограничения максимального уровня сигнала до уровня, задаваемого сопротивлением потенциометра. Для этого напряжение на отрицательном выводе диода должно быть приблизительно на 0,6 В ниже, чем требуемый максимальный уровень выходящего сигнала, чтобы компенсировать падение напряжения на диоде. Для выполнения этой задачи предназначен потенциометр. Напряжение $+U$ должно быть приблизительно на 1 В выше, чем пиковое входящее напряжение.

Регулируемый аттенюатор. Регулируемый аттенюатор (рис. 19, б) похож на предыдущую схему, но содержит дополнительный обратно подключённый диод, вследствие чего схема ограничивает уровень сигнала на обоих полупериодах. Чтобы управлять отдельно ограничением положительного и отрицательного уровней, можно использовать для них отдельные потенциометры. Напряжение $+U$ должно быть приблизительно на 1 В выше, чем пиковое входящее напряжение.

Диодный фиксатор напряжения (восстановление постоянной составляющей). Диодный фиксатор напряжения (рис. 19, в) восстанавливает постоянную составляющую сигнала, переданного посредством связи по переменному току (через конденсатор). Эта операция имеет важность для схем, чей вход похож на вход диода (например, транзистор с заземлённым эмиттером), поскольку она позволяет сохранить сигнал, передаваемый посредством связи по переменному току.

Диодный переключатель. В схеме диодного переключателя (рис. 19, г) входной сигнал вводится на диод и выводится с него посредством связи по переменному току через конденсаторы C_1 и C_2 соответственно. Через резистор R_2 на схему подаётся напряжение смещения. Когда переключатель находится в положении «Вкл.», на сигнал накладывается положительное постоянное напряжение,

сдвига диод в прямом направлении и позволяя ему пропустить сигнал. А когда переключатель находится в положении «Выкл.», отрицательное напряжение смещает диод в обратном направлении, вследствие чего он блокирует проход сигнала.

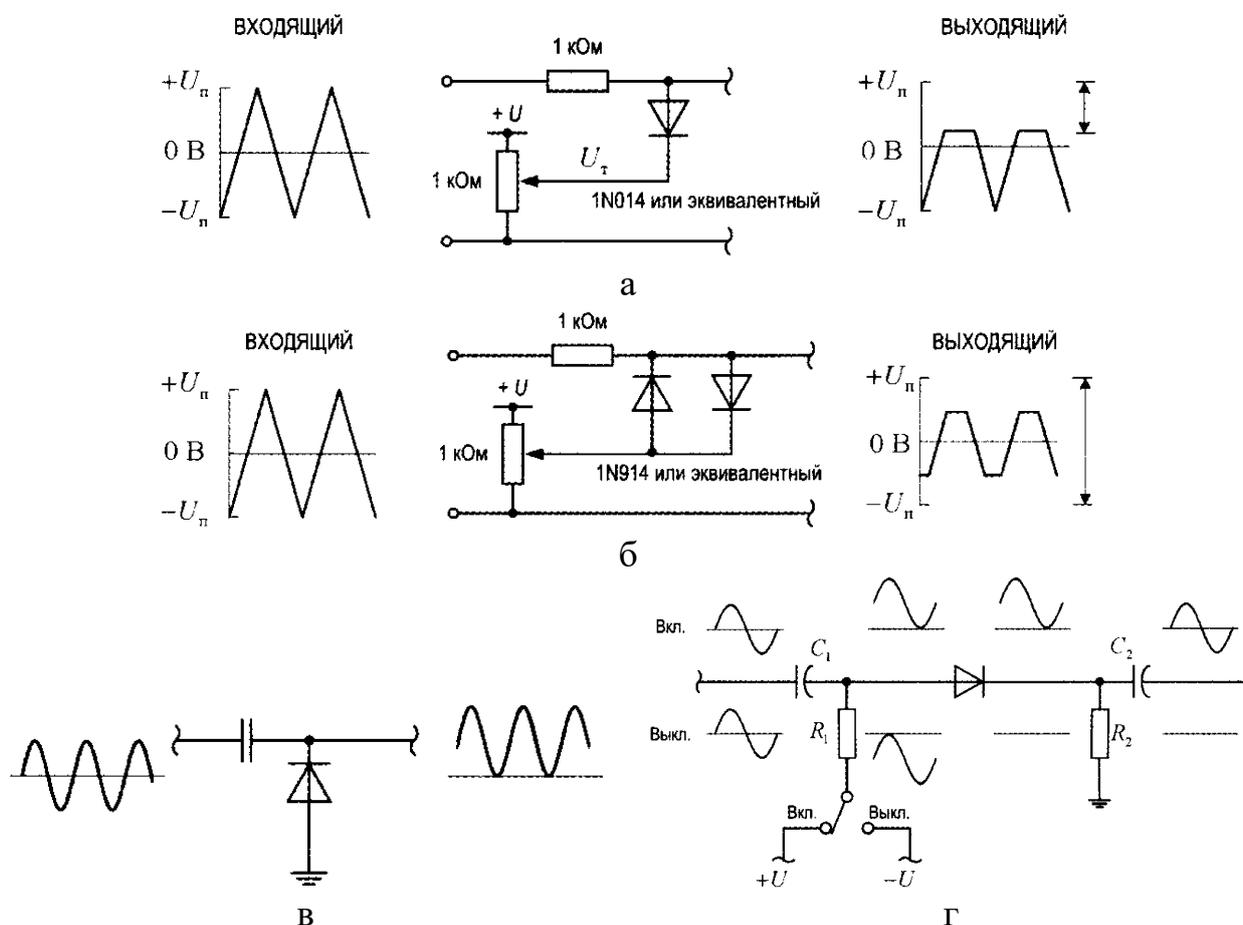
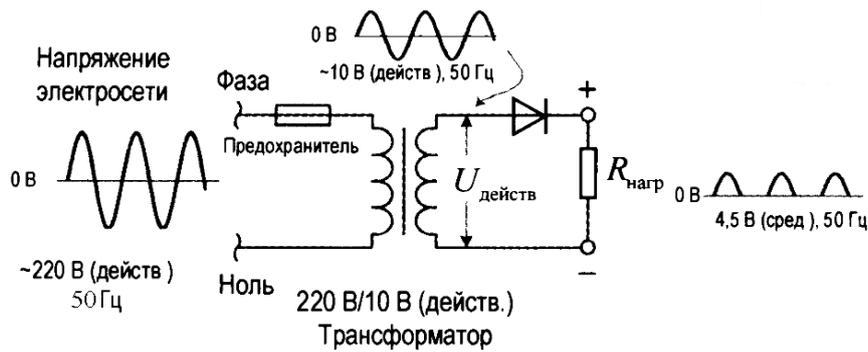


Рис. 19. Диодные фиксаторы уровня: а) регулируемый ограничитель сигнала; б) регулируемый аттенюатор; в) диодный фиксатор напряжения; г) диодный выключатель. U_n , U_T – пиковое напряжение и напряжение среднего вывода потенциометра

Однополупериодный выпрямитель. Однополупериодный выпрямитель (рис. 20, а) используется для преобразования сигнала переменного тока в сигнал пульсирующего постоянного тока, блокируя отрицательные полупериоды синусоиды. На выход выпрямителя обычно добавляется фильтр, чтобы сгладить пульсации и повысить среднее значение постоянного напряжения. МОН диода – напряжение, которое выпрямитель должен выдержать в режиме обратного смещения, варьируется с нагрузкой и должно быть бóльшим, чем пиковое напряжение переменного тока ($1,4U_{\text{действ}}$). Когда имеется фильтрующий конденсатор либо нагрузка потребляет небольшой ток или вообще не потребляет тока, это напряжение может подниматься до $2,8U_{\text{действ}}$ (напряжение на конденсаторе минус пиковое напряжение отрицательного периода вторичной обмотки трансформатора).

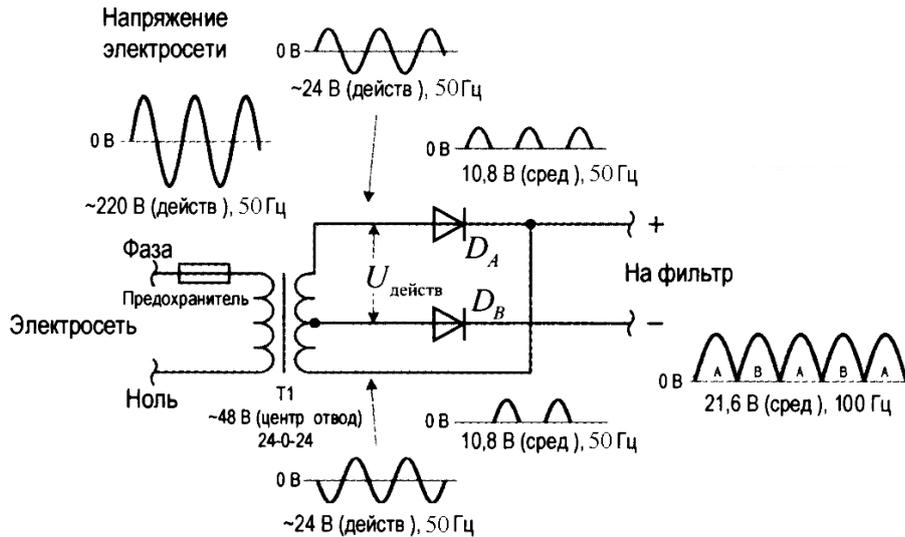


$$U_{\text{пик}} = 1,4 U_{\text{действ}}$$

$$U_{\text{сред}} = 0,45 U_{\text{действ}}$$

Пульсация = 121%/50 Гц
МОН диода > 1,4 $U_{\text{действ}}$
(емкостная нагрузка > 2,8 $U_{\text{действ}}$)

а

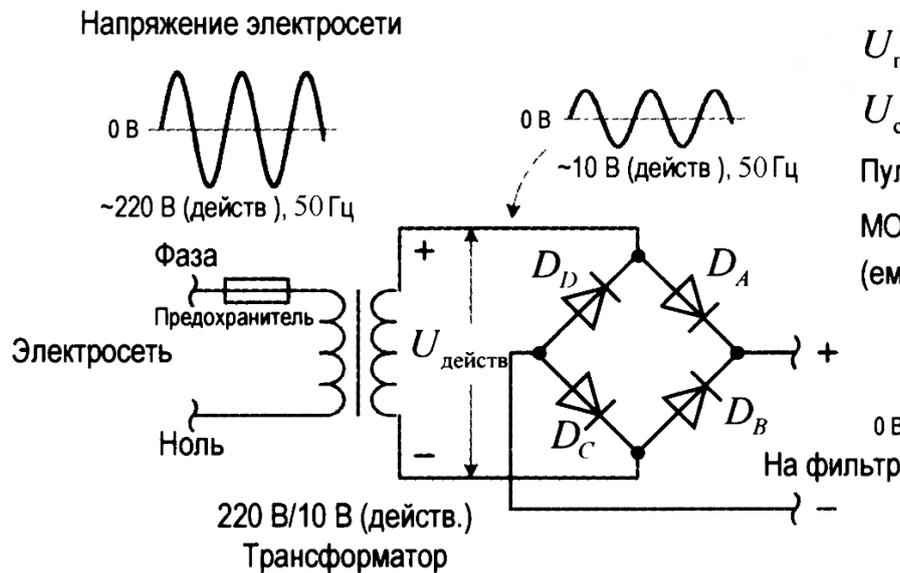


$$U_{\text{пик}} = 1,4 U_{\text{действ}}$$

$$U_{\text{сред}} = 0,9 U_{\text{действ}}$$

Пульсация = 48%/100 Гц
МОН диода > 2,8 $U_{\text{действ}}$
(емкостная нагрузка > 2,8 $U_{\text{действ}}$)

б



$$U_{\text{пик}} = 1,4 U_{\text{действ}}$$

$$U_{\text{сред}} = 0,9 U_{\text{действ}}$$

Пульсация = 48%/100 Гц
МОН диода > 1,4 $U_{\text{действ}}$
(емкостная нагрузка > 1,4 $U_{\text{действ}}$)

в

Рис. 20. Выпрямитель: а) однополупериодный; б) двухполупериодный с центральным отводом; в) двухполупериодный мостовой

Двухполупериодный выпрямитель с центральным отводом. Двухполупериодный выпрямитель (рис. 20, б) представляет собой два объединённых однополупериодных выпрямителя, один из которых преобразует положительный полупериод входного напряжения, а второй отрицательный в пульсирующее

напряжение постоянного тока. Для такого выпрямителя требуется только два диода, но вторичная обмотка должна иметь центральный отвод. Среднее выходное напряжение составляет $0,9U_{\text{действ}}$ половины вторичной обмотки трансформатора; это максимальное значение, которое можно получить, используя соответствующий сглаживающий фильтр с дроссельным входом. Пиковое выходное напряжение составляет $1,4U_{\text{действ}}$ половины вторичной обмотки трансформатора; это максимальное значение, которое можно получить, используя соответствующий сглаживающий фильтр с конденсаторным входом. Указанное на диоде максимальное обратное напряжение не зависит от типа нагрузки на выходе выпрямителя. Это объясняется тем, что состояние максимального обратного напряжения происходит, когда диод D_A находится в проводящем режиме (прямого смещения), а диод D_B – в непроводящем (обратного смещения). При пиковом положительном напряжении на катодах диодов D_A и D_B ($1,4U_{\text{действ}}$) на аноде диода D_B присутствует пиковое отрицательное напряжение также величиной $1,4U_{\text{действ}}$, но в обратном направлении. Таким образом, максимальное обратное напряжение составляет $2,8U_{\text{действ}}$. Частота пульсации выходного напряжения вдвое выше частоты пульсации однополупериодного выпрямителя, благодаря чему требуется сравнительно меньшая фильтрация. Поскольку диоды работают попеременно, каждый из них пропускает половину тока нагрузки. Таким образом, рабочий ток каждого диода может составлять всего лишь половину всего тока, поставляемого источником питания.

Двухполупериодный мостовой выпрямитель. Выходное напряжение выпрямителя на рис. 20, в покое на выходное напряжение предыдущего выпрямителя, но для него не требуется трансформатор со вторичной обмоткой с центральным отводом. Чтобы понять работу этого выпрямителя, отследите протекание тока через диодные однонаправленные вентили для каждого полупериода. Амплитуда выходного напряжения будет на $1,2$ В ниже амплитуды входного по причине падения напряжения на $0,6$ В на каждом из двух диодов плеча моста в каждом полупериоде. Среднее выходное постоянное напряжение на резистивной нагрузке или сглаживающем фильтре с дроссельным входом составляет $0,9U_{\text{действ}}$ вторичной обмотки трансформатора; при использовании конденсаторного фильтра и лёгкой нагрузки максимальное выходное напряжение будет $1,4U_{\text{действ}}$. Обратное напряжение на каждом диоде составляет $1,4U_{\text{действ}}$, поэтому максимальное обратное напряжение каждого диода больше, чем $1,4U_{\text{действ}}$.

Достоинства и недостатки разных конфигураций выпрямителей. Сравнивая двухполупериодный выпрямитель с центральным отводом и двухполупериодный мостовой выпрямитель, можно заметить, что требования к выпрямительным диодам в обеих схемах почти одинаковые. Но в версии с центральным отводом используется вдвое меньше диодов, чем в мостовой версии. МОН этих диодов должно быть вдвое выше этого параметра диодов мостового выпрямителя (более $2,8U_{\text{действ}}$ в отличие от более $1,4U_{\text{действ}}$ соответственно). Рабочий ток диодов одинаковый для обеих схем. Вторичная обмотка используется более эффективно в мостовом выпрямителе, чем в выпрямителе с центральным отводом. Это объясняется тем, что вторичная обмотка мостового выпрямителя полностью используется в течение каждого полупериода, тогда как в выпрямителе с

центральным отводом в каждом полупериоде используется только половина вторичной обмотки. Эффективность использования обмоток часто называется коэффициентом использования трансформатора, который равен единице для мостового выпрямителя и 0,5 для выпрямителя с центральным отводом.

Для силовых низковольтных приложений двухполупериодный выпрямитель с центральным отводом пользуется большей популярностью, чем мостовой выпрямитель. Это объясняется тем, что в мостовом выпрямителе два падения напряжения на двух последовательных диодах в режиме прямого смещения добавляют 1 вольт или больше к потерям, потребляя таким образом больше мощности (тепловые потери), чем один диод в двухполупериодном выпрямителе с центральным отводом.

Что касается однополупериодной конфигурации, то она редко используется при выпрямлении напряжения частотой 50-60 Гц, кроме как в источниках напряжения смещения. Но она часто применяется в высокочастотных импульсных источниках питания – в так называемых прямоходовых и обратных преобразователях.

Умножители напряжения.

Однополупериодный умножитель напряжения. В однополупериодном умножителе напряжения (рис. 21, а) входное напряжение переменного тока преобразуется в выходное напряжение постоянного тока, приблизительно вдвое большее, чем входное пиковое напряжение (или в 2,8 раз выше входного действующего напряжения). В зависимости от значений используемых конденсатора, резистора и нагрузки фактический коэффициент умножения может немного отличаться от указанного. В данной схеме напряжение $U_{вх}$ означает напряжение со вторичной обмотки трансформатора. В течение первого отрицательного полупериода в режиме проводимости находится диод D_A , заряжая конденсатор C_1 до максимального выпрямленного напряжения $U_{вх}$ (пиковое) или $1,4U_{вх}$ (действующее). В течение положительного полупериода напряжения вторичной обмотки диод D_A находится в режиме обратного смещения, а диод D_B – в режиме проводимости, заряжая конденсатор C_2 . Подаваемое на конденсатор C_2 напряжение равно максимальному напряжению вторичной обмотки трансформатора $U_{вх}$ (пиковое) плюс напряжение, накопленное в конденсаторе C_1 , значение которого такое же; таким образом, сумма этих напряжений составляет $2U_{вх}$ (пиковое) или $2,8U_{вх}$ (действующее). В следующем отрицательном полупериоде диод D_B находится в режиме обратного смещения и конденсатор C_2 разряжается в нагрузку. Если нагрузка отсутствует, конденсаторы остаются заряженными – конденсатор C_1 до напряжения $1,4U_{вх}$ (действующее), а конденсатор C_2 до напряжения $2,8U_{вх}$ (действующее). Когда на выход выпрямителя подключена нагрузка, в течение отрицательного полупериода напряжение на конденсаторе C_2 падает, а в течение положительного полупериода он снова заряжается до напряжения $2,8U_{вх}$ (действующее). Выходной сигнал на конденсаторе C_2 похож на выходной сигнал однополупериодного выпрямителя, поскольку конденсатор C_2 выдаёт импульс напряжения только каждый второй полупериод. На рис. 21, а приведён график уровней зарядки обоих конденсаторов в течение цикла. В реальной работе конденсаторы не будут разряжаться полностью, как показано на графике.

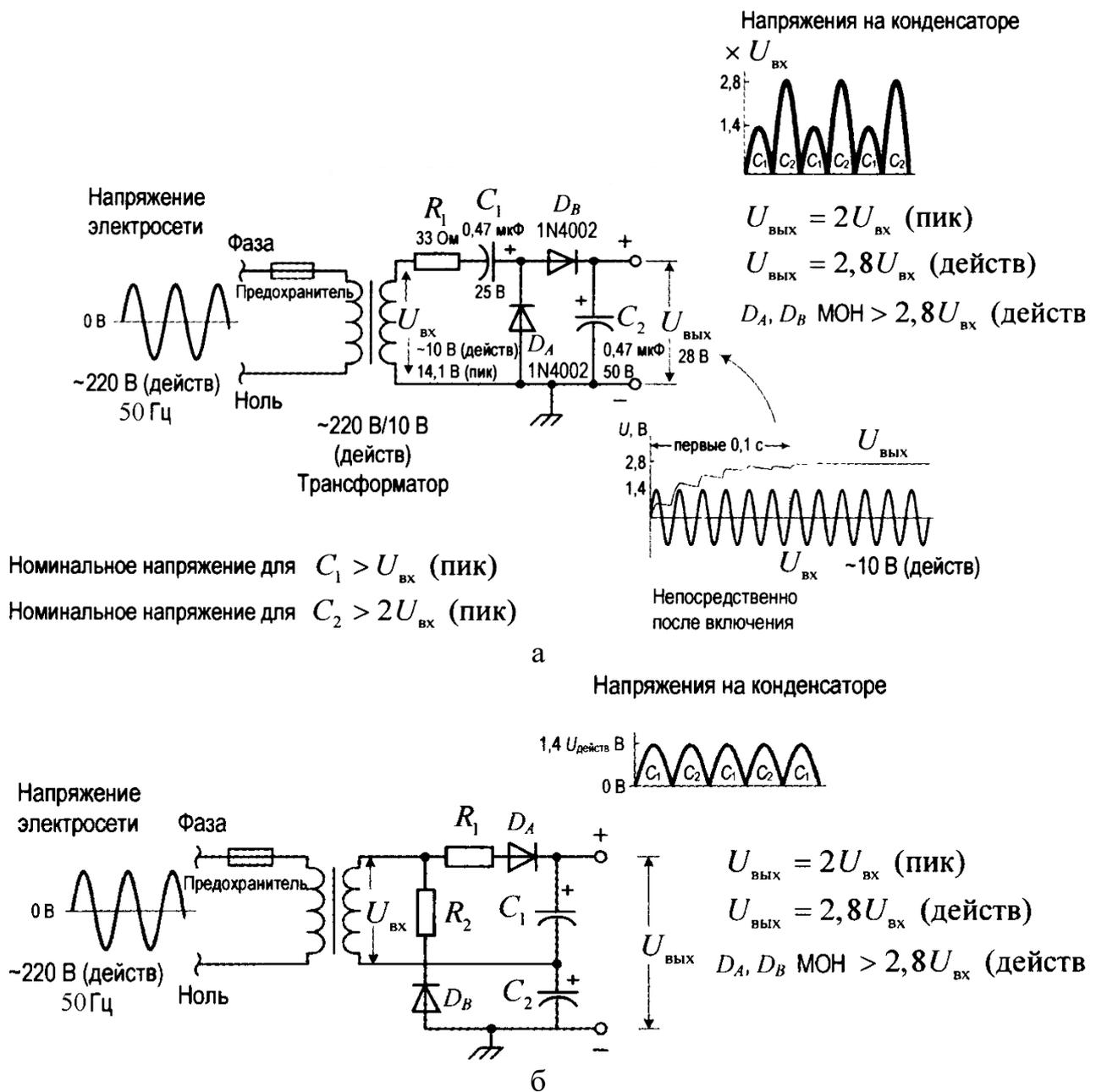


Рис. 21. Удвоители напряжения: а) однополупериодный; б) двухполупериодный

Двухполупериодный удвоитель напряжения. В двухполупериодном удвоителе напряжения (рис. 21, б) в течение положительного полупериода напряжения вторичной обмотки трансформатора диод D_A находится в режиме проводимости, заряжая конденсатор C_1 до уровня напряжения $U_{\text{ВХ}}$ (пиковое) или $1,4U_{\text{ВХ}}$ (действующее). В течение отрицательного полупериода в режиме проводимости находится диод D_B , заряжая конденсатор C_2 до такого же уровня напряжения. Таким образом, выходное напряжение является суммой напряжений этих двух конденсаторов, а именно $2U_{\text{ВХ}}$ (пиковое) или $2,8U_{\text{ВХ}}$ (действующее) в условиях холостого хода (без нагрузки). На графике показана поочередная зарядка каждого конденсатора в течение соответствующего полупериода. Эффективная ёмкость фильтра равна общей ёмкости последовательно соединённых конденсаторов C_1 и C_2 , что меньше ёмкости любого из этих двух конденсаторов в отдельности. Резисторы R_1 и R_2 служат для подавления токов перегрузки в выпрямителе. Их значения

подбираются на основе напряжения вторичной обмотки трансформатора и максимального значения тока перегрузки выпрямительного диода, поскольку в момент включения питания конденсаторы фильтра выглядят как короткозамкнутая нагрузка. При условии, что токоограничивающие резисторы могут выдержать ток перегрузки, их параметр рабочего тока выбирается на основе максимального тока нагрузки, МОН составляет $2,8U_{вх}$ (действующее).

Утроитель напряжения. В утроителе напряжения (рис. 22, а) в течение одного полупериода конденсаторы C_1 и C_3 заряжаются до напряжения $U_{вх}$ (пиковое) через диоды D_1 , D_2 и D_3 . В течение противоположного полупериода диод D_1 находится в режиме обратного смещения, а диод D_2 в режиме прямого, а конденсатор C_2 заряжается до напряжения $2U_{вх}$ (пиковое), поскольку на него подаётся напряжение как из трансформатора, так и из конденсатора C_1 . В то же время диод D_3 находится в режиме прямого смещения, вследствие чего конденсатор C_3 заряжается от трансформатора и конденсатора C_2 до напряжения, равного тройному напряжению трансформатора.

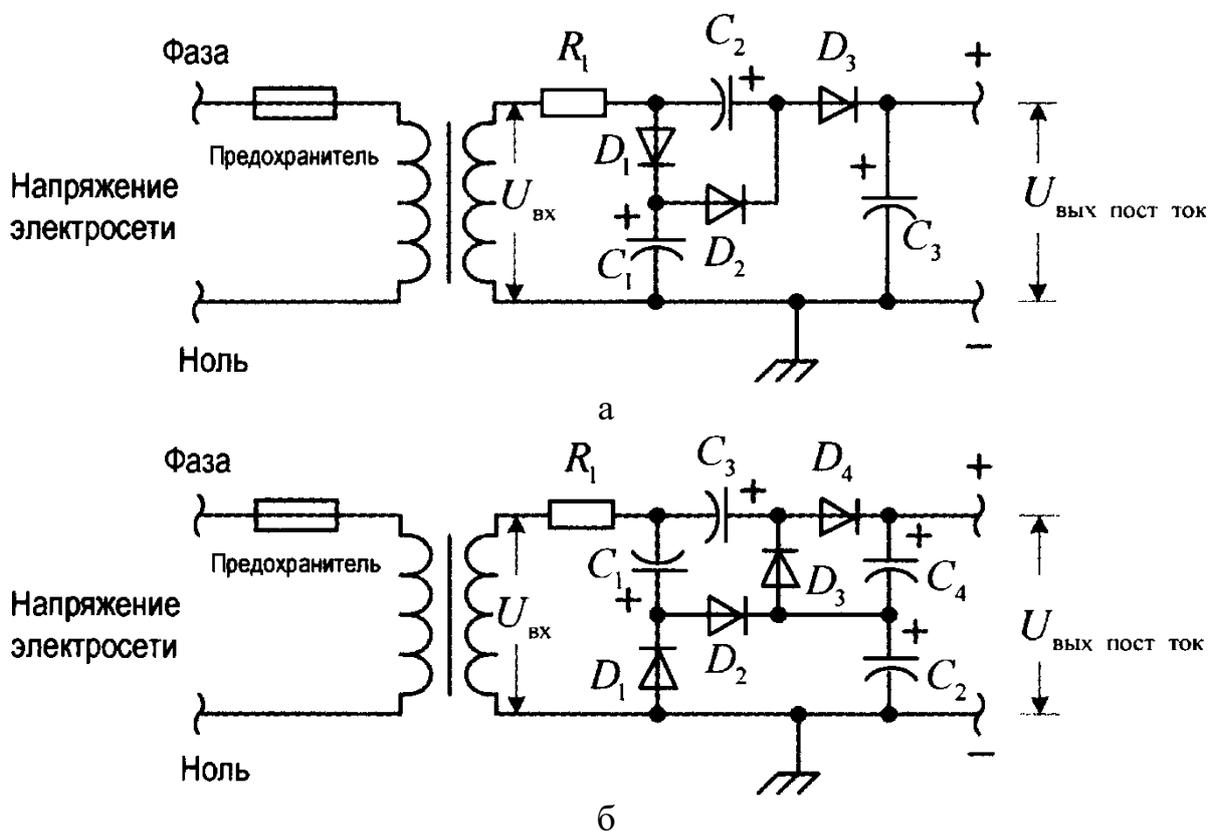


Рис. 22. Умножители напряжения: а) утроитель напряжения; б) учетверитель напряжения

Учетверитель напряжения. Учетверитель напряжения (рис. 22, б) работает подобно утроителю напряжения. В обеих этих схемах выходное напряжение приближается к значению, точно кратному максимальному (пиковому) значению переменного напряжения при низком потреблении выходного тока и высоких значениях ёмкостей конденсаторов. Ёмкость конденсаторов будет от 20 до 50 мкФ в зависимости от потребления тока нагрузкой. Номинальное напряжение

постоянного тока конденсаторов связано с напряжением $U_{\text{ВХ}}$ следующим образом:

- C_1 – больше чем $U_{\text{ВХ}}$ (пиковое) или $0,7U_{\text{ВХ}}$ (действующее);
- C_2 – больше чем $2U_{\text{ВХ}}$ (пиковое) или $1,4U_{\text{ВХ}}$ (действующее);
- C_3 – больше чем $3U_{\text{ВХ}}$ (пиковое) или $2,1U_{\text{ВХ}}$ (действующее);
- C_4 – больше чем $4U_{\text{ВХ}}$ (пиковое) или $2,8U_{\text{ВХ}}$ (действующее).

Логические элементы на диодах. Простые логические элементы на диодах будут полезны для изучения основ цифровой логики (рис. 23). Их можно приспособить для использования в аналоговой электронике (например, в высоковольтных или силовых схемах). При разработке силовых схем такие параметры диодов, как МОН и номинальный ток, должны отвечать требованиям схемы. Также важно иметь в виду, что время восстановления силовых диодов будет не таким маленьким, как у микросхем цифровой логики или быстродействующих диодов.

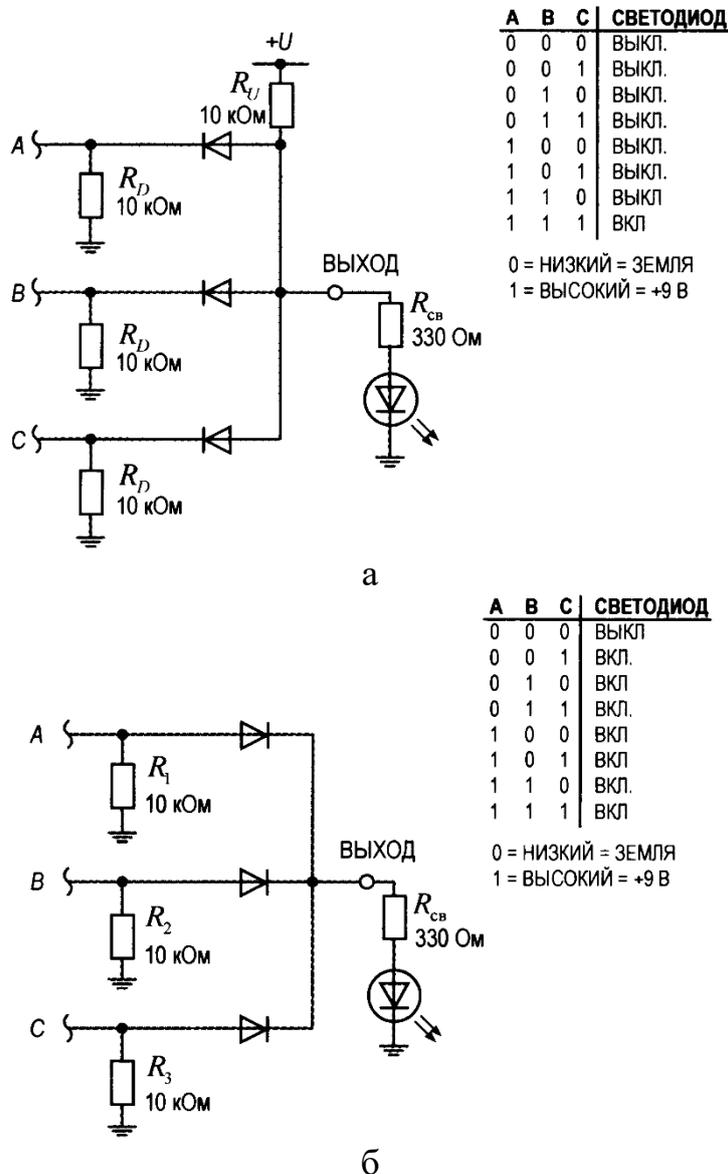


Рис. 23. Логические элементы «И» (а) и «ИЛИ» (б)

На катоды диодов подаётся низкое напряжение через понижающие резисторы R_D (рис. 23, а). Диоды находятся в режиме прямого смещения, на выходе удерживается низкий уровень. Если на катоды любых двух диодов подать высокий уровень, вследствие чего они перейдут в режим обратного смещения, третий диод все равно будет удерживать низкий уровень на выходе. Чтобы на выходе был высокий уровень, напряжение высокого уровня необходимо приложить на катоды всех трёх диодов.

На анодах и катодах всех диодов низкий уровень, вследствие чего уровень на выходе также низкий (рис. 23, б). Если на анод любого из трёх диодов подать высокий уровень, он перейдёт в режим прямого смещения, вследствие чего на выход будет подаваться высокий уровень.

Резервное батарейное питание. Источники питания, например малогабаритные сетевые адаптеры, вставляемые в розетку электросети, можно оснастить резервным батарейным питанием, как показано на рис. 24.

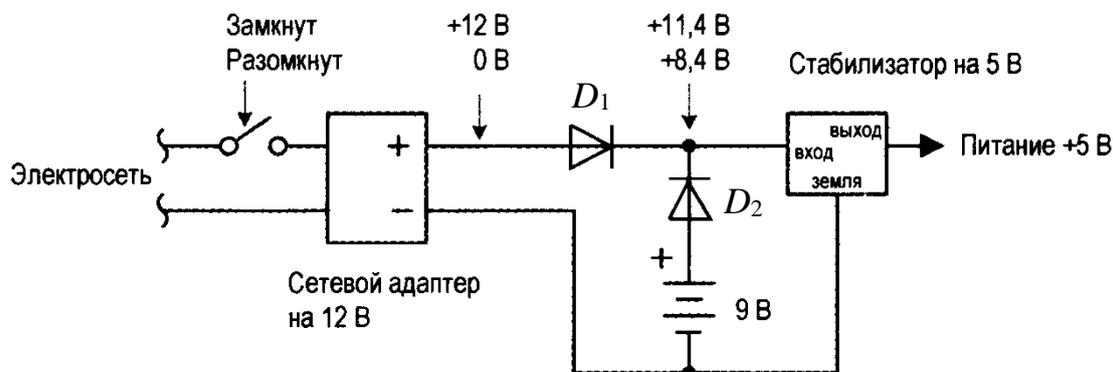
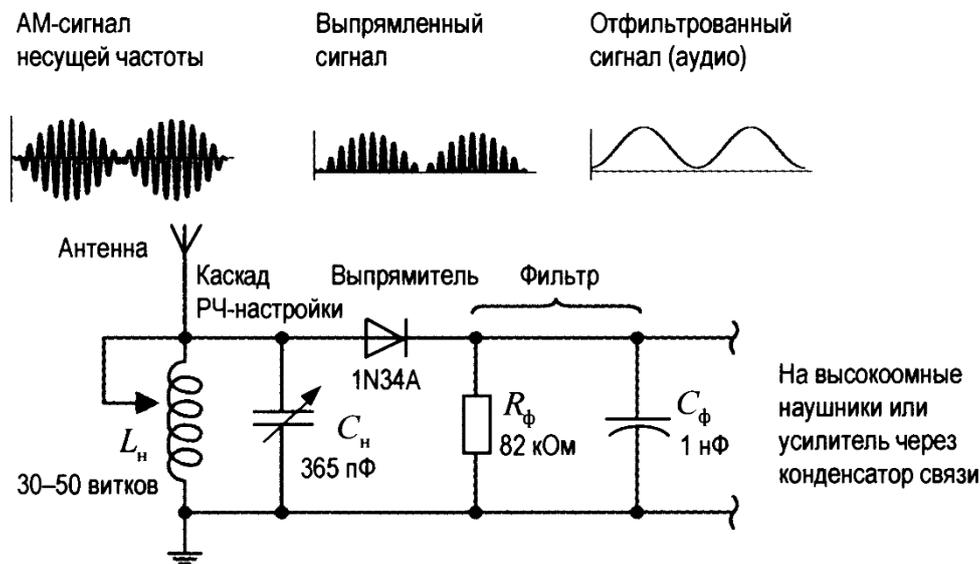


Рис. 24. Схема резервного батарейного питания

При наличии питания в электросети и замкнутом переключателе питание на нагрузку поставляется через диод D_1 от сетевого адаптера; диод D_2 находится в режиме обратного смещения (непроводимости), поскольку потенциал его отрицательного вывода (катода) на 2,4 В более положительный, чем потенциал положительного вывода (анода). Почему на 2,4 В, а не на 3 В, как казалось должно быть? По причине падения напряжения на 0,6 В на диоде. В случае прерывания питания электросети (или размыкании переключателя) на катоде диода D_1 больше нет положительного потенциала, что переводит диод D_2 в режим проводимости, и в результате через него на нагрузку начинает протекать ток из батареи. Путь току в сетевой адаптер блокируется диодом D_1 . Этой схеме характерен один недостаток – подключённый последовательно батарее диод ограничивает минимальное напряжение батареи, при котором она может подавать ток на нагрузку (около 0,6 В для кремниевых диодов с $p-n$ -переходом и около 0,4 В для диодов Шоттки). Более практичные системы резервного батарейного питания реализуются с использованием транзисторов или специальных микросхем с внутренним компаратором, который переключает на питание от батареи через транзистор с низким внутренним сопротивлением, вследствие чего на нём нет падения напряжения.

Приёмник амплитудно-модулированных сигналов. Диоды часто используются в схемах для приёма амплитудно-модулированных (АМ) сигналов. Пример такой простой схемы показан на рис. 25.



Постоянная времени выходного фильтра превышает период несущей, но короче, чем период аудиосигнала

Рис. 25. Приёмник сигналов амплитудной модуляции. L_n , C_n – индуктивность и ёмкость настройки; R_ϕ , C_ϕ – сопротивление и ёмкость фильтра

Сигнал несущей постоянной частоты (550...1 700 кГц) амплитудно модулируется аудиосигналом (10...20 000 Гц), в результате чего получается амплитудно-модулированный радиосигнал. Аудиоинформация содержится как в верхней, так и в нижней боковой полосе, или огибающей, АМ-сигнала. Антенна и LC-контур настройки приёмника резонируют на определённой частоте несущей (преобразуют радиосигнал в соответствующий электрический сигнал). Затем импульсный диод (например, 1N34) выпрямляет полученный сигнал, удаляя из него отрицательные полупериоды, чтобы его можно было обрабатывать в следующих каскадах по постоянному току. Из выпрямленного сигнала удаляется высокая частота носителя после пропускания его через низкочастотный фильтр. В результате получается аудиосигнал, который можно прослушивать на электростатических наушниках, современных чувствительных наушниках или наушнике от телефонной трубки. Для прослушивания аудиосигнала на низкоомных наушниках или подачи его на усилитель сигнал необходимо пропустить через конденсатор ёмкостью около 1 пФ.

Оконечная нагрузка диодом Шоттки. Оконечную нагрузку посредством диодов Шоттки можно использовать для нейтрализации эффектов в высокоскоростных линиях передачи, которые вызывают положительные или отрицательные выбросы на фронте импульса от отражений сигнала, уменьшают запас помехоустойчивости и нарушают тактирование. Эти типы помех могут вызывать ложные сигналы срабатывания в линиях тактирования и ошибочные данные в линиях данных, адресов и управления, а также значительно усиливать

флуктуации сигналов тактирования и данных. В случаях, когда импеданс линии варьируется или неизвестен, для неё невозможно указать конкретное значение резистора оконечной нагрузки и требуется искать альтернативное решение.

Реализация оконечной нагрузки с помощью диодов Шоттки позволяет сохранять целостность и мощность сигнала, а также предоставляет гибкость в разработке систем связи. Оконечная нагрузка посредством диодов Шоттки заключается в подключении окончания линии сигнала с использованием двух диодов Шоттки к линии питания $U_{\text{пит}}$ и земле, как показано на рис. 26. Диоды в конце линии передачи минимизируют эффекты отражения сигнала, ограничивая их уровень. Верхний диод ограничивает напряжения, превышающие напряжение $U_{\text{пит}}$ на величину порогового значения прямого смещения. Таким образом минимизируются выбросы на переднем фронте импульса, вызываемые отражением сигнала. Нижний диод реализует подобную функцию оконечной нагрузки для выбросов на заднем фронте импульса. Данная функция ограничения не зависит от согласования характеристического импеданса линии передачи, что делает её полезной в ситуациях, когда импеданс линии варьируется или неизвестен.

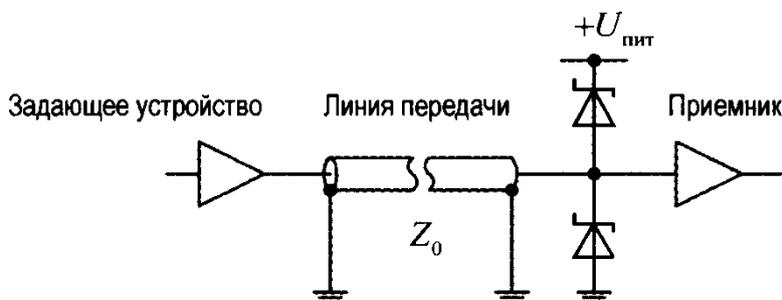


Рис. 26. Оконечная нагрузка диодами Шоттки

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). С помощью диодов можно реализовать простое постоянное запоминающее устройство, как показано в схеме на рис. 27. В данном случае ПЗУ функционирует как преобразователь из десятичной системы в двоичную. Когда ни одна из кнопок не нажата, горят все светодиоды. Если нажать кнопку 1, ток из источника будет отводиться диодами из линий 2^3 , 2^2 и 2^1 на землю, но будет продолжать протекать по линии 2^0 , в результате чего на светодиодах будет отражаться комбинация 0001.

В действительности использование данной схемы для преобразования из одной системы счисления в другую или вообще для каких-либо других целей не очень практично. Обычно такое преобразование выполняется с помощью специальной микросхемы (или с помощью сканируемой клавиатуры, сопряжённой с микроконтроллером, исполняющим программу), выполняющей фактическое преобразование. Но в любом случае это полезная образовательная схема, позволяющая получить общее представление о принципах работы ПЗУ.

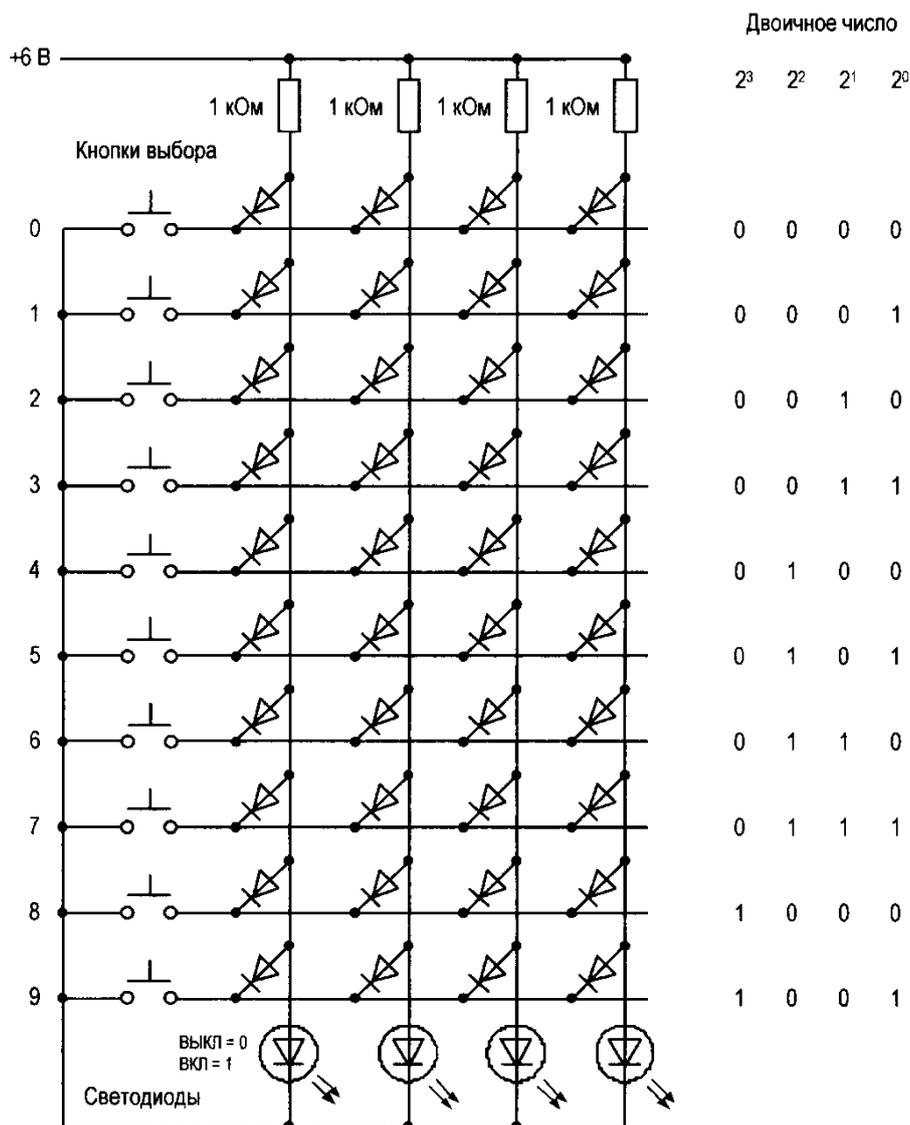


Рис. 27. Постоянное запоминающее устройство на диодах

3.5. Стабилитроны

Стабилитрон (или диод Зенера – *Zener diode*) функционирует как двунаправленный вентиль, управляющий протеканием тока [4]. Он легко пропускает ток в прямом направлении, требуя напряжения смещения величиной всего лишь около 0,6 В подобно стандартному диоду. Но в обратном направлении он представляет более труднопреодолимое препятствие для тока, требуя напряжения смещения, равного напряжению $U_{ст}$ стабилизации стабилитрона. В зависимости от конкретного стабилитрона, напряжение пробоя может быть в диапазоне от 1,8 до 200 В (для 1N5225В $U_{ст} = 0,3$ В, для 1N4733А $U_{ст} = 5,1$ В, для 1N4739А $U_{ст} = 9,1$ В и т. д.). Так, в зависимости от типа стабилитрона варьируется и номинальная мощность от 0,25 до 50 Вт. Принцип работы стабилитрона показан на рис. 28.

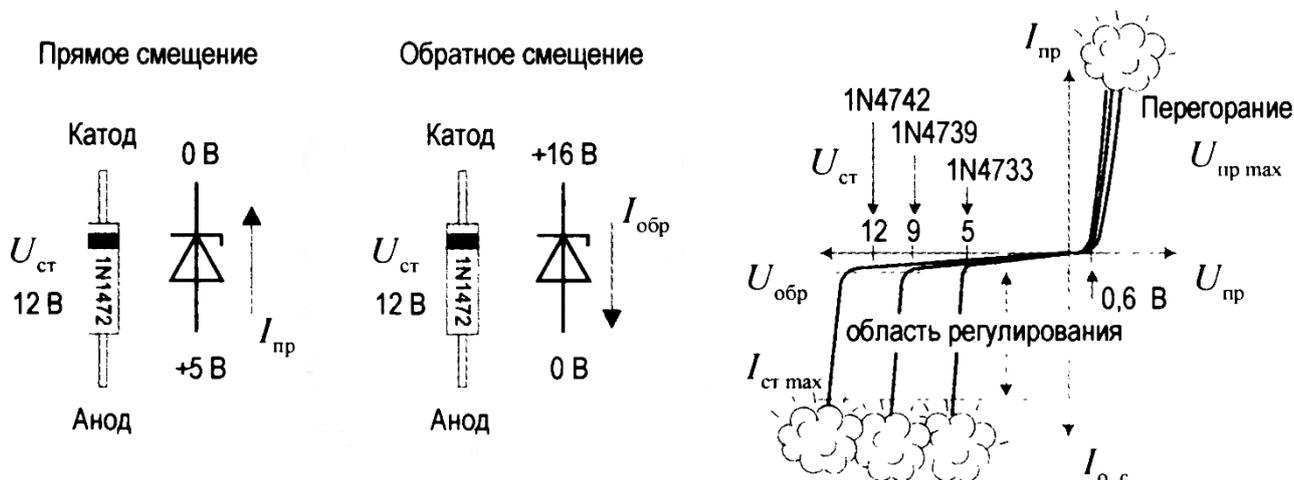


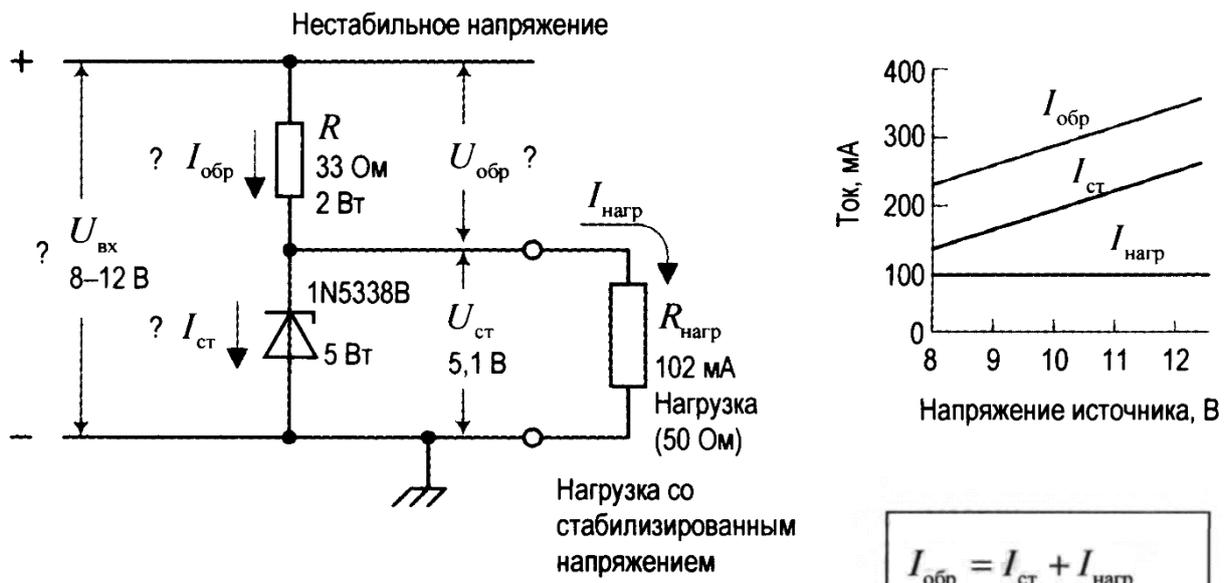
Рис. 28. Принцип работы стабилитрона и кривые $U(I)$ стабилитрона, где $I_{пр}$, $U_{пр}$ – ток и напряжение прямого смещения; $I_{обр}$, $U_{обр}$ – ток и напряжение обратного смещения

Для большинства приложений стабилитрон подключается в режиме обратного смещения вместе с последовательным резистором. В такой конфигурации стабилитрон функционирует подобно клапану сброса давления, пропуская ток такой силы, который требуется, чтобы удерживать постоянное напряжение, равное $U_{ст}$. Иными словами, он может функционировать как стабилизатор напряжения.

Стабилизатор напряжения на стабилитроне. Стабилизаторы напряжения не позволяют колебаниям в напряжении источника или тока нагрузки изменять подаваемое на нагрузку напряжение. В примерах на рис. 29 рассматривается, как стабилитрон корректирует колебания и напряжения источника, и тока нагрузки.

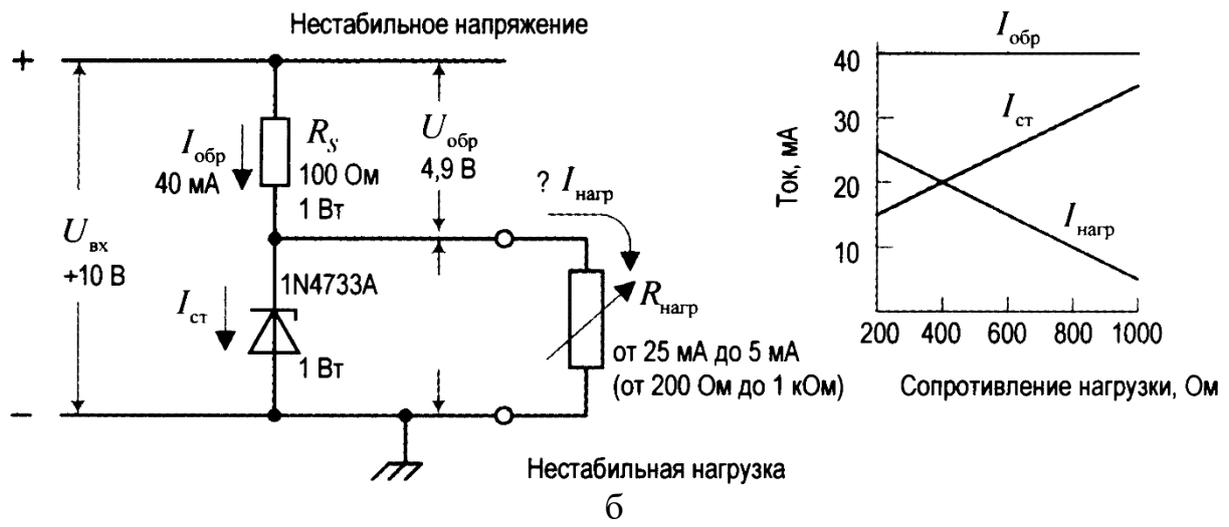
Корректирование колебаний напряжения источника. Повышение напряжения источника вызывает повышение тока источника. Поскольку напряжение нагрузки удерживается постоянным стабилитроном, повышение тока источника вызывает повышение тока, протекающего через стабилитрон, а ток через нагрузку не изменяется. Понижение напряжения источника вызывает понижение его тока, вследствие чего меньший ток протекает через стабилитрон. См. график на рис. 29, а.

Корректирование колебаний тока нагрузки. При понижении сопротивления нагрузки (повышении тока нагрузки) напряжение на нагрузке стремится понизиться, но повышение тока нагрузки нейтрализуется понижением тока через стабилитрон. Таким образом на нагрузке удерживается постоянное напряжение. При повышении сопротивления нагрузки (понижении тока нагрузки) напряжение на нагрузке стремится повыситься, но повышение тока нагрузки нейтрализуется повышением тока через стабилитрон. Таким образом на нагрузке удерживается сравнительно постоянное напряжение. См. график на рис. 29, б.



$I_{ст\ min}$ — минимальный ток, требуемый для поддержания постоянного напряжения $U_{ст}$
 $I_{ст\ max}$ — максимальный допустимый ток стабилитрона

а



Нестабильная нагрузка

б

Рис. 29. Корректирование колебаний: а) напряжения источника посредством стабилитрона; б) тока нагрузки посредством стабилитрона

Для выбора значений компонентов можно использовать следующие формулы:

$$R_S = \frac{U_{вх\ min} - U_{ст}}{I_{ст\ min} + I_{нагр\ max}}$$

$$P_{обр} = \frac{(U_{вх\ max} - U_{ст})^2}{R_S}$$

$$P_{ст\ max} = U_{ст} \frac{(U_{вх\ max} - U_{ст})}{R_S}$$

где R_S – резистор, включаемый последовательно со стабилитроном; $U_{вх\ min}$ и

$U_{вх\ max}$ – минимальное и максимальное входные напряжения; $P_{обр}$ – номинальная мощность на резисторе R_S ; $P_{ст\ max}$ – максимальная мощность, рассеиваемая стабилитроном.

Обратите внимание, что стабилитроны в некоторой степени температурно зависимы и поэтому не являются лучшим выбором для использования в критических приложениях. Хотя более дорогостоящие микросхемы линейного регулятора не так зависят от температурных колебаний благодаря встроенному усилителю сигнала рассогласования. Но в таких микросхемах также используется встроенный стабилитрон, чтобы устанавливать опорное значение.

Характеристики распространённых стабилитронов. На рис. 30 представлено несколько примеров корпусов стабилитронов, а в табл. 2 приведены сравнительные характеристики наиболее распространённых стабилитронов разных типов и исполнений. Эта информация может помочь в выборе правильного стабилитрона для определённого применения.

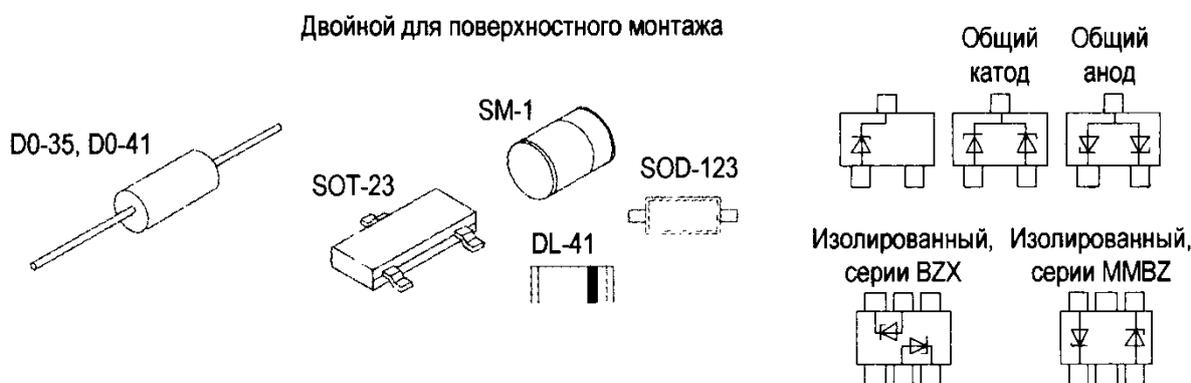


Рис. 30. Примеры стабилитронов в разных корпусах

Таблица 2 – Сравнительные характеристики распространённых стабилитронов

Напряжение стабилитрона, В	Корпус и номинальная мощность					
	Осевые выводы			Поверхностный монтаж		
	500 мВт	1 Вт	5 Вт	200 мВт	500 мВт	1 Вт
3,3	1N5226B	1N4728A	1N5333B	BZX84C3V3, MMBZ5226B	BZT52C3V3, ZMM5226B	ZM4728A
20	1N5250B	1N4747A	1N5357B	BZX84C20, MMBZ5250B	BZT52C20, ZMM5250B	SMAZ20, ZM4747A
39	1N5259B	1N4754A	1N5366B	BZX84C39, MMBZ5259B	BZT52C39, ZMM5259B	SMAZ39, ZM4754A

3.6. Применение стабилитронов

Двухполярный источник питания на одной вторичной обмотке. На рис. 31 показана схема двухполярного источника питания с использованием двух стабилитронов и вторичной обмотки без центрального отвода. Чтобы получить требуемое разделение напряжения и мощности, стабилитроны Z_1 и Z_2 должны иметь одинаковое напряжение пробоя и номинальную мощность. По причине температурной зависимости стабилитронов данный источник питания менее

точный, чем источник с использованием двух микросхем стабилизатора. Но для некритических приложений эта схема будет более простой альтернативой.

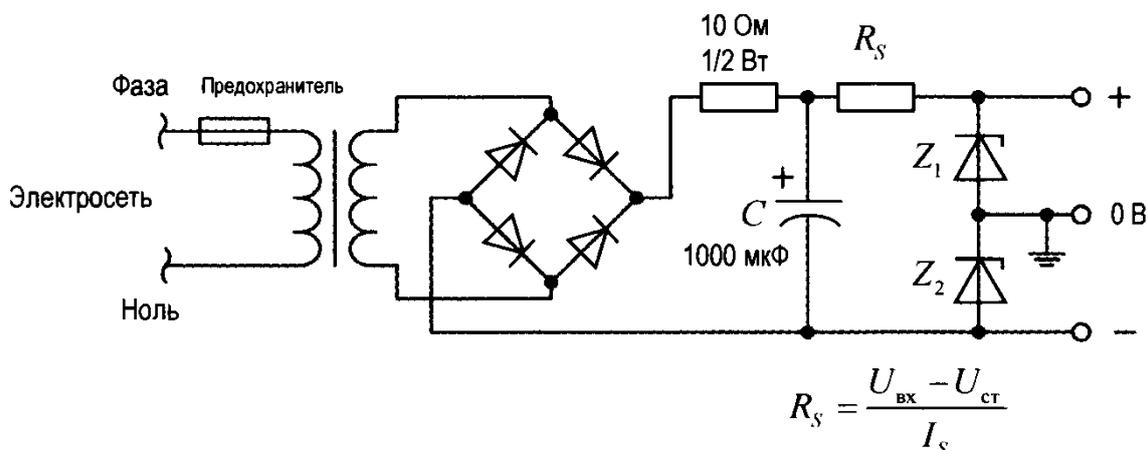


Рис. 31. Двухполярный источник питания на одной вторичной обмотке

Модификатор и ограничитель сигнала. В схеме на рис. 32 два стабилитрона отсекают конечную часть обоих полупериодов входящего синусоидального сигнала, в результате на выходе получается сигнал почти прямоугольной формы. Кроме изменения формы сигнала данную схему можно подключить на выход источника питания постоянного тока, чтобы не допустить попадания нежелательных выбросов напряжений на нагрузку. В таком случае напряжения пробоя стабилитронов должны быть большими, чем напряжение источника питания, но меньшими, чем максимальное допустимое напряжение всплеска. Такого же результата можно добиться, используя один двунаправленный диод для подавления выбросов напряжения.

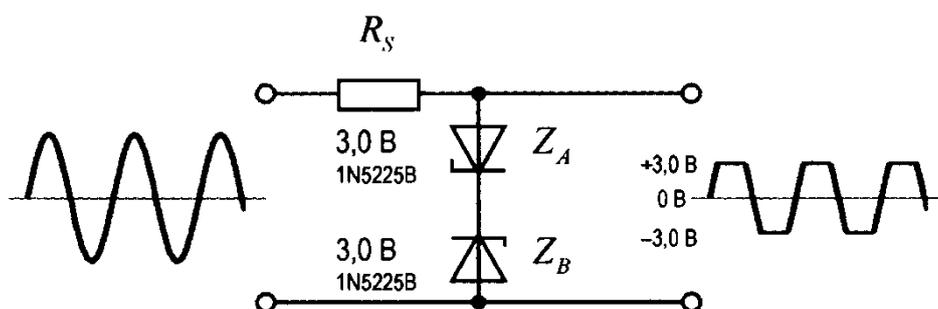


Рис. 32. Модификатор и ограничитель сигнала

Смещение уровня напряжения. Схема на рис. 33 смещает входящее напряжение на величину, равную напряжению пробоя стабилитрона. При нарастающем положительном напряжении пробой стабилитрона не происходит до тех пор, пока не будет достигнут уровень 5,1 В (для стабилитрона 1N5281В). После пробоя выходное напряжение следует за входным, но сдвинутое на 5,1 В ниже. Когда входное напряжение становится отрицательным, выходное продолжает следовать за ним, но уже смещается только на 0,6 В – величину падения напряжения стабилитрона при прямом смещении.

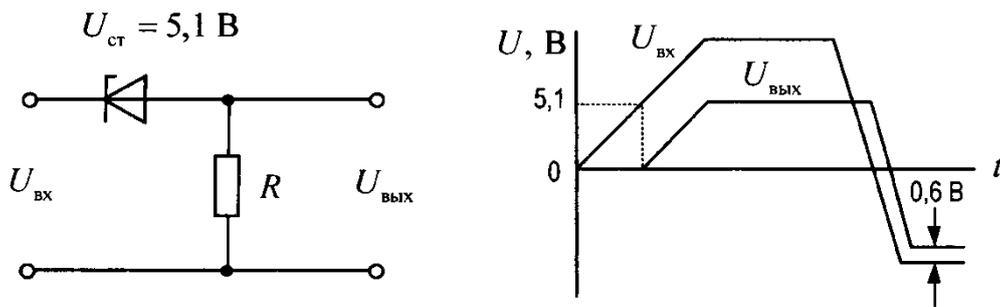


Рис. 33. Смещение уровня напряжения

Усилитель напряжения стабилизатора. С помощью стабилитронов можно повысить напряжение стабилизатора напряжения и получить разные уровни стабилизированного напряжения. Пример такой схемы показан на рис. 34. Здесь используются стабилитроны с напряжениями пробоя 3 В и 6 В, которые подключены последовательно друг за другом и понижают на 9 В опорное напряжение земли микросхемы стабилизатора с выходным напряжением 5 В, в результате чего на его выходе получается 14 В. В практических схемах могут потребоваться конденсаторы на входе и выходе.

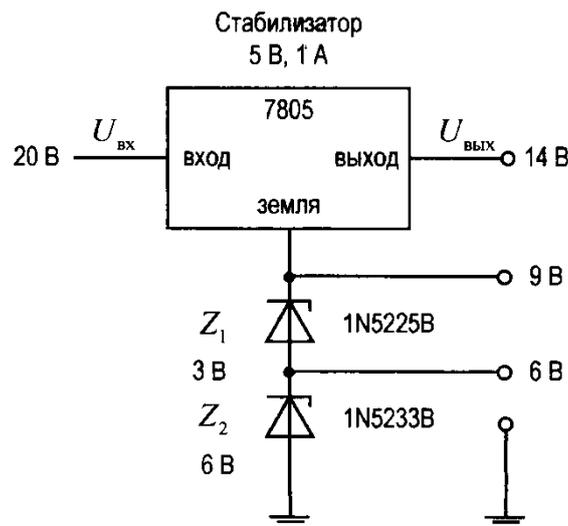


Рис. 34. Усилитель напряжения стабилизатора

Защита от перенапряжения. Если напряжение на разъёме на рис. 35 превышает определённое номинальное значение (например, вследствие использования неправильного сетевого адаптера), стабилитрон будет защищать устройство, пропуская ток через себя, пока не перегорит предохранитель. Напряжение пробоя стабилитрона должно быть немного выше максимального допустимого напряжения нагрузки. В зависимости от чувствительности нагрузки можно использовать или быстродействующий, или инерционный плавкий предохранитель. Номинальные ток и напряжение предохранителя должны соответствовать ожидаемым предельным значениям этих параметров для приложения. Подобную защиту от перенапряжения предоставляют также и другие решения, использующие специальные устройства, такие как подавители выбросов напряжения и

варисторы. Эти устройства недорого стоят и широко применяются в разработке решений в настоящее время.

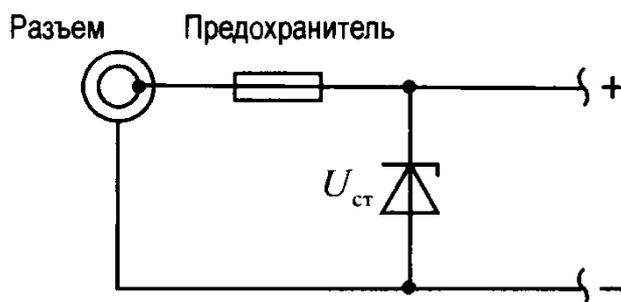


Рис. 35. Схема защиты от перенапряжений

Повышение номинальной мощности стабилизатора. На рис. 36 показана простая схема, которая повышает рабочую мощность (допустимую нагрузку по току) стабилизатора, предоставляя силовому транзистору выполнять основную работу с током. Сам стабилизатор принимает только небольшую часть полного тока, создавая напряжение и соответствующий ток на базе транзистора (с помощью резистора между землёй и базой транзистора). Этот ток управляет током коллектора в соответствии с изменениями в токе питания или нагрузки.

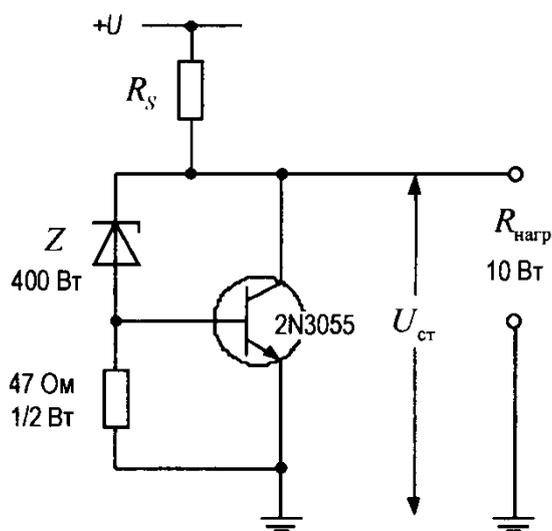


Рис. 36. Схема повышения рабочей мощности стабилизатора

Простой вольтметр на светодиодах. На рис. 37 показана простая схема вольтметра с использованием последовательности стабилизаторов с возрастающими напряжениями пробоя. По мере повышения измеряемого напряжения загораются соответствующие светодиоды. Вместо указанных на схеме можно использовать и другие стабилизаторы при условии, что последовательные резисторы ограничивают ток светодиодов до безопасного уровня. Большинство светодиодов лучше всего работают с током около 20 мА. Самый неблагоприятный сценарий по току будет для светодиода в ветви на 5 В, когда измеряемое напряжение $U_{вх} = 16$ В. Собрать более продвинутую схему вольтметра можно с

использованием аналого-цифрового преобразователя с микроконтроллером и жидкокристаллического или светодиодного дисплея.

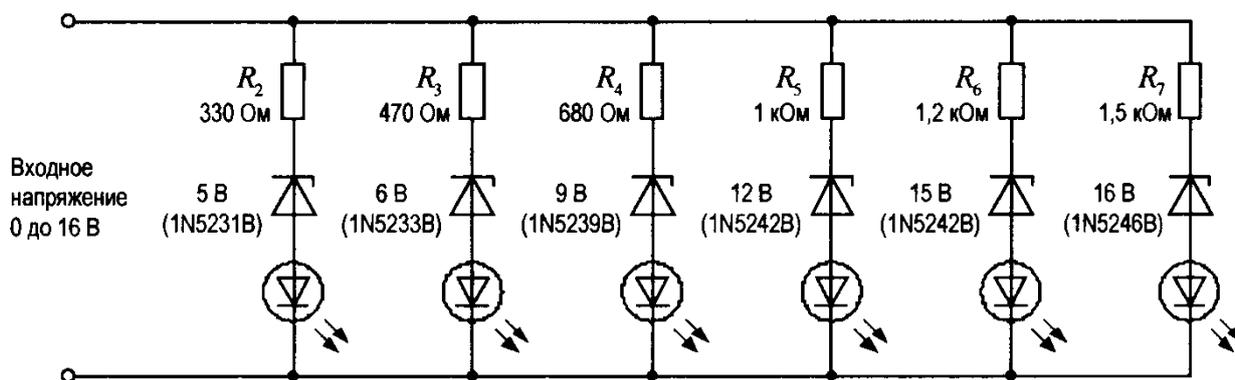


Рис. 37. Схема простого вольтметра на светодиодах

3.7. Варакторы (параметрические диоды)

Варактор, или параметрический диод (также называется варикапом), представляет собой диод, у которого ёмкость $p-n$ -перехода изменяется под воздействием приложенного электрического напряжения обратного смещения. Благодаря этому свойству такой диод функционирует как переменный конденсатор. Повышение напряжения обратного смещения вызывает увеличение ширины перехода диода, что повышает его ёмкость. Типичные варакторы имеют ёмкость в диапазоне от нескольких пикофард до 100 пФ и выше, а максимальное обратное напряжение в диапазоне от нескольких вольт до почти 100 В. Многие обычные диоды и стабилитроны можно использовать в качестве недорогих варакторов, но зависимость ёмкости перехода от прилагаемого обратного напряжения у этих диодов не всегда такая точная, как у настоящих варакторов.

Малая ёмкость варакторов обычно ограничивает их использование высокочастотными радиосхемами, в которых прилагаемое напряжение изменяет ёмкость схемы генератора колебаний. Обратное напряжение может подаваться через настроенный потенциометр, чтобы изменить частоту колебаний, или посредством модулирующего сигнала (например, аудиосигнала) для частотного модулирования несущей частоты генератора колебаний.

При разработке схем с использованием варакторов следует иметь в виду, что напряжение обратного смещения не должно содержать абсолютно никаких помех, поскольку любое колебание этого напряжения вызывает изменение ёмкости устройства. Таким образом, помехи в напряжении обратного смещения будут создавать нежелательные смещения частоты. Для минимизации таких помех используются фильтрующие конденсаторы.

Варакторы бывают одинарные и двойные. Двойной варактор – это комбинация двух одинарных во встречно-последовательной конфигурации с общим анодом и отдельными катодами. В такой конфигурации варакторы функционируют как последовательные конденсаторы, которые при варьирующемся напряжении на общем аноде изменяют свою ёмкость одновременно.

Применение варакторов. Два примера использования варакторов представлены далее.

Частотная модуляция. При частотной модуляции (ЧМ) мгновенное значение частоты несущего сигнала зависит от магнитуды прилагаемого модулирующего сигнала. Частота несущего сигнала обычно в диапазоне мегагерц, а модулирующего в диапазоне от нескольких герц до нескольких килогерц, т. е. в звуковом диапазоне. Одним из способов частотной модуляции является использование генератора колебаний, управляемого напряжением. Частота выходных колебаний такого генератора прямо пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала. То есть при увеличении амплитуды модулирующего сигнала частота несущей повышается и наоборот. В схеме устройства ЧМ-модуляции на рис. 38 вместо одного из регулирующих конденсаторов резонансного контура используется варактор. Модулирующее напряжение подаётся на варактор, в результате его ёмкость изменяется прямо пропорционально величине подаваемого напряжения. Это, в свою очередь, меняет частоту генератора колебаний, создавая на его выходе частотно-модулированный сигнал. Радиочастотный дроссель L_2 (РЧД) предотвращает попадание высокочастотного сигнала обратно в источник модулирующей частоты. Конденсаторы C_3 и C_4 обеспечивают связь по току. Остальные элементы являются составляющими генератора Колпитца (ёмкостный трёхточечный генератор).

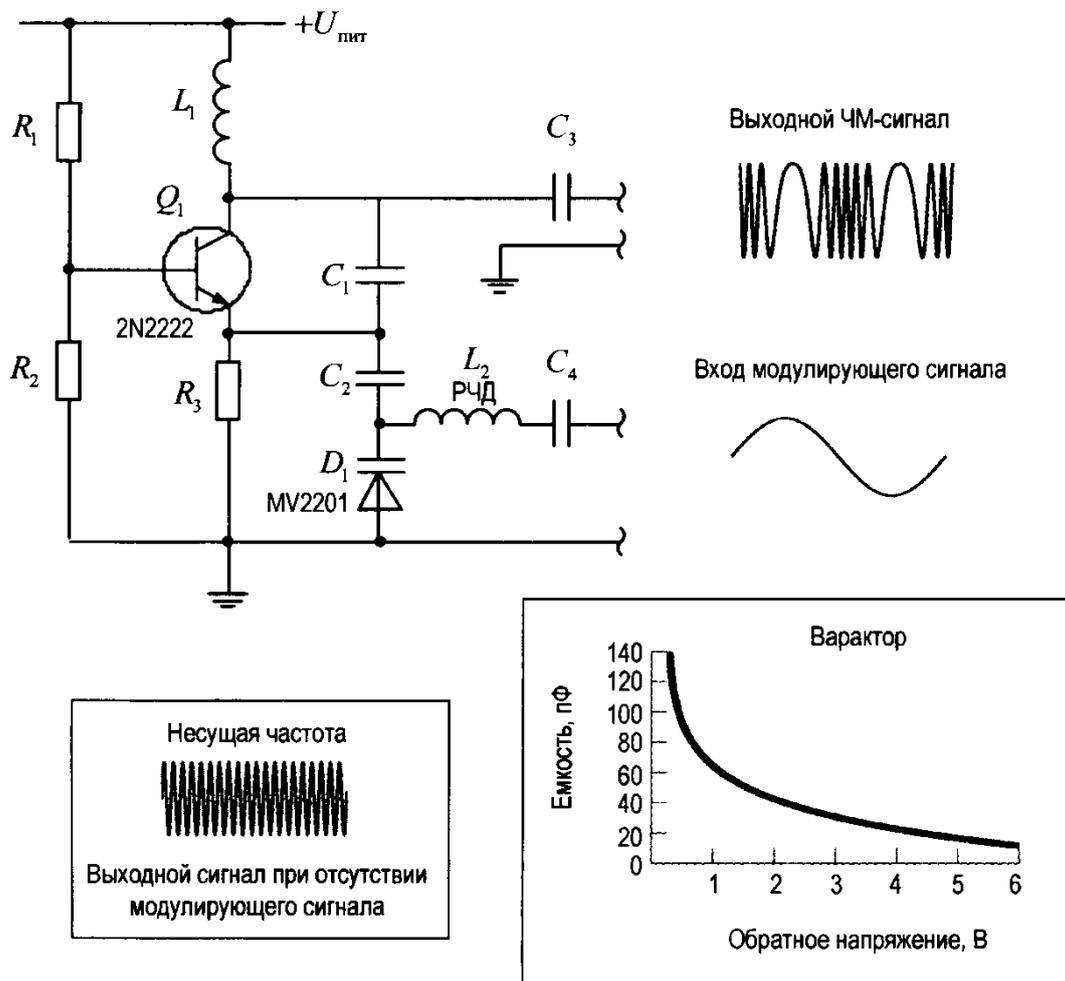


Рис. 38. Схема устройства частотной модуляции

Генератор колебаний, настраиваемый управляемым потенциометром варактором. В отличие от предыдущей, данная схема (рис. 39) функционирует просто как генератор с плавной перестройкой, выходная частота которого настраивается посредством потенциометра R_1 . Напряжение из среднего вывода этого потенциометра подаётся на двойной варактор D_1 . Чтобы обеспечить чистое напряжение смещения постоянного тока на варакторе, выход потенциометра подключается к нему через низкочастотный фильтр – конденсатор C_1 и резистор R_2 . Это изменяет действующую ёмкость резонансного контура, состоящего из двойного варактора D_1 и индуктора L_1 , в результате чего меняется выходная частота колебаний генератора. Конденсаторы C_2 и C_6 блокируют прохождение постоянного тока, пропуская при этом переменный. Полевой транзистор с n -каналом Q_1 подключён в конфигурации общего стока; через конденсатор C_3 на затвор транзистора подаётся сигнал обратной связи. Резистор R_3 играет роль резистора смещения затвора. Резистор R_4 служит для подачи напряжения на сток, а конденсатор C_5 играет роль фильтра.

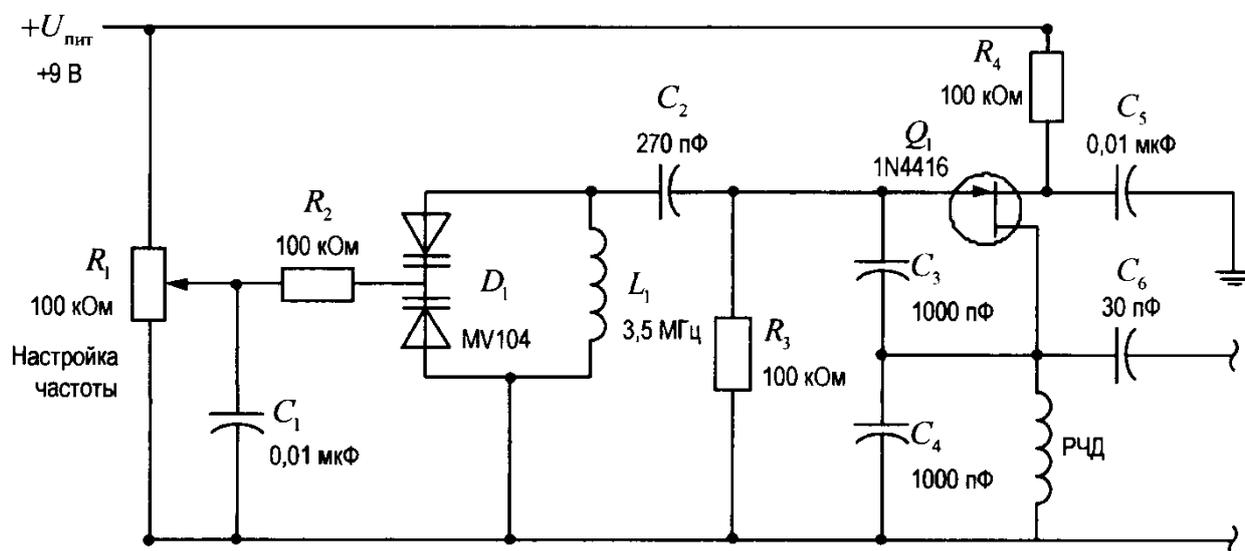


Рис. 39. Генератор колебаний, настраиваемый управляемым потенциометром варактором

3.8. PIN-диоды

PIN-диод представляет собой устройство с двумя сильно легированными областями n^+ и p^+ , между которыми находится активная базовая i -область с высоким удельным сопротивлением. Создаваемый таким образом переход называется *PIN*-переходом. *PIN*-диоды используются в радиочастотных приложениях и для коммутации микроволновых сигналов. С высокочастотными сигналами *PIN*-диоды функционируют подобно переменному резистору, чьё значение сопротивления управляется прилагаемым постоянным током прямого смещения в обратном пропорциональной зависимости. Во многих случаях при высоком токе смещения сопротивление диода составляет меньше 1 Ом. Но при незначительном токе прямого смещения сопротивление высокочастотным сигналам составляет несколько килоом.

PIN-диоды в основном используются в приложениях коммутирования высокочастотных и микроволновых сигналов, в том числе сигналов большой мощности. Одно из распространённых применений – переключатель приёма-передачи на частотах от 100 МГц и выше. *PIN*-диоды также используются в качестве фотодатчиков в волоконно-оптических системах. Такие диоды используются в профессиональных областях электротехники или физики и в компаниях, изготавливающих высокотехнологичные продукты. Для общего представления рассмотрим два примера использования этих диодов в приложении коммутирования радиочастотных сигналов.

Коммутирование радиочастотных сигналов с помощью *PIN*-диодов.

Задача коммутирования радиочастотных сигналов сопряжена со значительными трудностями и требует специальных методов проектирования, чтобы свести к минимуму ухудшение качества сигнала. На рис. 40 показаны две схемы для коммутирования радиочастотных сигналов с использованием *PIN*-диодов. В схеме однополюсного однопозиционного переключателя (рис. 40, а) прохождение сигнала генератора радиочастотных колебаний (U_G) на нагрузку разрешается или блокируется путём подачи напряжения смещения на *PIN*-диод. Радиочастотный дроссель (РЧД) предотвращает попадание радиочастотного сигнала в источник напряжения смещения, а шунтирующий на землю конденсатор фильтрует напряжение смещения. Однополюсный двухпозиционный переключатель (рис. 40, б) работает подобным образом, но с использованием двух входов смещения.

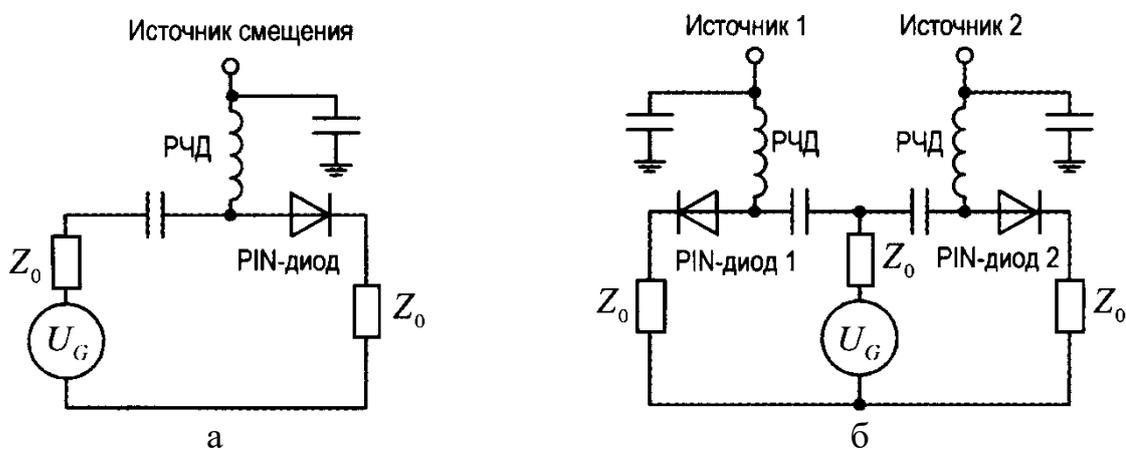


Рис. 40. Коммутирование радиочастотных сигналов с помощью *PIN*-диодов:
 а) однополюсный однопозиционный переключатель;
 б) однополюсный двухпозиционный переключатель

3.9. Микроволновые диоды

Существует несколько других типов диодов, которые используются для высокоспециализированных приложений в высокочастотной области спектра (более 20 ГГц – микроволновые и миллиметровые волны), часто в микроволновых усилителях и генераторах колебаний. Большинство обычных диодов и транзисторов не способны работать с такими высокими частотами вследствие сравнительно медленной диффузии (миграции) носителей зарядов через

полупроводниковый переход. В случае туннельных диодов, диодов Ганна, лавинно-пролётных диодов (ЛПД) и других специализированных диодов эффекты, вызывающие полезные изменения свойств устройства, например коэффициента усиления усилителя или резонансной частоты генератора колебаний, основаны на совершенно иных физических механизмах, которые позволяют выполнять изменения практически со скоростью света. Такими физическими механизмами может быть туннелирование электронов через электростатический барьер, отделяющий область p -типа от области n -типа, вместо термоэлектронной эмиссии через барьер, как происходит в обычных диодах. Устройства с использованием такого физического механизма называются соответственно туннельными диодами. В других устройствах таким механизмом является отрицательное сопротивление при прямом смещении вследствие возрастания эффективной массы (замедления) электронов, вызываемой сложной симметрией зоны проводимости. Такие устройства называются диодами Ганна. Или же это может быть отрицательное сопротивление, принуждающее электроны переходить на более высокие, менее мобильные зоны, вследствие чего снижается ток прямого смещения. Такие устройства называются лавинно-пролётными диодами. Заниматься этими сложными высокочастотными вопросами лучше предоставить специалистам. Инжекционно-пролётные и лавинно-ключевые диоды также используются в микроволновых приложениях.

4. ТРАНЗИСТОРЫ

Транзисторы – это полупроводниковые устройства, функционирующие как управляемые электричеством переключатели или усилители [5]. Главное достоинство транзисторов заключается в их способности управлять протеканием тока подобно тому, как кран управляет потоком воды. В кране поток воды управляется вращением его рукоятки. А транзистор управляет большим током, протекающим через два его вывода, с помощью намного меньшего тока или напряжения, прилагаемого к его третьему выводу.

В настоящее время транзисторы используются в электронных схемах практически всех типов. Например, транзисторы можно обнаружить в схемах коммутирования, усилителей, генераторов колебаний, источников тока, стабилизаторов напряжения, источников питания, в микросхемах цифровой логики и вообще почти в любой схеме, в которой используются малые сигналы для управления большими токами.

Существует большое разнообразие исполнений транзисторов, обладающих уникальными характеристиками управления и протекания тока. Большинство транзисторов позволяют изменять управляемые токи, но у некоторых такая возможность отсутствует. При отсутствии напряжения на базе или затворе одни транзисторы нормально выключены, тогда как другие нормально включены. В данном случае выражение «нормально выключен или включен» для транзистора аналогично выражению «нормально разомкнутые или замкнутые» для контактов реле, т. е. состоянию при отсутствии управляющего напряжения. Также транзистор во включённом состоянии может проводить ток изменяющейся величины.

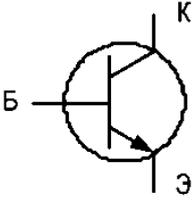
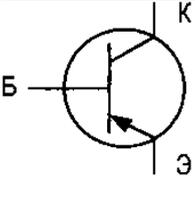
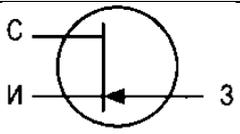
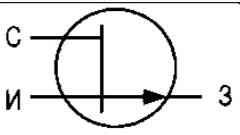
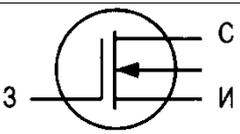
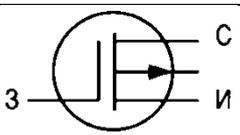
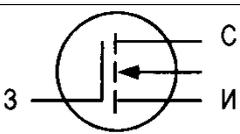
Для управления одних транзисторов необходимо подавать на их управляющий вывод как небольшой ток, так и небольшое напряжение, тогда как для других требуется только напряжение. Подобным образом для управления одних транзисторов на базе должно быть отрицательное напряжение (относительно одного из двух других выводов) и/или исходящий ток, а для управления другими на базе должно быть положительное напряжение и/или входящий ток.

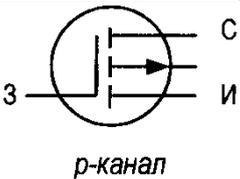
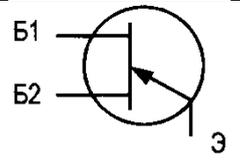
Транзисторы разбиваются на две главные категории – биполярные и полевые транзисторы. Основная разница между транзисторами этих типов состоит в том, что для биполярных транзисторов необходимо наличие входящего (или исходящего) тока смещения на выводах управления, тогда как для полевых транзисторов требуется только напряжение и практически никакого тока. В физическом аспекте для работы биполярных транзисторов требуются носители как положительного (дырки), так и отрицательного (электроны) заряда, тогда как для полевых транзисторов достаточно носителей только одного типа. Поскольку полевые транзисторы почти не потребляют тока, у них очень высокий входной импеданс, порядка 10^{14} Ом. Высокий входной импеданс означает, что управляющий вывод полевого транзистора не оказывает существенного влияния на динамику тока схемы, которая управляет полевым транзистором. Управляющий вывод биполярных транзисторов может потреблять небольшой ток из схемы управления, который затем совмещается с основным током транзистора, протекающим через два его других вывода, изменяя таким образом динамику схемы управления.

В настоящее время полевые транзисторы пользуются бóльшей популярностью у разработчиков схем, чем биполярные транзисторы. Кроме того, что управляющий вывод практически не потребляет тока, их легче производить, они более дешёвые (требуют меньше кремния), а также их можно изготавливать очень малых размеров, что делает их полезными в производстве интегральных схем. Одним из недостатков полевых транзисторов является то, что они плохо подходят для работы в усилителях, поскольку крутизна их характеристики прямой передачи намного ниже, чем соответствующий параметр биполярных транзисторов с таким же током. Это означает, что усиление по напряжению будет меньшим. Поэтому полевые транзисторы редко используются для простых схем усиления, за исключением случаев, когда требуются очень высокий входной импеданс и малые входные токи.

В табл. 3 приведены краткие характеристики некоторых распространённых транзисторов. Используемое в этой таблице выражение «нормально» подразумевает условия, когда управляющий вывод (например, база или затвор) закорочен (т. е. имеет такой же потенциал) с одним из выводов канала тока (например, эмиттер или исток). Выражения «включен» и «выключен» в этой таблице не следует понимать буквально. Сила протекающего через устройство тока обычно является переменной величиной, задаваемой величиной управляющего напряжения.

Таблица 3 – Краткий обзор распространённых транзисторов

Тип транзистора	Символ	Режим работы
Биполярный	 <p><i>n-p-n</i></p>	Нормально выключенный, но небольшой входной ток и небольшое положительное напряжение на базе (Б) относительно эмиттера (Э) переводит транзистор во включённое состояние (позволяет протекать большому току транзистора). Нормальный режим работы при $U_K > U_Э$. Применяется в приложениях коммутирования и усиления
	 <p><i>p-n-p</i></p>	Нормально выключенный, но небольшой выходной ток и небольшое отрицательное напряжение на базе (Б) относительно эмиттера (Э) переводит транзистор во включённое состояние (позволяет протекать большому току через транзистор). Нормальный режим работы при $U_Э > U_K$. Применяется в приложениях коммутирования и усиления
Полевой транзистор с <i>p-n</i> -переходом	 <p><i>n-канал</i></p>	Нормально включённый, но небольшое отрицательное напряжение на затворе (З) относительно истока (И) выключает его (прекращает протекание сильного тока от стока к истоку). Нормальный режим работы при $U_C > U_И$. Ток затвора не требуется. Применяется в приложениях коммутирования и усиления
	 <p><i>p-канал</i></p>	Нормально включённый, но небольшое положительное напряжение на затворе (З) относительно истока (И) выключает его (прекращает протекание сильного тока от истока к стоку). Нормальный режим работы при $U_И > U_C$. Ток затвора не требуется. Применяется в приложениях коммутирования и усиления
Полевой транзистор со структурой «металл-оксид-полупроводник» – МОП-транзистор (обеднённый канал)	 <p><i>n-канал</i></p>	Нормально включённый, но небольшое отрицательное напряжение на затворе (З) относительно истока (И) выключает его (прекращает протекание сильного тока от стока к истоку). Нормальный режим работы при $U_C > U_И$. Ток затвора не требуется. Применяется в приложениях коммутирования и усиления
	 <p><i>p-канал</i></p>	Нормально включённый, но небольшое положительное напряжение на затворе (З) относительно истока (И) выключает его (прекращает протекание сильного тока от истока к стоку). Нормальный режим работы при $U_И > U_C$. Ток затвора не требуется. Применяется в приложениях коммутирования и усиления
Полевой транзистор со структурой «металл-оксид-полупроводник» – МОП-транзистор (обогащённый канал)	 <p><i>n-канал</i></p>	Нормально выключенный, но небольшое положительное напряжение на затворе (З) относительно истока (И) включает его (разрешает протекание сильного тока от стока к истоку). Нормальный режим работы при $U_C > U_И$. Ток затвора не требуется. Применяется в приложениях коммутирования и усиления

Тип транзистора	Символ	Режим работы
		<p>Нормально выключенный, но небольшое отрицательное напряжение на затворе (З) относительно истока (С) включает его (разрешает протекание сильного тока от истока к стоку). Нормальный режим работы при $U_{И} > U_{С}$. Ток затвора не требуется. Применяется в приложениях коммутирования и усиления</p>
Однопереходный полевой транзистор с <i>n</i> -базой (УПТ)		<p>Нормально очень слабый ток протекает между базой 2 (Б2) и базой 1 (Б1), но положительное напряжение на эмиттере (Э) относительно Б1 или Б2 повышает силу протекающего тока. Нормальный режим работы при $U_{Б2} > U_{Б1}$. Ток эмиттера не требуется. Функционирует только как переключатель</p>

4.1. Биполярные транзисторы

Биполярные транзисторы – это трёхвыводные полупроводниковые устройства, функционирующие как управляемые электричеством переключатели или усилители. Существует два типа биполярных транзисторов – с *n-p-n*- и с *p-n-p*-структурами (рис. 41).

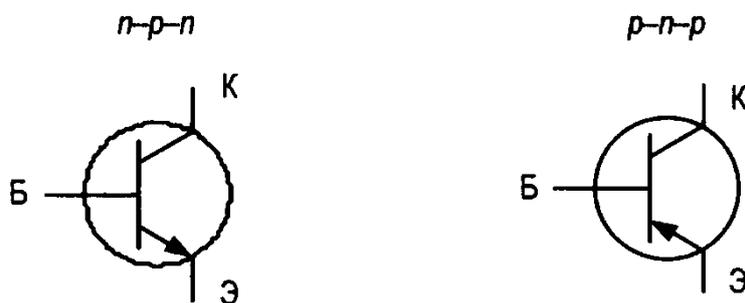


Рис. 41. Два типа биполярных транзисторов

В биполярных транзисторах *n-p-n*-типа небольшой входящий ток и положительное напряжение на базе (относительно эмиттера) позволяют управлять намного большим током транзистора. Аналогично в биполярных транзисторах *p-n-p*-типа небольшой исходящий ток и небольшое отрицательное напряжение на базе (относительно эмиттера) позволяет управлять намного большим током транзистора.

Биполярные транзисторы – очень полезные устройства. Их свойство управления большим током посредством малого тока делает эти устройства ключевыми элементами управляемых электричеством схем коммутирования, стабилизации тока и напряжения, усилителей, генераторов колебаний и памяти.

Принцип работы биполярных транзисторов. Рассмотрим простую модель работы биполярного транзистора *n-p-n*-типа (рис. 42). Биполярные транзисторы *p-n-p*-типа работают точно так же, с той разницей, что все составляющие, полярности и токи обратные.

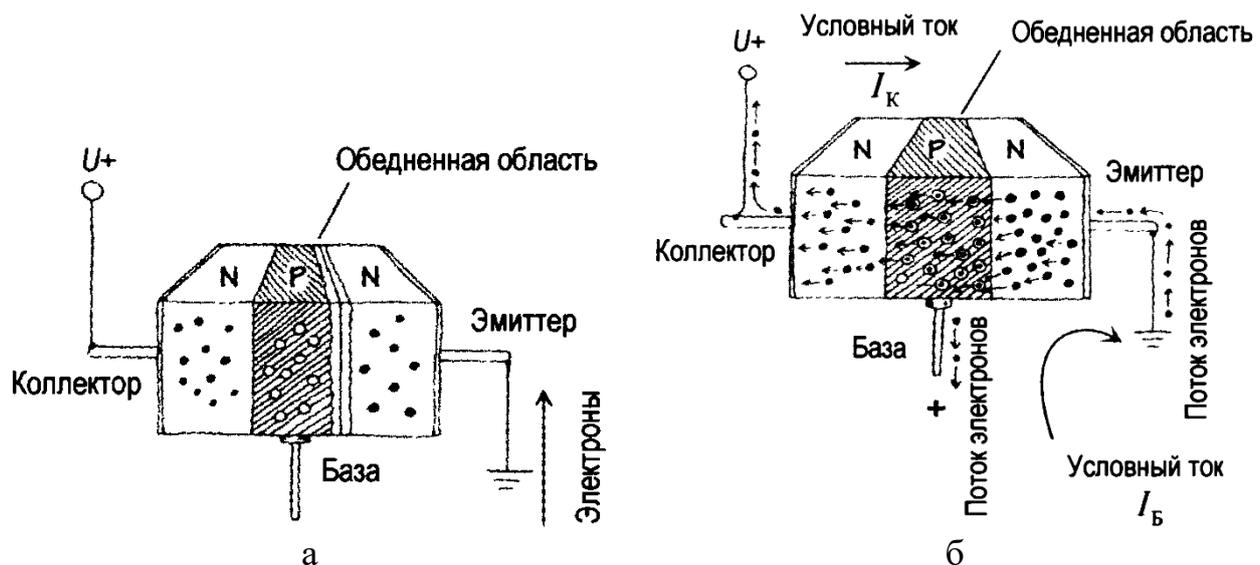


Рис. 42. Транзистор: а) в выключенном состоянии; б) во включённом состоянии, где I_K , I_B – ток коллектора и ток базы соответственно

Биполярный транзистор *n-p-n*-типа состоит из тонкой области полупроводника *p*-типа, заключённой между двумя областями полупроводника *n*-типа. Когда на базе транзистора отсутствует напряжение, *p-n*-переход не позволяет электронам в области эмиттера переходить в область коллектора. Для того чтобы электроны могли переходить через *p-n*-переход, необходимо приложить напряжение смещения с целью придать электронам достаточно энергии, чтобы они могли преодолеть атомные силы, удерживающие их в области *n*-типа. Приложение отрицательного напряжения на базу только усугубляет положение – *p-n*-переход между базой и эмиттером становится обратносмещённым, в результате создаётся обеднённая область, предотвращающая протекание тока.

Когда на базу биполярного транзистора *n-p-n*-типа подаётся положительное напряжение (минимум 0,6 В), *p-n*-переход между базой и эмиттером становится прямосмещённым, вследствие чего свободные электроны притягиваются к базе. Некоторые из этих электронов переходят на базу, но поскольку область базы *p*-типа тонкая, лавина покидающих эмиттер электронов приближается достаточно близко к области коллектора и переходит в неё. Повышение напряжения на базе усиливает этот эффект перехода, увеличивая соответственно поток электронов между эмиттером и коллектором. Обычно принято, что направление условного тока противоположно потоку электронов. Таким образом, в терминах условного тока, прилагаемые к базе входной ток и положительное напряжение вызывают «положительный ток» между коллектором и эмиттером.

На рис. 43 показаны типичные характеристические кривые для биполярного транзистора. Они описывают влияние тока базы I_B и напряжения между эмиттером и коллектором на токи эмиттера I_E и коллектора I_K .

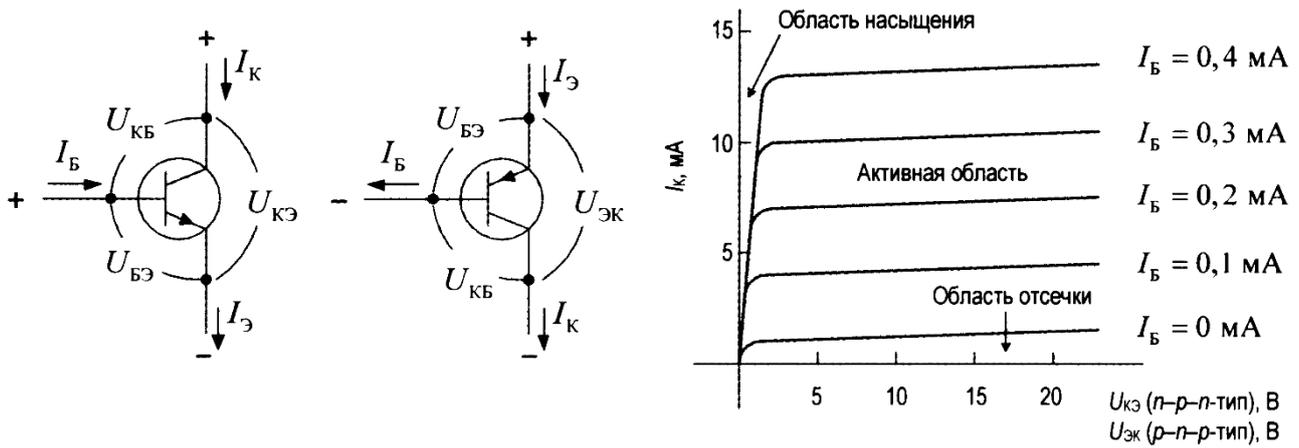


Рис. 43. Принцип работы биполярных транзисторов и характеристические кривые зависимости тока коллектора и эмиттера от тока базы

Для описания работы транзистора применяются такие термины, как область насыщения, область отсечки, активный режим, активная область, смещение и рабочая точка (Q -точка, *quiescent point*). Область насыщения означает рабочую область транзистора, в которой протекает максимальный ток коллектора, и транзистор между коллектором и эмиттером функционирует подобно замкнутому переключателю. Область отсечки означает область работы транзистора возле оси напряжения характеристической кривой коллектора, в которой транзистор функционирует как разомкнутый переключатель; в этом режиме работы между коллектором и эмиттером протекает только очень незначительный ток утечки. Активный режим/активная область описывают работу транзистора в области слева от области насыщения и выше области отсечки, где существует почти линейное отношение между токами выводов транзистора (I_B , I_K , $I_Э$). Смещение означает конкретные напряжения постоянного тока и ток на выводах транзистора, требуемое для установления нужной точки активного режима работы, называемого рабочей точкой или Q -точкой.

Для транзисторов $n-p-n$ -типа напряжение на коллекторе U_K должно быть больше, чем напряжение на эмиттере $U_Э$ как минимум на несколько десятых вольта; в противном случае ток не будет протекать через транзистор независимо от величины подаваемого на базу напряжения. Аналогично для транзисторов $p-n-p$ -типа напряжение на эмиттере должно быть на столько же выше напряжения на коллекторе.

В транзисторах $n-p-n$ -типа между базой и эмиттером происходит падение напряжения величиной 0,6 В. А в транзисторах $p-n-p$ -типа между базой и эмиттером – повышение напряжения величиной 0,6 В. Для работы транзистора это означает, что напряжение на базе U_B транзисторов $n-p-n$ -типа должно быть выше напряжения на эмиттере $U_Э$ по крайней мере на 0,6 В; в противном случае транзистор не будет проводить ток между коллектором и эмиттером. А напряжение на базе U_B транзисторов $p-n-p$ -типа должно быть ниже напряжения на эмиттере $U_Э$ по крайней мере на 0,6 В.

Работа биполярного транзистора (в активной области) описывается следующей фундаментальной формулой:

$$I_K = h_{fЭ} I_B = \beta I_B,$$

где I_B – ток базы; I_K – ток коллектора; $h_{fЭ}$ (или β) – коэффициент усиления по току для схем с общим эмиттером. Последняя величина уникальна для каждого отдельного транзистора. Коэффициент усиления $h_{fЭ}$ транзистора часто считается постоянным, обычно в диапазоне от 10 до 500, но может немного варьироваться в зависимости от температуры и напряжения между коллектором и эмиттером. Коэффициент усиления транзистора по току предоставляется производителями транзисторов в справочных листках на изделие. Информацию, представляемую формулой коэффициента усиления по току, можно вкратце описать следующим образом: если взять биполярный транзистор с коэффициентом усиления по току $h_{fЭ} = 100$ и подавать на его базу (для транзисторов $n-p-n$ -типа) или брать из базы (для транзисторов $p-n-p$ -типа) ток величиной 1 мА, то в коллекторе будет протекать ток в 100 раз больше, т. е. 100 мА. Формула усиления по току применима, только когда транзистор находится в пределах активной области. Через транзистор может протекать ток определённой предельной силы, а на его выводы подаваться напряжение только определённой конечной величины.

Если к токам транзистора применить закон сохранения тока (рис. 44), то получим следующее полезное выражение, связывающее токи эмиттера, коллектора и базы: $I_Э = I_K + I_B$.

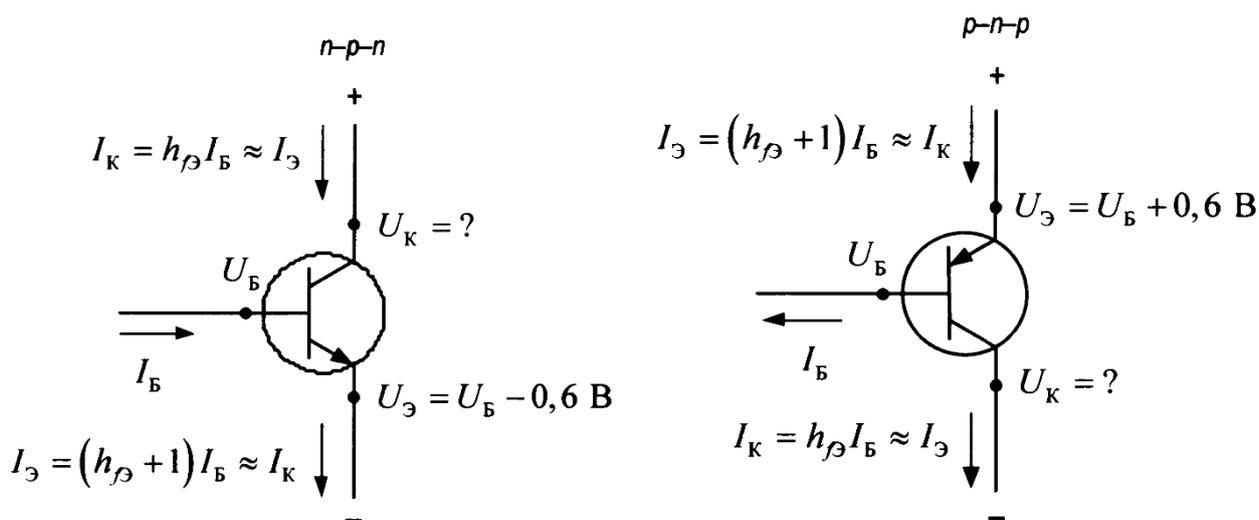


Рис. 44. Токи транзистора и их взаимоотношение

Подставив в это уравнение формулу усиления по току, получим уравнение, связывающее токи эмиттера и базы:

$$I_Э = (h_{fЭ} + 1) I_B.$$

Это уравнение почти идентично уравнению усиления по току ($I_K = h_{fЭ} I_B$) за исключением слагаемого «+1». На практике этот коэффициент не имеет существенного значения при условии большого коэффициента усиления $h_{fЭ}$ (каковым он почти всегда является). Это означает, что можно сделать следующее приближение: $I_Э \approx I_K$.

В итоге

$$U_{БЭ} = U_B - U_Э = +0,6 \text{ В } (n-p-n);$$

$$U_{БЭ} = U_B - U_Э = -0,6 \text{ В } (p-n-p).$$

Взаимосвязь всех токов и напряжений транзистора иллюстрируется на рис. 44. На рисунке напряжение коллектора обозначено знаком вопроса. Это связано с тем, что значение напряжения коллектора U_K нельзя определить, используя только что выведенные формулы, поскольку оно зависит от подключённой к коллектору цепи. Например, чтобы определить значение напряжения на коллекторе в схеме на рис. 45, сначала необходимо определить падение напряжения на подключённом к нему резисторе. Только после этого, применив закон Ома, можно вычислить напряжение на коллекторе U_K .

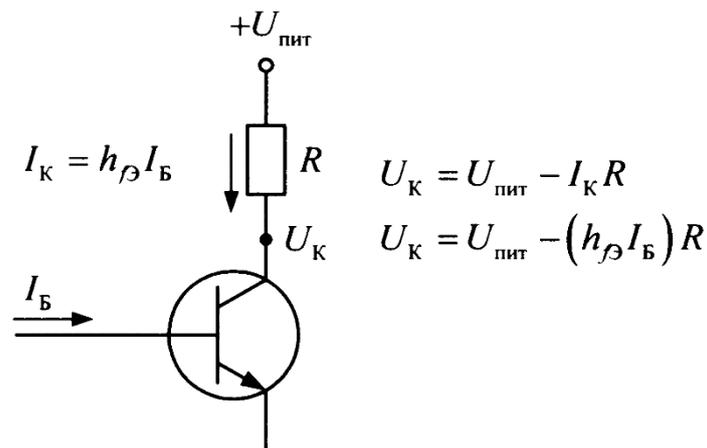


Рис. 45. Определение напряжения на коллекторе транзистора

Важно заметить, что все эти уравнения предполагают идеальный транзистор и могут дать искажённые результаты в реальности. Например, они могут дать неправильный результат, когда токи и напряжения находятся вне пределов, представляемых характеристическими кривыми. Поэтому если применять эти уравнения без учёта эксплуатационных характеристик, то можно получить физически невозможные и неадекватные результаты.

Ещё одно замечание по теории биполярных транзисторов относится к так называемому переходному сопротивлению $r_{пс}$. Переходное сопротивление представляет собой небольшое сопротивление, которое присуще эмиттерному переходу транзистора, и определяется температурой и током эмиттера. Переходное сопротивление можно приблизительно вычислить с помощью следующей формулы:

$$r_{пс} = \varphi_T / I_{\text{Э}},$$

где $\varphi_T = kT/e$ – тепловой (температурный) потенциал; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. При нормальной температуре ($T = 300$ К) $\varphi_T \approx 0,026$ В.

Во многих случаях переходное сопротивление очень мало (значительно меньше 1 кОм) и не оказывает значительного влияния на общую работу схемы. Но в некоторых типах схем обращение с переходным сопротивлением как с незначительным параметром не получится. Более того, оно может быть основным фактором, определяющим общее поведение схемы.

Водяная аналогия биполярного транзистора. Подобно другим электронным компонентам работу транзистора можно объяснить с помощью водяной

аналогии. На рис. 46 приведена водяная аналогия для транзисторов $n-p-n$ - и $p-n-p$ -типов.

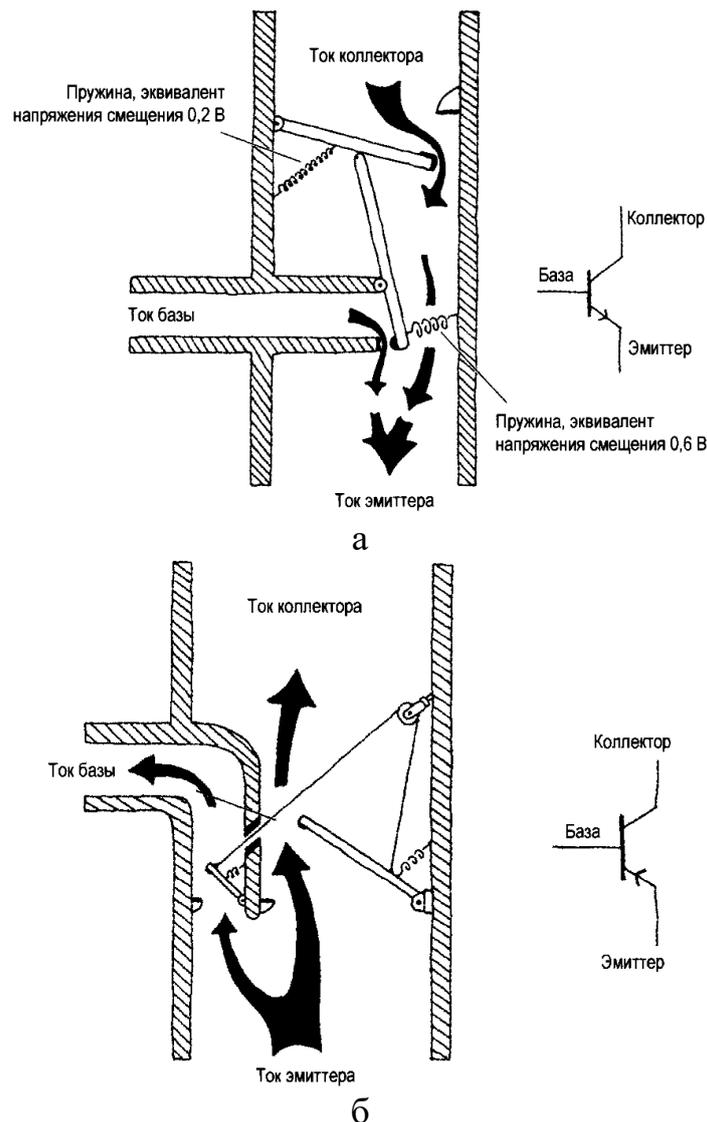


Рис. 46. Водяная аналогия транзисторов: а) $n-p-n$ -типа; б) $p-n-p$ -типа

База водяного «транзистора» $n-p-n$ -типа изображена в виде тонкой трубки, входящей в основное устройство с левой стороны. Коллектор представлен верхней частью вертикальной трубы, а эмиттер – нижней. Когда в трубке «базы» нет давления и по ней не протекает вода (аналогично разомкнутой цепи базы транзистора $n-p-n$ -типа), нижнее плечо заслонки на базе находится в вертикальном положении, вследствие чего её верхнее плечо удерживает закрытой основную заслонку вверх. Это состояние водяного «транзистора» аналогично выключенному состоянию настоящего биполярного транзистора $n-p-n$ -типа. Когда через базу водяного «транзистора» подаётся вода под небольшим давлением, она нажимает на нижнее плечо вертикальной заслонки, в результате чего оно проворачивается против часовой стрелки. Затем верхнее плечо вертикальной заслонки также проворачивается против часовой стрелки, позволяя открыться основной заслонке прямо пропорционально величине перемещения верхнего рычага вертикальной заслонки. В этом состоянии вода может перемещаться из

«коллектора» в «эмиттер» при условии, что она под достаточным давлением, чтобы преодолеть пружину, удерживающую закрытой горизонтальную заслонку. Эта пружина представляет напряжение, которое должно быть на коллекторе относительно эмиттера, чтобы позволить протекание тока между коллектором и эмиттером. В этой аналогии небольшой поток воды базы объединяется с током коллектора.

Основной особенностью водяной аналогии транзистора *p-n-p*-типа является наличие пониженного давления на «базе», способствующего переводу «транзистора» во включённое состояние. Вода, протекающая через «базу», открывает заслонку, что в свою очередь открывает основную заслонку между «эмиттером» и «коллектором». Степень открытия основной заслонки определяется величиной открытия управляющей заслонки, которая, в свою очередь, определяется объёмом протекающей через «базу» воды. Обратите внимание на пружины смещения.

Основные операции, выполняемые транзисторами

Транзисторный переключатель. В схеме на рис. 47, а транзистор *n-p-n*-типа используется для управления протеканием тока через лампочку освещения. Когда механический переключатель переводится в положение «Вкл», на транзистор подаётся напряжение смещения, открывающее канал между коллектором и эмиттером, вследствие чего ток может протекать от $U_{пит}$ через лампочку на землю. Входящий в базу ток определяется по следующей формуле:

$$I_B = \frac{U_{\text{э}} + 0,6}{R_1} = \frac{0 + 0,6}{R_1}.$$

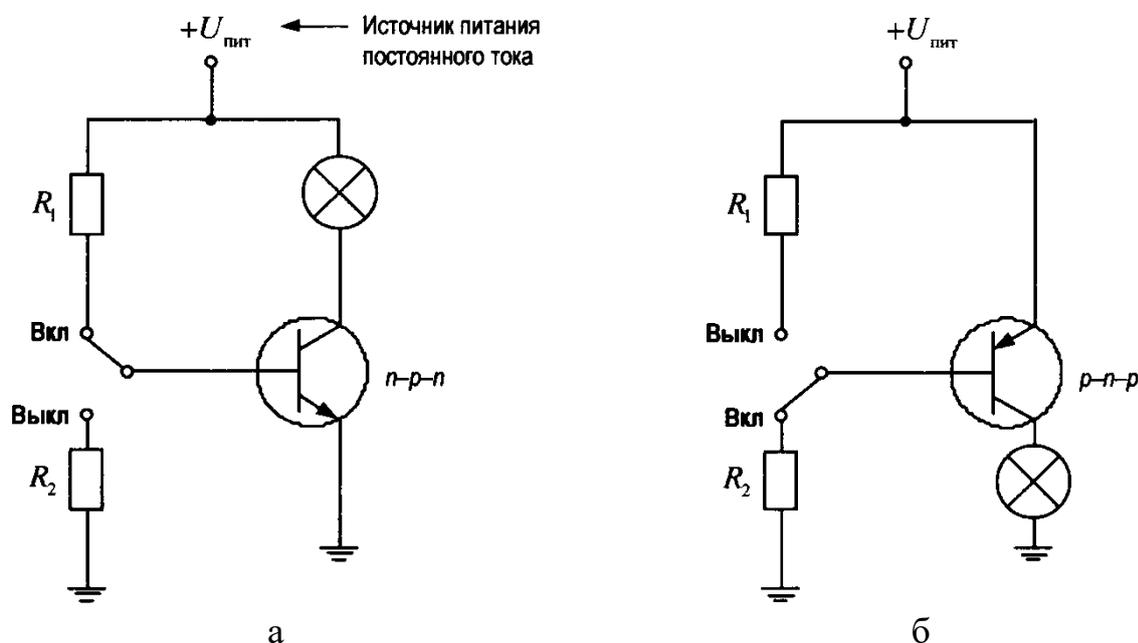


Рис. 47. Транзисторный переключатель: а) на транзисторе *n-p-n*-типа; б) на транзисторе *p-n-p*-типа

Ток коллектора можно определить с помощью формулы усиления по току ($I_K = h_{FE} I_B$) при условии не слишком большого падения напряжения на лампочке

(оно не должно вызвать падение напряжения на коллекторе U_K ниже $0,6 \text{ В} + U_{Э}$). Когда переключатель переводится в положение «Выкл», база замыкается на землю и транзистор выключается, прерывая подачу тока на лампочку. Резистор R_2 должен иметь высокое сопротивление (например, 10 кОм), чтобы свести к минимуму ток на землю.

При использовании переключателя на транзисторе $p-n-p$ -типа всё инвертировано; чтобы разрешить протекание тока коллектора, ток должен вытекать из базы.

Источник тока. В схеме на рис. 48 транзистор $n-p-n$ -типа используется для создания простого источника тока. Прилагая небольшие входные напряжение и ток на базу транзистора, можно управлять намного бóльшим током коллектора (нагрузки). Ток коллектора/нагрузки зависит от напряжения на базе следующим образом:

$$I_K = I_{\text{нагр}} \frac{U_B - 0,6}{R_Э}$$

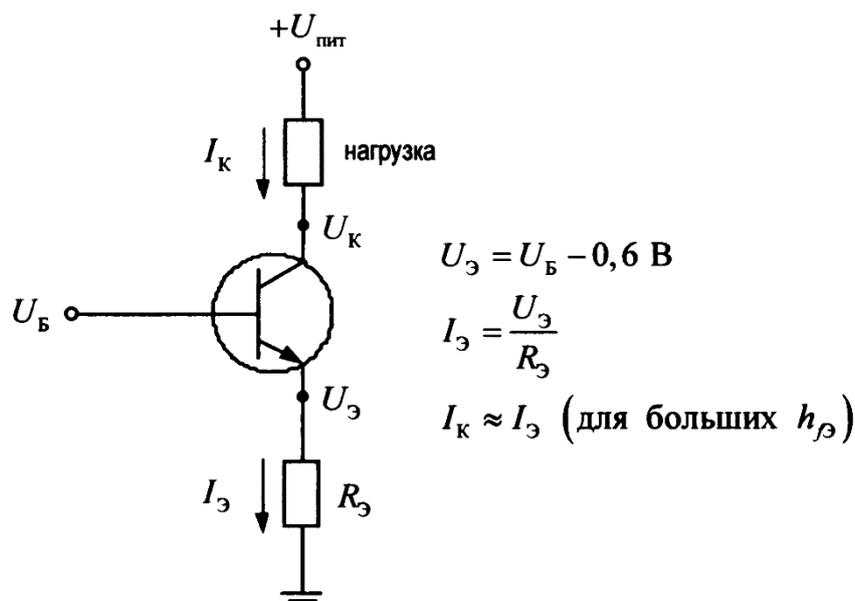


Рис. 48. Источник тока

Способы токового смещения. На рис. 49 отражены два распространённых метода для реализации смещения тока источника – делитель напряжения (слева) и стабилитрон (справа). В схеме слева напряжение на базе устанавливается резисторами R_1 и R_2 и равно:

$$U_B = U_{\text{пит}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

А в схеме с использованием стабилитрона напряжение на базе устанавливается напряжением пробоя стабилитрона: $U_B = U_{\text{проб}}$.

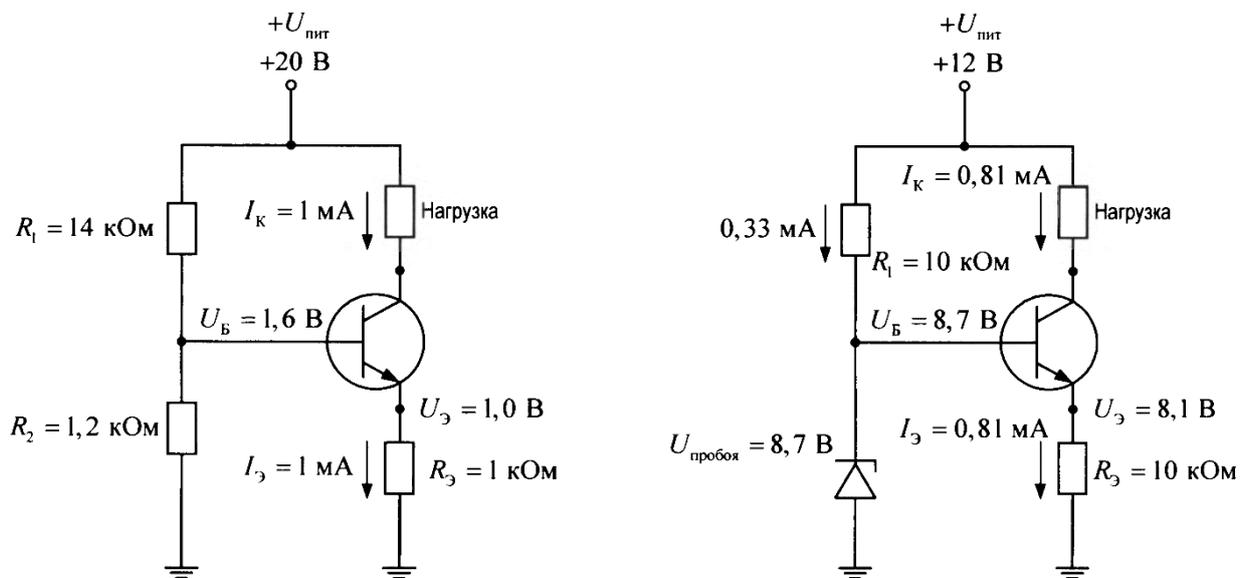


Рис. 49. Способы токового смещения

Эмиттерный повторитель. Схема на рис. 50, а называется эмиттерным повторителем. В этой схеме выходное напряжение (снимаемое с эмиттера) представляет почти зеркальную копию входящего напряжения (выход «повторяет» вход), за исключением падения выходного напряжения величиной 0,6 В относительно входного (вследствие падения напряжения на *p-n*-переходе «база-эмиттер»). Также, когда $U_B < 0,6$ В (в течение отрицательных полупериодов), транзистор выключается (*p-n*-переход становится обратносмещенным). В результате этого выходное напряжение получается обрезанным (см. график на рис. 50, б). Может показаться, что схема эмиттерного повторителя бесполезна, поскольку она не даёт усиления по напряжению. Но если посмотреть на схему более внимательно, можно увидеть, что её входной импеданс намного больший, чем выходной, или, точнее, её выходной ток $I_Э$ намного больше входного тока I_B . Иными словами, схема эмиттерного повторителя даёт усиление по току, что также важно для приложений, как и усиление по напряжению. Это означает, что для питания нагрузки источник сигнала может быть менее мощным, чем требовалось бы, если бы нагрузка запитывалась непосредственно от источника. Преобразуя уравнение усиления транзистора и используя закон Ома, получаем формулы для вычисления входного и выходного сопротивлений:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} \approx h_{fЭ} R_Э;$$

$$R_{\text{вых}} = R_Э \parallel \frac{R_{\text{ист}}}{h_{fЭ}} \approx \frac{R_{\text{ист}}}{h_{fЭ}};$$

$$k_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx 1,$$

где k_U – коэффициент усиления по напряжению.

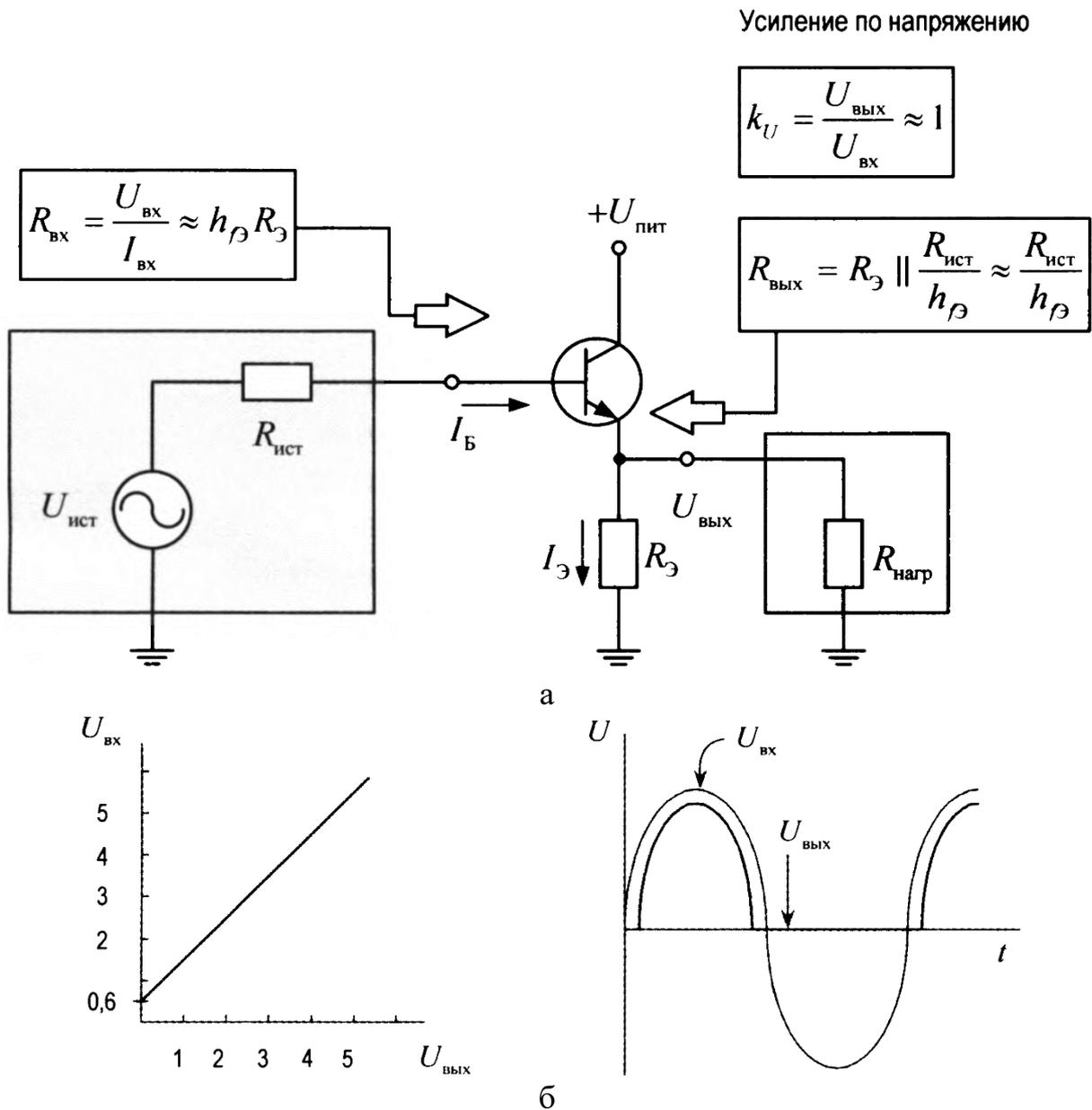


Рис. 50. Эмиттерный повторитель и рабочие зависимости

Эмиттерный повторитель (усилитель с общим коллектором). Схема на рис. 51 называется усилителем с общим коллектором, который даёт усиление по току, но не по напряжению. Данная схема основана на схеме эмиттерного повторителя, но изменена, чтобы избежать отсечения отрицательных полупериодов. Делитель напряжения (резисторы R_1 и R_2) используется для того, чтобы переместить входящий сигнал (после его прохождения через конденсатор связи) на положительный уровень постоянного тока или в рабочую точку. Входной и выходной конденсаторы используются в схеме для того, чтобы можно было сложить входной и выходной сигналы, не нарушая рабочую точку постоянного тока. Эти конденсаторы также играют роль фильтра.

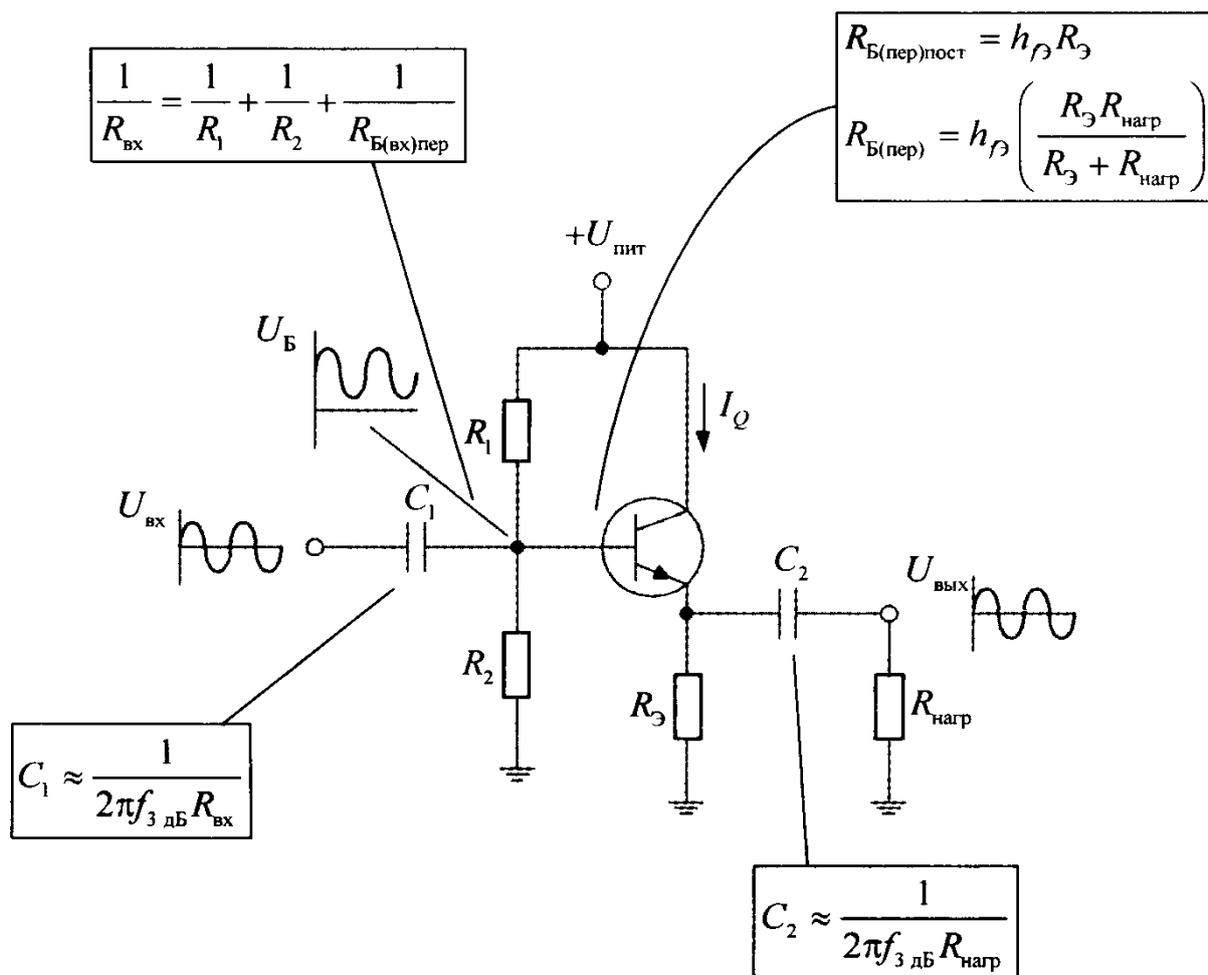


Рис. 51. Общая схема усилителя с общим коллектором.

$R_{Б(вх)пер}$ – входное сопротивление базы при переменном токе;

$R_{Б(вх)пост}$ – входное сопротивление базы при постоянном токе

Рассмотрим пример разработки усилителя с общим коллектором, в частности вычисление сопротивлений, чтобы обеспечить необходимые напряжения и токи.

Чтобы разработать усилитель с общим коллектором для питания нагрузки с сопротивлением 3 кОм, имеющий параметры: напряжение $U_{пит} = +10$ В, для транзистора $h_{фэ} = 100$ и требуемая частота $f_{3 дБ} = 100$ Гц, применяется такая последовательность шагов.

1. Задаётся ток в рабочей точке $I_Q = I_K$. Для данного примера зададим $I_Q = 1$ мА.

2. Выбирается напряжение $U_э = 1/2 U_{пит}$, чтобы получить максимально возможный симметричный размах выходного сигнала, не допуская отсечения. В данном случае $U_э = 5$ В. Чтобы задать $U_э = 5$ В и получить $I_Q = 1$ мА, используем резистор $R_э$, значение которого определяем с помощью закона Ома:

$$R_э = \frac{0,5 U_{пит}}{I_Q} = \frac{5 \text{ В}}{1 \text{ мА}} = 5 \text{ кОм.}$$

3. Далее задаём $U_Б = U_э + 0,6$ для условий рабочей точки (чтобы согласовать с напряжением $U_э$ для предотвращения отсечения). Чтобы задать

напряжение на базе, используем делитель напряжения (резисторы R_1 и R_2). Соотношение значений резисторов R_1 и R_2 определим, переупорядочив уравнение делителя напряжения и подставив его в выражение $U_B = U_{\text{Э}} + 0,6$:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{U_B}{U_{\text{пит}} - U_B} = \frac{U_{\text{Э}} + 0,6}{U_{\text{CC}} - (U_{\text{Э}} + 0,6)}.$$

Можно упростить это выражение, задав $R_1 = R_2$. Это упрощение не учитывает падение напряжения в 0,6 В, но обычно это не создаёт больших проблем. Сопротивления резисторов R_1 и R_2 должны быть подобраны таким образом, чтобы их общее сопротивление при параллельном соединении было равным или меньшим 1/10 входного сопротивления на базе при постоянном напряжении рабочей точки (таким образом предотвращается понижение выходного напряжения делителя при нагрузке):

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \leq \frac{1}{10} R_{\text{Б(вх)пост}},$$

$$\frac{R}{2} \leq \frac{1}{10} R_{\text{Б(вх)пост}},$$

применяя приближение $R = R_1 = R_2$.

4. В этих уравнениях выражение $R_{\text{Б(вх)пер}} = h_{f\text{Э}} R_{\text{Э}}$, т. е. $R_{\text{Б(вх)пост}} = 100 \cdot 5\,000 = 500$ кОм. Применяя оговорённое выше приближение, вычисляем значения резисторов R_1 и R_2 и получаем по 100 кОм для каждого. В данном случае не нужно беспокоиться о нагрузке конденсатора связи по переменному току; он не влияет на напряжение делителя, поскольку начальные условия рабочей точки предположительно заданы. Конденсатор C_2 ведёт себя как разомкнутая цепь, таким образом «устраняя» присутствие нагрузки. Далее, подбираем такие значения конденсаторов связи по переменному току, чтобы заблокировать сигналы постоянного тока и других нежелательных частот. Конденсатор C_1 вместе с сопротивлением $R_{\text{вх}}$ составляют высокочастотный фильтр. Чтобы определить сопротивление $R_{\text{вх}}$, считаем, что делитель напряжения и $R_{\text{Б(вх)пер}}$ соединены параллельно:

$$\frac{1}{R_{\text{вх}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{\text{Б(вх)пер}}}.$$

Здесь используется $R_{\text{Б(вх)пер}}$, а не $R_{\text{Б(вх)пост}}$. Это объясняется тем, что, когда на вход подаётся регулярно изменяющийся сигнал, считать нагрузку отсутствующей больше нельзя; конденсатор начинает пропускать ток смещения. Значит, чтобы определить $R_{\text{Б(вх)пер}}$, необходимо вычислить значение параллельных сопротивлений $R_{\text{Э}}$ и $R_{\text{нагр}}$ и умножить полученное значение на $h_{f\text{Э}}$:

$$R_{\text{Б(вх)пер}} = h_{f\text{Э}} \left(\frac{R_{\text{Э}} R_{\text{нагр}}}{R_{\text{Э}} + R_{\text{нагр}}} \right) = 100 \left(\frac{5\,000 \cdot 3\,000}{5\,000 + 3\,000} \right) = 190 \text{ кОм}.$$

5. Теперь можно вычислить сопротивление $R_{\text{вх}}$:

$$\frac{1}{R_{\text{вх}}} = \frac{1}{100\,000} + \frac{1}{100\,000} + \frac{1}{190\,000},$$

$$R_{\text{вх}} = 40 \text{ кОм}.$$

6. Определив значение сопротивления $R_{\text{вх}}$, подбираем такое значение конденсатора C_1 , чтобы задать точку $f_{3 \text{ дБ}}$ (конденсатор C_1 и сопротивление $R_{\text{вх}}$ создают высокочастотный фильтр). Значение конденсатора C_1 вычисляется использованием следующей формулы:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{3 \text{ дБ}} R_{\text{вх}}} = \frac{1}{2 \cdot 3,1416 \cdot 100 \cdot 40\,000} = 0,04 \text{ мкФ.}$$

7. Конденсатор C_2 вместе с нагрузкой создаёт высокочастотный фильтр. Его значение вычисляется следующим образом:

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_{3 \text{ дБ}} R_{\text{нагр}}} = \frac{1}{2 \cdot 3,1416 \cdot 100 \cdot 3\,000} = 0,5 \text{ мкФ.}$$

Это завершает расчёт усилителя с общим коллектором. Полученная принципиальная схема с параметрами всех компонентов показана на рис. 52.

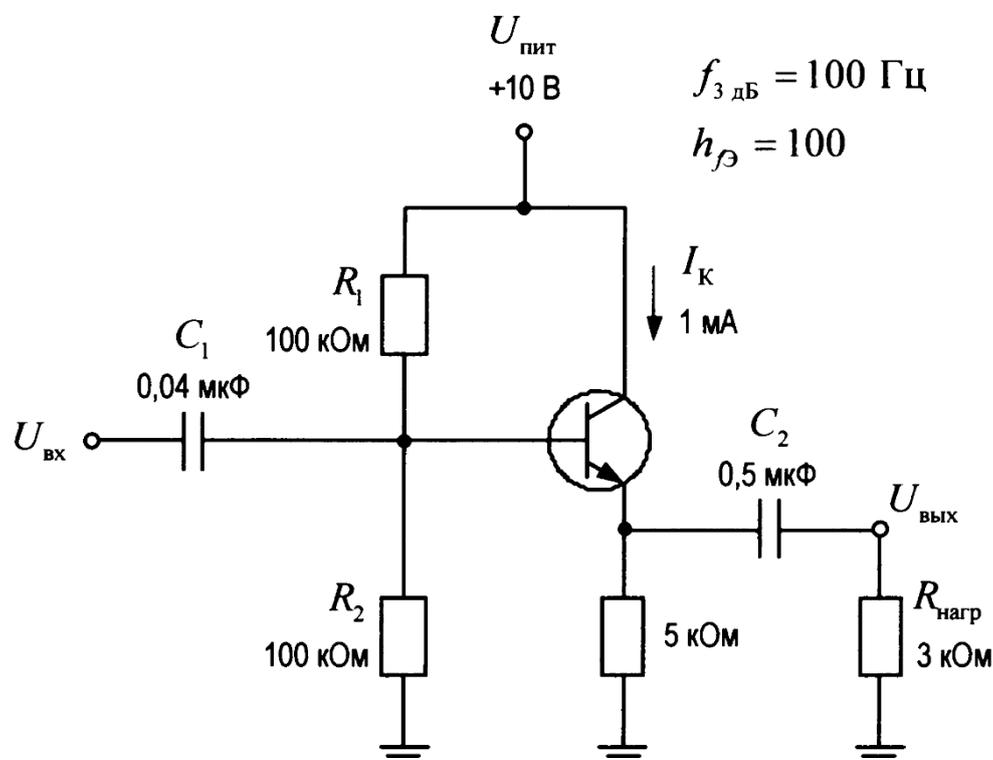


Рис. 52. Принципиальная схема усилителя с общим коллектором

Схема с общим эмиттером. Показанный на рис. 53 способ подключения биполярного транзистора называется схемой с общим эмиттером. В отличие от схемы эмиттерного повторителя (с общим коллектором), схема с общим эмиттером обеспечивает усиление по напряжению. Для анализа работы данной схемы сначала установим напряжение $U_{\text{к}} = 1/2 U_{\text{пит}}$, чтобы получить максимальный размах выходного напряжения без отсечения отрицательного полупериода. Подобно схеме эмиттерного повторителя для начала зададим ток покоя I_0 . Напряжение $U_{\text{к}} = 1/2 U_{\text{пит}}$ с требуемым током покоя задаётся с помощью резистора $R_{\text{к}}$, значение сопротивления которого рассчитывается с помощью закона Ома следующим образом:

$$R_K = \frac{U_{\text{пит}} - U_K}{I_K} = \frac{U_{\text{пит}} - 0,5U_{\text{пит}}}{I_Q} = \frac{0,5U_{\text{пит}}}{I_Q}.$$

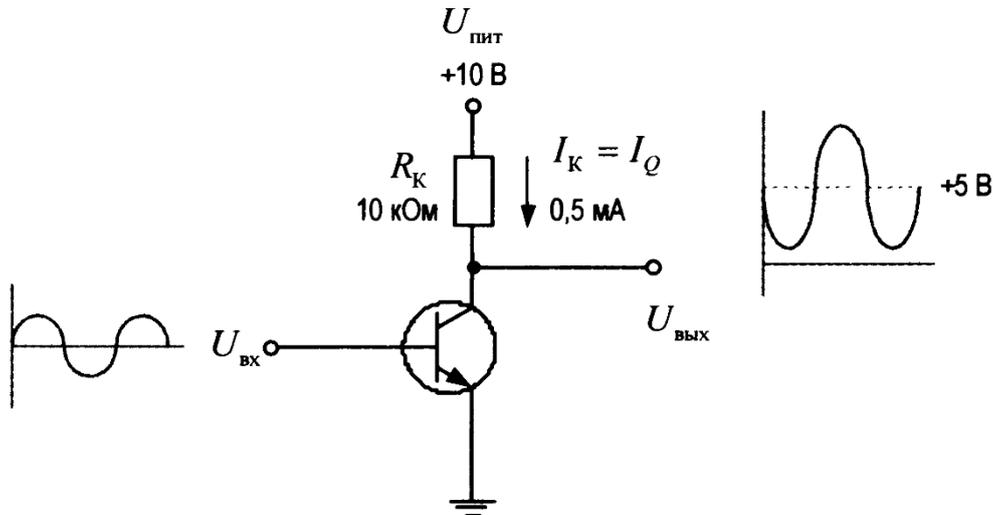


Рис. 53. Общая конфигурация схемы с общим эмиттером

Например, для $U_{\text{пит}} = +10 \text{ В}$ и $I_Q = 0,5 \text{ мА}$ значение резистора R_K будет 10 кОм . Чтобы определить коэффициент усиления этой схемы, воспользуемся тем, что $\Delta U_{\text{Э}} = \Delta U_{\text{Б}}$ (где Δ обозначает небольшое случайное отклонение величины). Ток эмиттера определяется с помощью закона Ома:

$$\Delta I_{\text{Э}} = \frac{\Delta U_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}}} = \frac{\Delta U_{\text{Б}}}{R_{\text{Э}}} = I_K.$$

Используя это выражение и отношение $U_K = U_{\text{пит}} - I_K R_K$, получаем:

$$\Delta U_K = \Delta I_K R_K = \frac{\Delta U_{\text{Б}}}{R_{\text{Э}}} R_K.$$

Поскольку $U_K = U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{Б}} = U_{\text{вх}}$, коэффициент усиления K_U будет следующим:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_{\text{Б}}} = \frac{R_K}{R_{\text{Э}}}.$$

На схеме в явном виде нет резистора $R_{\text{Э}}$ в цепи эмиттера. При использовании формулы усиления будет казаться, что $R_{\text{Э}} = 0$, вследствие чего усиление будет бесконечным. Но биполярные транзисторы обладают таким свойством, как переходное сопротивление (небольшое внутреннее сопротивление) в области эмиттера, которое определяется приблизительно как $r_{\text{пс}} \approx 0,026/I_{\text{Э}}$.

Применяя эту формулу при $I_Q = 0,5 \text{ мА} = I_K \approx I_{\text{Э}}$, получим, что величина $R_{\text{Э}}$ (или $r_{\text{пс}}$) в уравнении усиления будет равна 52 Ом . Это означает, что в действительности коэффициент усиления K_U будет следующим:

$$K_U = -\frac{R_K}{R_{\text{Э}}} = -\frac{R_K}{r_{\text{пс}}} = -\frac{10\,000}{52} = -192.$$

Усиление отрицательное, т. е. выходной сигнал инвертирован относительно входного. В результате этого при увеличении напряжения $U_{\text{вх}}$ растёт ток

коллектора I_K , в то время как в соответствии с законом Ома напряжение U_K ($U_{\text{ВЫХ}}$) на коллекторе понижается. Но с подходом к использованию переходного сопротивления $r_{\text{пс}}$ транзистора есть одна проблема. В частности, это сопротивление оказывается очень нестабильным, в результате чего усиление также оказывается нестабильным. Причиной нестабильности сопротивления $r_{\text{пс}}$ является его зависимость от температуры. При повышении температуры напряжение $U_{\text{Э}}$ на эмиттере и ток I_K коллектора повышаются, напряжение $U_{\text{БЭ}}$ между базой и эмиттером понижается, но напряжение $U_{\text{Б}}$ на базе не изменяется. Это означает сужение диапазона напряжения смещения, что фактически перекрывает «вентиль» транзистора.

Эта проблема исчезает, если разместить резистор между эмиттером и землёй, как показано на рис. 54. Рассматривая резистор $R_{\text{Э}}$ и сопротивление $r_{\text{пс}}$ как последовательно соединённые сопротивления, получаем формулу усиления в виде $K_U = R_K / (R_{\text{Э}} + r_{\text{пс}})$.

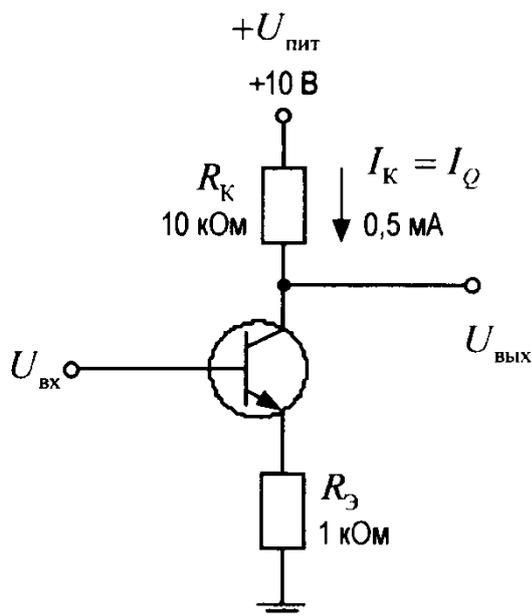


Рис. 54. Схема с общим эмиттером с добавленным резистором $R_{\text{Э}}$ для повышения температурной стабильности

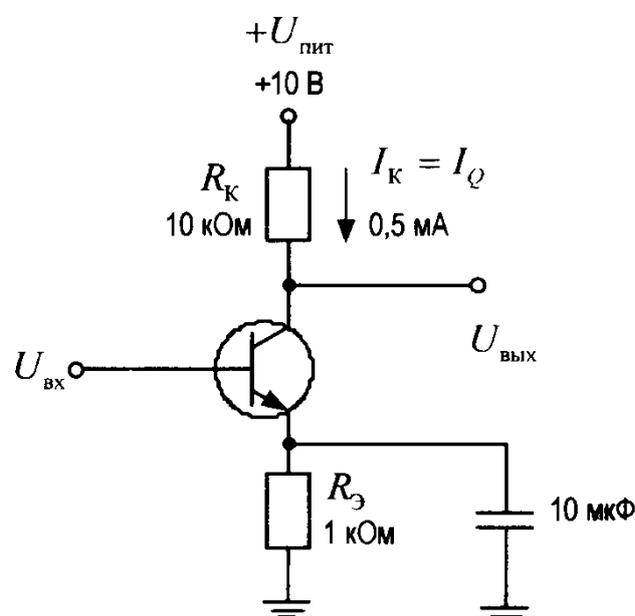


Рис. 55. Схема с общим эмиттером с добавленным резистором $R_{\text{Э}}$ для повышения температурной стабильности и конденсатором для повышения коэффициента усиления

Добавление резистора $R_{\text{Э}}$ понижает случайные отклонения в знаменателе, что в свою очередь понижает отклонения в усиении. На практике следует выбирать такое значение резистора $R_{\text{Э}}$, чтобы напряжение $U_{\text{Э}}$ на эмиттере было около 1 В (для обеспечения температурной стабильности и максимального размаха выходного сигнала). Это значение определяется с помощью закона Ома как $R_{\text{Э}} = U_{\text{Э}} / I_{\text{Э}} = U_{\text{Э}} / I_Q$; таким образом, для данного примера значение резистора $R_{\text{Э}}$ будет равно $1 \text{ В} / 1 \text{ мА} = 1 \text{ кОм}$. Но кроме выгоды повышения стабильности схемы, добавление в цепь эмиттера сопротивления $R_{\text{Э}}$ имеет и недостаток,

закрывающийся в понижении коэффициента усиления. Эту проблему также можно устранить, сохраняя температурную стабильность схемы.

Если резистор R_3 зашунтировать конденсатором (рис. 55), он «исчезнет» для высокочастотных сигналов. Конденсатор ведёт себя как бесконечно большое сопротивление для сигналов постоянного тока, но оказывает значительно меньшее сопротивление сигналам переменного тока. Переменный ток обходит R_3 на землю через конденсатор. Единственное сопротивление, которое остаётся теперь в уравнении усиления, – это незначительное переходное сопротивление $r_{пс}$.

Усилитель с общим эмиттером. Показанная на рис. 56 схема называется усилителем с общим эмиттером. В отличие от усилителя с общим коллектором, этот усилитель обеспечивает усиление по напряжению. Усилитель основан на общей схеме подключения биполярного транзистора с общим эмиттером, модифицированной, чтобы можно было получить связь по переменному току.

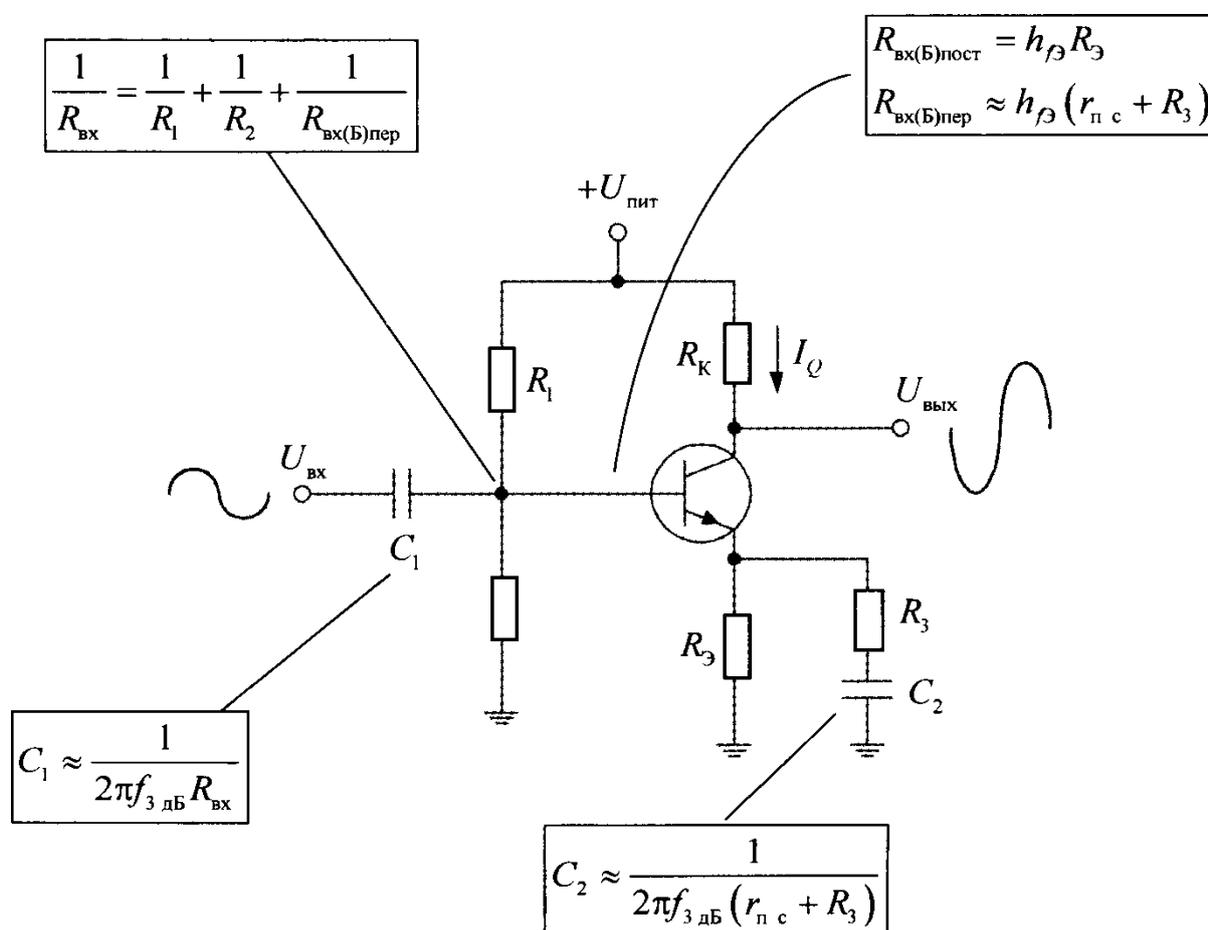


Рис. 56. Общая схема усилителя с общим эмиттером

Чтобы разобраться с работой этого усилителя, рассмотрим пример расчёта усилителя этого типа со следующими параметрами: усиление по напряжению $K_U = -100$, точка $f_{3дБ} = 100$ Гц, ток покоя $I_Q = 1$ мА, $h_{f\beta} = 100$ и $U_{пит} = 20$ В. Последовательность шагов расчёта следующая:

1. Задаём резистору R_K такое значение, чтобы напряжение $U_{вых}$ (или U_K) было $0,5U_{пит}$. Таким образом, допускаем максимальный симметричный размах

выходного сигнала. В данном случае это означает, что напряжение U_K должно быть 10 В. Используя закон Ома, определяем значения резистора R_K :

$$R_K = \frac{U_K - U_{пит}}{I_K} = \frac{0,5U_{пит} - U_{пит}}{I_Q} = \frac{10 \text{ В}}{1 \text{ мА}} = 10 \text{ кОм}.$$

2. Далее задаём резистору $R_Э$ такое значение, чтобы получить напряжение $U_Э = 1 \text{ В}$ и обеспечить температурную стабильность усиления. Это значение вычисляем, используя закон Ома и задав $I_Q = I_Э = 1 \text{ мА}$. Получаем

$$R_Э = U_Э / I_Э = 1 \text{ В} / 1 \text{ мА} = 1 \text{ кОм}.$$

3. Теперь вычисляем значения резисторов R_1 и R_2 делителя напряжения, чтобы задать на базе напряжение покоя $U_B = U_Э + 0,6 \text{ В}$, или 1,6 В. Требуемое отношение между значениями резисторов R_1 и R_2 определяем с помощью переупорядоченного уравнения делителя напряжения:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_B}{U_{пит} - U_B} = \frac{1,6}{20 - 1,6} = \frac{1}{11,5}.$$

Это означает, что $R_1 = 11,5R_2$. Значения этих резисторов определяем, применяя процедуру наподобие используемой для усилителя с общим коллектором; их общее сопротивление при параллельном соединении должно быть равным или меньшим, чем $0,1R_{Б(вх)пост}$:

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \leq \frac{1}{10} R_{Б(вх)пост}.$$

Подставив в это выражение значение резистора $R_1 = 11,5R_2$ и используя значение $R_{Б(вх)пост} = h_{fЭ} R_Э$, вычисляем $R_2 = 10 \text{ кОм}$. Это означает, что значение $R_1 = 115 \text{ кОм}$ (110 кОм будет достаточно близко).

4. Рассчитываем значение резистора R_3 , чтобы получить желаемый коэффициент усиления, где усиление определяется следующим образом:

$$K_y = -\frac{R_K}{r_{пс} + (R_Э \parallel R_3)} = -100.$$

Двойная вертикальная черта означает общее значение параллельно соединённых $R_Э$ и R_3 . Значение $r_{пс}$ вычисляем по формуле

$$r_{пс} = 0,026 / I_K = 0,026 \text{ В} / 1 \text{ мА} = 26 \text{ Ом}.$$

Выражение для усиления можно упростить, полагая, что сопротивление $R_Э$ не оказывает влияние для сигналов переменного тока. Таким образом, получаем следующее выражение:

$$K_y = -\frac{R_K}{r_{пс} + R_3} = -\frac{10\,000}{26 + R_3} = -100.$$

Решив это уравнение относительно R_3 , получим $R_3 = 74 \text{ Ом}$.

5. Подбираем такое значение конденсатора C_1 для фильтра, чтобы $C_1 = 1 / (2\pi f_{з\,дб} R_{вх})$. Здесь $R_{вх}$ означает общее параллельное сопротивление резисторов делителя напряжения и сопротивления $R_{Б(вх)пост}$, если смотреть слева на делитель напряжения:

$$\frac{1}{R_{вх}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{h_{fЭ}(r_{пс} + R_3)} = \frac{1}{110\,000} + \frac{1}{10\,000} + \frac{1}{100(26 + 74)}.$$

Решив это уравнение, получим $R_{вх} = 5 \text{ кОм}$. Это означает, что

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 5\,000} = 0,32 \text{ мкФ}.$$

6. Чтобы рассчитать значение конденсатора C_2 , условимся, что C_2 и $r_{пс} + R_3$ составляют высокочастотный фильтр (полагая, что для сигналов переменного тока значением резистора $R_э$ можно пренебречь). Значение C_2 вычисляем следующим образом:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{3\text{дБ}}(r_{пс} + R_3)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot (26 + 74)} = 16 \text{ мкФ}.$$

Это завершает расчёт усилителя с общим коллектором. Полученная принципиальная схема с параметрами всех компонентов показана на рис. 57.

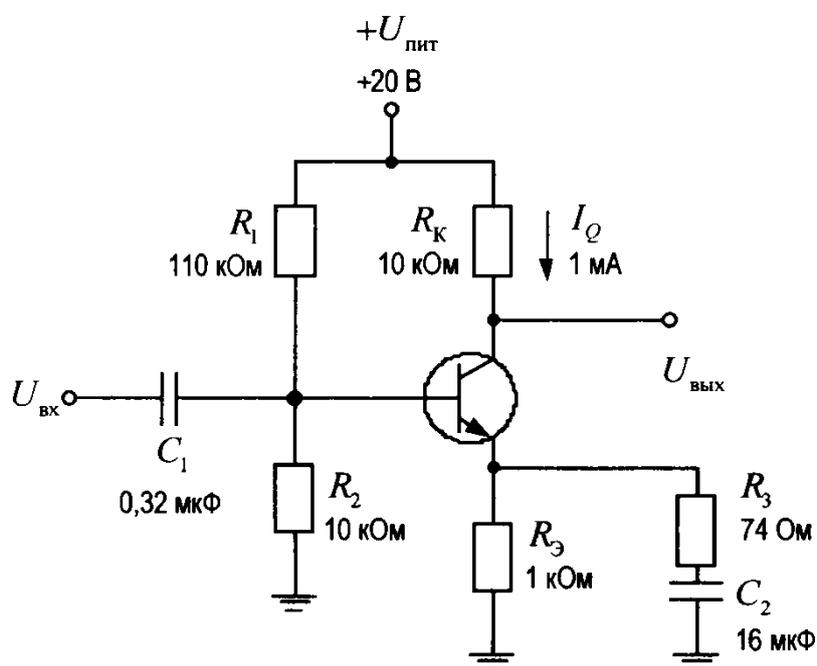


Рис. 57. Принципиальная схема усилителя с общим эмиттером

Стабилизатор напряжения. Простой стабилизатор напряжения можно сделать, используя схему со стабилитроном, пример которой показан на рис. 58, а. Но для многих приложений такой простой стабилизатор не подойдёт по причине его недостатков. В частности, нельзя установить точно значение выходного напряжения $U_{вых}$; стабилитрон предоставляет только умеренную защиту против напряжений пульсации. Вдобавок этот стабилизатор не очень хорошо работает при варьирующемся импедансе нагрузки. Для работы с большим диапазоном значений нагрузки стабилитрон должен иметь большую номинальную мощность, что значительно повышает его стоимость.

В отличие от первой схемы, схема на рис. 58, б обеспечивает стабилизацию более высокого качества. Она похожа на первую схему, только стабилитрон подключён к базе транзистора $n-p-n$ -типа и используется для управления его током «коллектор-эмиттер». Транзистор в схеме подключён в конфигурации эмиттерного повторителя. Это означает, что напряжение на эмиттере повторяет

напряжение на базе (за вычетом падения напряжения величиной 0,6 В). Стабилизация напряжения на базе с помощью стабилитрона даёт стабилизированное напряжение на эмиттере. Согласно правилам для транзисторов для работы транзистора ток базы должен составлять $1/h_{FE}$ тока «эмиттер-коллектор». Таким образом, маломощный стабилитрон может стабилизировать напряжение на базе транзистора, который способен пропускать через себя намного более сильный ток. Чтобы понизить создаваемый стабилитроном шум, параллельно ему в схему добавлен конденсатор, который также совместно с резистором создаёт RC -фильтр для подавления пульсаций напряжения.

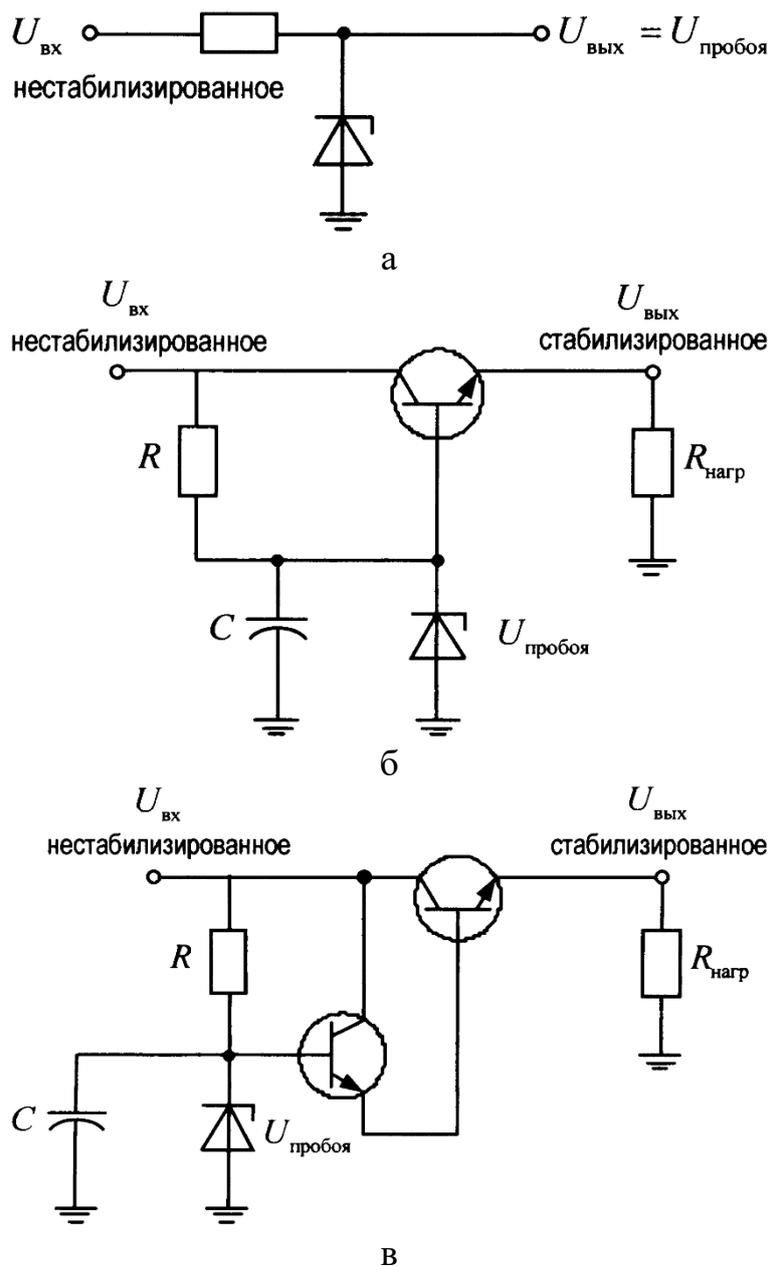


Рис. 58. Стабилизатор напряжения: а) на стабилитроне, простая схема;
 б) улучшенная схема, на стабилитроне и транзисторе;
 в) улучшенная схема, на стабилитроне и двух транзисторах

В некоторых случаях стабилитрон с предыдущей схемы не всегда в состоянии обеспечить достаточный ток базы. Одним из способов решения этой проблемы будет добавление в схему ещё одного транзистора (рис. 58, в). Дополнительный транзистор (к базе которого подключён стабилитрон) усиливает ток, подаваемый на базу верхнего транзистора.

Пара Дарлингтона. Соединив вместе два транзистора (рис. 59), получим эквивалентную схему транзистора с большим значением $h_{fЭ}$, способного работать с большими токами. Данная комбинация транзисторов называется парой Дарлингтона. Значение эквивалентного $h_{fЭ}$ такой пары равно произведению значений $h_{fЭ}$ отдельных транзисторов ($h_{fЭ} = h_{fЭ1}h_{fЭ2}$). Пары Дарлингтона используются для работы с большими токами, а также в качестве входных каскадов усилителей, для которых требуется высокий входной импеданс. Но в отличие от одинарного транзистора пара Дарлингтона имеет более медленное время отклика (верхнему транзистору требуется некоторое время, чтобы включить или выключить нижний транзистор). Кроме этого, у неё вдвое выше падение напряжения между базой и эмиттером по сравнению с одинарным транзистором (1,2 В вместо 0,6 В). Пары Дарлингтона доступны в моноблочном исполнении.

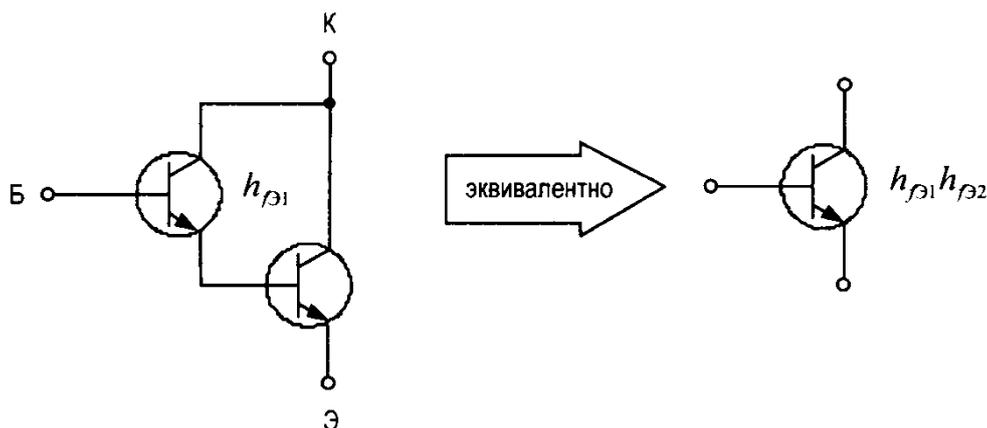


Рис. 59. Пара Дарлингтона

Типы биполярных транзисторов

Транзисторы для усиления малых сигналов. Транзисторы этого типа (рис. 60, а) в основном применяются для усиления малых сигналов, но также могут использоваться и как переключатели. Они обычно имеют значения коэффициента $h_{fЭ}$ усиления по току в диапазоне от 10 до 500, а максимальный ток коллектора I_K – в диапазоне от 80 до 600 мА. Доступны как *n-p-n*-, так и *p-n-p*-разновидности этих транзисторов. В зависимости от конкретного транзистора максимальная рабочая частота находится в диапазоне от 1 до 300 МГц.

Транзисторы для коммутирования малых сигналов. Транзисторы этого типа (рис. 60, б) в основном служат для коммутирования малых сигналов, но также могут использоваться и как усилители. Они обычно имеют значения коэффициента $h_{fЭ}$ усиления по току в диапазоне от 10 до 200, а максимальный ток коллектора I_K – в диапазоне от 10 до 1000 мА. Доступны как *n-p-n*-, так и *p-n-p*-разновидности этих транзисторов. В зависимости от конкретного транзистора максимальная скорость коммутации составляет от 10 до 2 ГГц.

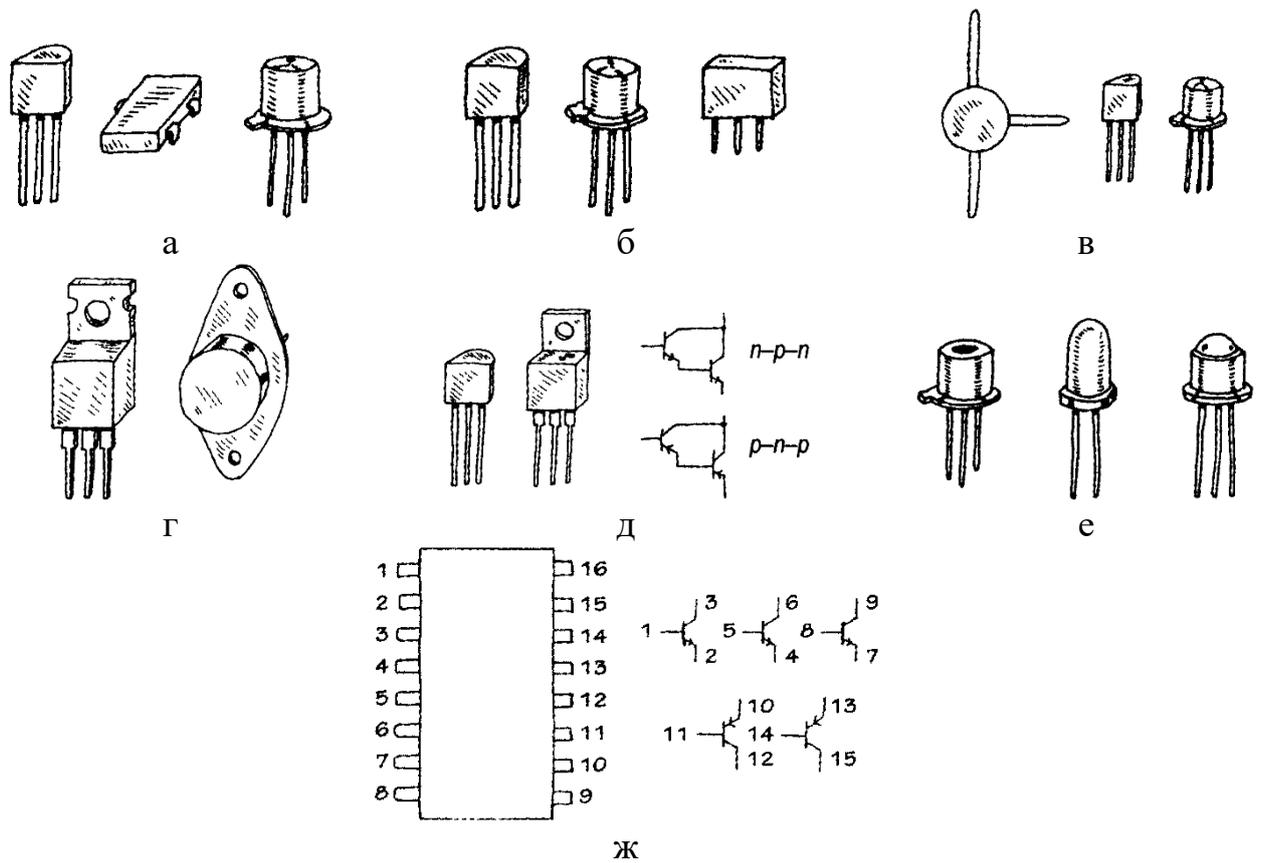


Рис. 60. Транзисторы: а) для усиления малых сигналов; б) для коммутирования малых сигналов; в) для коммутирования высокочастотных сигналов; г) силовые; д) пары Дарлингтона; е) фототранзисторы; ж) транзисторная сборка

Высокочастотные транзисторы. Эти транзисторы (рис. 60, в) используются для высокоскоростного коммутирования высокочастотных малых сигналов. Область базы этих транзисторов очень тонкая, а сами устройства очень малого размера. Применяются в усилителях и генераторах колебаний для ВЧ-, СВЧ- и УВЧ-приложений, а также приложений кабельного телевидения. Номинальная частота этих транзисторов около 2 ГГц, а максимальный ток коллектора I_K в диапазоне от 10 до 600 мА. Доступны как *n-p-n*-, так и *p-n-p*-разновидности этих транзисторов.

Силовые транзисторы. Эти транзисторы (рис. 60, г) используются в мощных усилителях и источниках питания. Коллектор соединён с металлическим корпусом или подложкой, которая играет роль теплоотвода. Типичная номинальная мощность этих транзисторов в диапазоне от 10 до 300 Вт, а номинальная частота – от 1 до 100 МГц. Максимальный ток коллектора I_K в диапазоне от 1 до 100 А. Доступны как *n-p-n*-, так и *p-n-p*-разновидности, а также пары Дарлингтона (*n-p-n* и *p-n-p*) этих транзисторов.

Пары Дарлингтона. Два транзистора в одном корпусе (рис. 60, д) обеспечивают более высокую стабильность при сильных токах. Эффективный h_{FE} таких устройств намного выше, чем одинарного транзистора, что обеспечивает большее усиление по току. Доступны как *D-n-p-n*-, так и *D-p-n-p* разновидности пар Дарлингтона.

Фототранзисторы. Это биполярные транзисторы с чувствительной к свету базой (рис. 60, е). Освещение базы вызывает ток базы. В зависимости от типа фототранзистора свет может функционировать как исключительный элемент смещения (фототранзисторы с двумя выводами) или же просто изменять уже присутствующий ток базы (фототранзисторы с тремя выводами).

Транзисторная сборка представляет собой несколько транзисторов, заключённых в один корпус наподобие корпуса микросхемы. Например, транзисторная сборка на рис. 60, ж содержит три транзистора *n-p-n*-типа и два транзистора *p-n-p*-типа.

Коэффициент усиления по току $h_{fЭ}$ транзистора не самый удобный параметр, по которому можно судить о пригодности транзистора для того или иного приложения. Для группы транзисторов одного семейства он может варьироваться в пределах от 50 до 500 и изменяться в зависимости от тока коллектора, напряжения между эмиттером и коллектором и температуры. Вследствие такой ненадёжности параметра $h_{fЭ}$ следует избегать создания схем, которые зависят исключительно от значений этого параметра.

Все транзисторы имеют максимальный ток коллектора (I_{Kmax}), пробивное напряжение коллектор-база ($U_{КБ0проб}$), пробивное напряжение коллектор-эмиттер ($U_{КЭ0проб}$), пробивное напряжение эмиттер-база ($U_{ЭБ0проб}$), а также максимальную номинальную рассеиваемую коллектором мощность (P_{Kmax}). Превышение этих параметров может вызвать выход транзистора из строя. Один из способов избежать превышения пробивного напряжения эмиттер-база ($U_{ЭБ0проб}$) – подключить диод между эмиттером и базой (рис. 61, а).

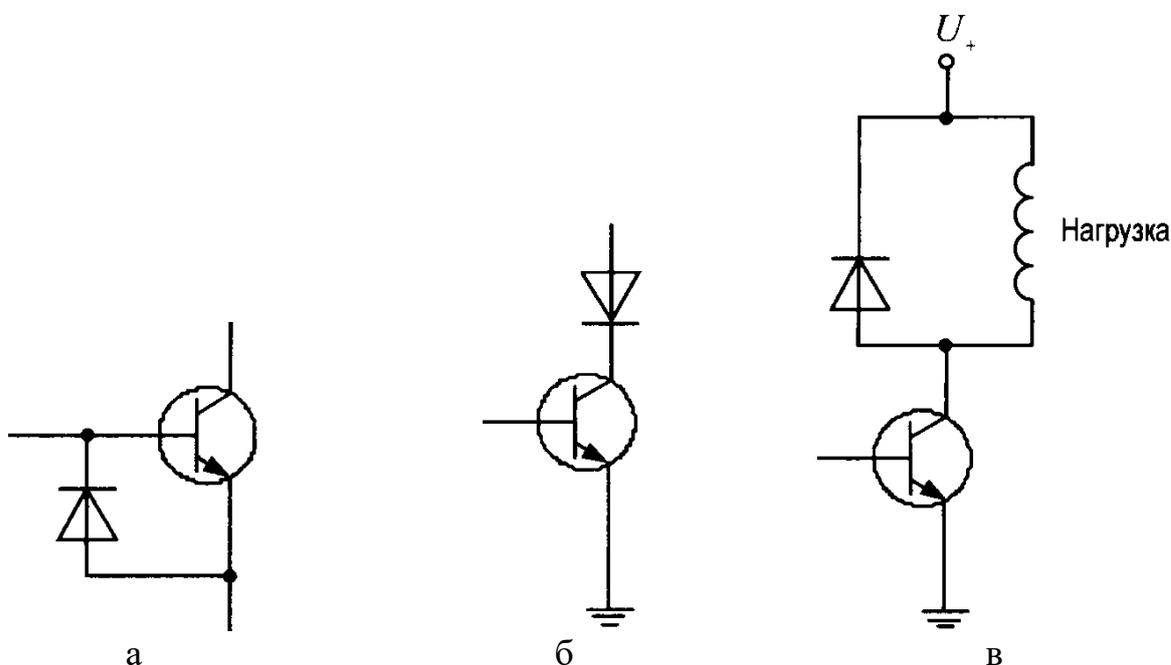


Рис. 61. Способы защиты от превышения напряжений пробоя

Этот диод не допускает проводимости между эмиттером и базой, когда эмиттер становится более положительным, чем база (т. е. входной сигнал на базе становится отрицательным, когда эмиттер подключён на землю). Чтобы

предотвратить превышение пробивного напряжения коллектор-база ($U_{КБ\text{Опроб}}$), можно подключить диод последовательно коллектору (рис. 61, б). Этот диод не допускает проводимости между коллектором и базой, когда напряжение на базе становится значительно бóльшим, чем напряжение на коллекторе. При подключённой к коллектору индуктивной нагрузке существует возможность превышения пробивного напряжения коллектор-эмиттер. Чтобы предотвратить такое развитие, можно параллельно нагрузке подсоединить диод (рис. 61, в). Диод начинает проводить прежде, чем всплеск напряжения на коллекторе, созданный индуктивной нагрузкой, достигнет напряжения пробоя.

Цоколёвка (разводка выводов) биполярных транзисторов. Биполярные транзисторы доступны в корпусах разных типов – пластмассовых или металлических. При определении выводов базы, эмиттера и коллектора транзистора первым делом необходимо проверить, не содержит ли упаковка транзистора диаграмму цоколёвки. При отсутствии такой диаграммы можно использовать каталог с перекрёстными ссылками (например, каталог полупроводниковых устройств компании *NTE Electronics, Inc.*). Но во многих случаях информацию о коммутирующих транзисторах, поставляемых оптом, нельзя посмотреть в каталоге по той причине, что они никак не обозначены. Кроме этого, оптовые поставщики часто бросают в общий пакет набор транзисторов, которые все выглядят одинаково, но могут иметь абсолютно разные цоколёвки, а также быть как *n-p-n*-, так и *p-n-p*-типа. При частом использовании транзисторов желательно использовать цифровой мультиметр, обладающий функцией тестирования транзисторов. Такие мультиметры стоят сравнительно недорого, и работа с ними не представляет никаких сложностей. Для тестирования транзисторов мультиметр оснащён гнездовым разъёмом обычно с шестью контактами. Выводы проверяемого транзистора вставляют в гнезда разъёма, после чего нажимают кнопку проверки. Мультиметр замеряет разные параметры устройства и на их основе выводит информацию о его типе (*n-p-n* или *p-n-p*), цоколёвке (например, «ЭБК», «КБЭ» и т. п.), а также параметре h_{FE} транзистора.

Применение биполярных транзисторов

Управление реле. В схеме на рис. 62 транзистор типа *n-p-n* используется для управления реле. Когда на базу транзистора подаются управляющие напряжение и ток, транзистор включается, позволяя протекать току через катушку реле, в результате реле переключается из одного состояния в другое. Диод в схеме предназначен для подавления всплесков напряжения, создаваемых катушкой реле. При выборе реле следует руководствоваться необходимым рабочим напряжением и прочими параметрами.

Дифференциальный усилитель представляет собой устройство, которое сравнивает два отдельных входных сигнала, а затем усиливает разницу между ними (рис. 63). Чтобы понять работу данной схемы, полагаем, что оба транзистора имеют идентичные характеристики и что они (транзисторы) включены по конфигурации эмиттерного повторителя. При подаче на оба входа U_1 и U_2 входных сигналов одинакового уровня через каждый транзистор будут протекать идентичные токи. Согласно уравнению $U_K = U_{пит} - I_K R_K$, это означает, что напряжения на коллекторах обоих транзисторов также одинаковые. Поскольку

выходные сигналы схемы являются просто напряжениями на коллекторах левого и правого транзисторов, выходное напряжение (разница потенциалов) равно нулю. Теперь предположим, что на вход U_1 подаётся сигнал бóльшего значения, чем на вход U_2 . В этом случае через левый транзистор будет протекать более сильный ток, чем через правый. Это означает, что напряжение U_K коллектора левого транзистора будет меньшим, чем напряжение U_K коллектора правого транзистора. Поскольку транзисторы подключены в конфигурации эмиттерного повторителя, этот эффект усиливается. Отношение между входными и выходными напряжениями описывается следующим выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx \frac{R_K}{r_{\text{ПС}}} (U_1 - U_2).$$

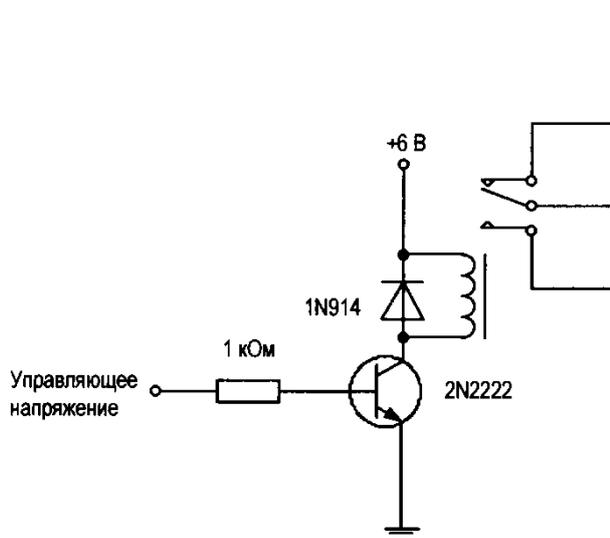


Рис. 62. Привод реле на транзисторе

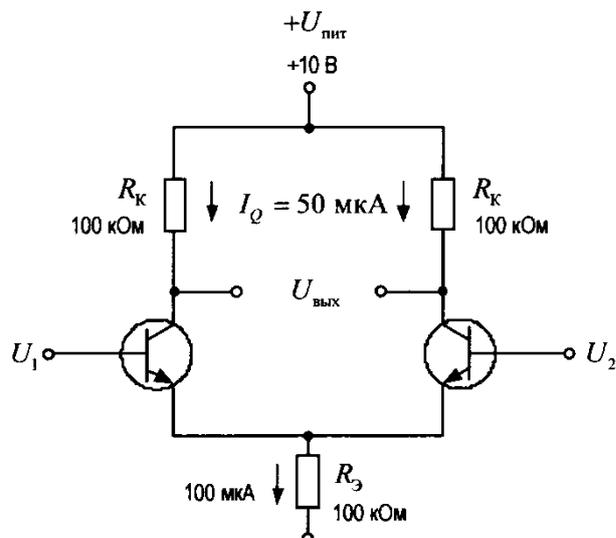


Рис. 63. Дифференциальный усилитель

Переупорядочив члены этого выражения, получаем коэффициент усиления:

$$K_y = R_K / r_{\text{ПС}}.$$

Чтобы разобраться, как подобрать необходимые значения резисторов дифференциального усилителя, рассмотрим представленную схему. Сначала подбираем такое значение резистора R_K , чтобы напряжение U_K было $0,5U_{\text{пит}}$, или 5 В. Так удастся получить максимальный динамический диапазон. В то же время необходимо выбрать ток покоя (ток при отсутствии сигнала), например $I_Q = I_K = 50 \text{ мкА}$. Согласно закону Ома $R_K = (10 \text{ В} - 5 \text{ В}) / 50 \text{ мкА} = 100 \text{ кОм}$. Значение резистора $R_Э$ выбираем таким, чтобы напряжение на эмиттере было как можно ближе к нулю. Для этого складываем токи по 50 мкА правой и левой ветвей схемы и полагаем, что полученная сумма 100 мкА является током, протекающим через этот резистор. Затем, применяя закон Ома, получаем $R_Э = (0 \text{ В} - 10 \text{ В}) / 100 \text{ мкА} = 100 \text{ кОм}$. Далее определяем значение переходного сопротивления транзистора: $r_{\text{ПС}} = 0,026 \text{ В} / I_Э = 0,026 \text{ В} / 50 \text{ мкА} = 520 \text{ Ом}$. Таким образом, коэффициент усиления K_y будет равным $100 \text{ кОм} / 520 \text{ Ом} = 192$.

Дифференциальные усилители применяются среди прочего для извлечения ослабленных сигналов, зашумлённых в процессе передачи по линиям связи (усилитель ставится на приёмном конце линии). В отличие от фильтров, которые могут извлечь зашумлённый сигнал только в случае разных частот сигнала и шума, это условие не требуется для работы дифференциальных усилителей. Всё что требуется, – это чтобы шум в обоих проводах был общим.

Для описания качества дифференциального усилителя часто применяется параметр, называемый коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС – *common-mode rejection ratio, CMRR*). Значение КОСС хорошего дифференциального усилителя будет очень высоким (теоретически – бесконечным). Величина КОСС определяется как соотношение между напряжением, которое необходимо подать параллельно на два входа (U_1 и U_2), чтобы выход был одинаковой амплитуды, и разницей напряжений ($U_1 - U_2$).

Усилитель на комплементарных транзисторах. Эмиттерный повторитель на транзисторе *n-p-n*-типа отсекает выходной сигнал в течение отрицательного полупериода входного сигнала (транзистор выключается, когда напряжение на базе $U_B \leq U_E + 0,6$ В). Подобным образом эмиттерный повторитель на транзисторе *p-n-p*-типа отсекает выходной сигнал в течение положительного полупериода входного сигнала. Но если объединить в одной схеме два транзистора разных типов (рис. 64), получится так называемый двухтактный эмиттерный повторитель или усилитель на комплементарных транзисторах.

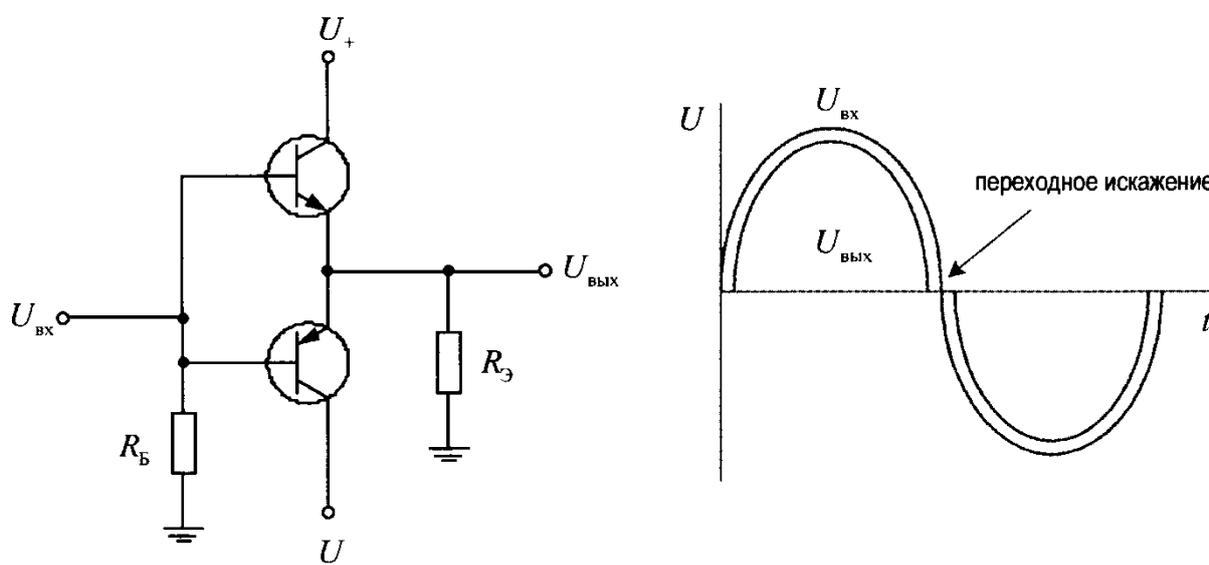


Рис. 64. Усилитель на комплементарных транзисторах

Когда $U_{вх} = 0$, оба транзистора смещены в режим отсечки ($I_B = 0$). Когда напряжение $U_{вх} > 0$, верхний транзистор находится в режиме проводимости и функционирует как эмиттерный повторитель, а нижний транзистор отключён. Когда напряжение $U_{вх} < 0$, нижний транзистор находится в режиме проводимости и функционирует как эмиттерный повторитель, а верхний транзистор отключён. Кроме полезности, эта схема работающая в качестве усилителя по постоянному току, также экономична, поскольку рабочая точка обоих транзисторов находится вблизи тока коллектора $I_K = 0$. Но при токе коллектора $I_K = 0$

параметры $h_{fЭ}$ и $r_{пс}$ транзисторов нестабильны, вследствие чего характеристики данной схемы нелинейные для малых сигналов или в близких к нулю точках перехода больших сигналов (возникают переходные искажения).

Токовое зеркало. Показанная на рис. 65 схема из двух согласованных транзисторов называется токовым зеркалом. Такое название объясняется тем, что ток нагрузки является «зеркальным отображением» тока управления, который потребляется из коллектора левого транзистора. Из баз обоих транзисторов исходит ток смещения одинаковой величины, из чего следует, что токи «коллектор-эмиттер» обоих транзисторов должны быть одинаковыми. Ток управления можно задавать резистором, подключённым между коллектором и более низким потенциалом. Схему токового зеркала можно также создать и на транзисторах $n-p-n$ -типа. Для этого схему на рис. 65 нужно перевернуть нижней частью вверх, заменить $p-n-p$ -транзисторы транзисторами $n-p-n$ -типа, изменить направление тока на обратное и поменять местами полярности питания.

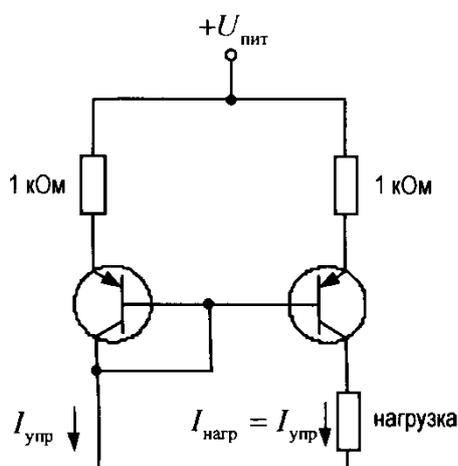


Рис. 65. Токовое зеркало:

$I_{нагр}$ – ток нагрузки;
 $I_{упр}$ – ток управления

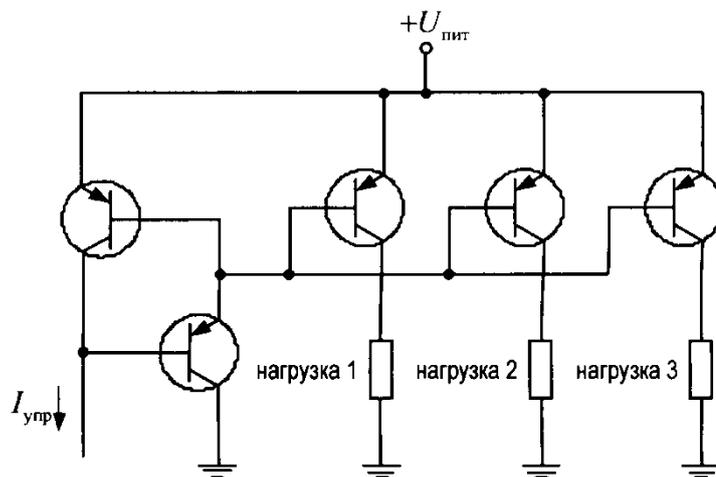


Рис. 66. Множественные источники тока

Множественные источники тока. Схема на рис. 66 представляет собой расширенную версию предыдущего примера, в которой вместо одного предоставляется несколько «зеркальных копий» тока управления для питания нескольких разных нагрузок. Схему можно сложить также и на транзисторах $n-p-n$ -типа, согласно соответствующим инструкциям из предыдущего примера. Задача дополнительного транзистора в каскаде управления схемы состоит в том, чтобы не позволять одному из транзисторов нагрузок в режиме насыщения (например, при удалении с него нагрузки) забирать ток из общей линии баз, уменьшая таким образом выходные токи других транзисторов.

Мультивибраторы (триггеры). Бистабильный мультивибратор (рис. 67) представляет собой схему, которая будет находиться в одном из двух состояний до тех пор, пока не поступит управляющий сигнал, переключающий её в другое состояние.

После смены состояния схемы, чтобы вернуть её в предыдущее состояние, требуется приложение другого управляющего сигнала. Рассмотрим работу

данной схемы. Предположим, что в исходном состоянии напряжение на выводе $U_1 = 0$. Это означает, что на базе транзистора Q_1 ток отсутствует, вследствие чего отсутствует и его ток коллектора. Поэтому весь протекающий через резисторы R_3 и R_4 ток поступает в базу транзистора Q_1 , переводя его в режим насыщения. Когда транзистор Q_1 находится в режиме насыщения, напряжение $U_1 = 0$ на выводе, как и предполагалось, исходно. Поскольку схема является симметричной, можно сказать, что она одинаково стабильна, когда напряжение $U_2 = 0$ на выводе и транзистор Q_2 находится в режиме насыщения. Чтобы перевести бистабильный мультивибратор из одного состояния в другое, нужно посредством переключателя S_1 заземлить требуемый вывод U_1 или U_2 . Бистабильные мультивибраторы можно использовать в качестве запоминающих устройств или делителей частоты, поскольку схема возвращается в исходное состояние поочерёдными импульсами.

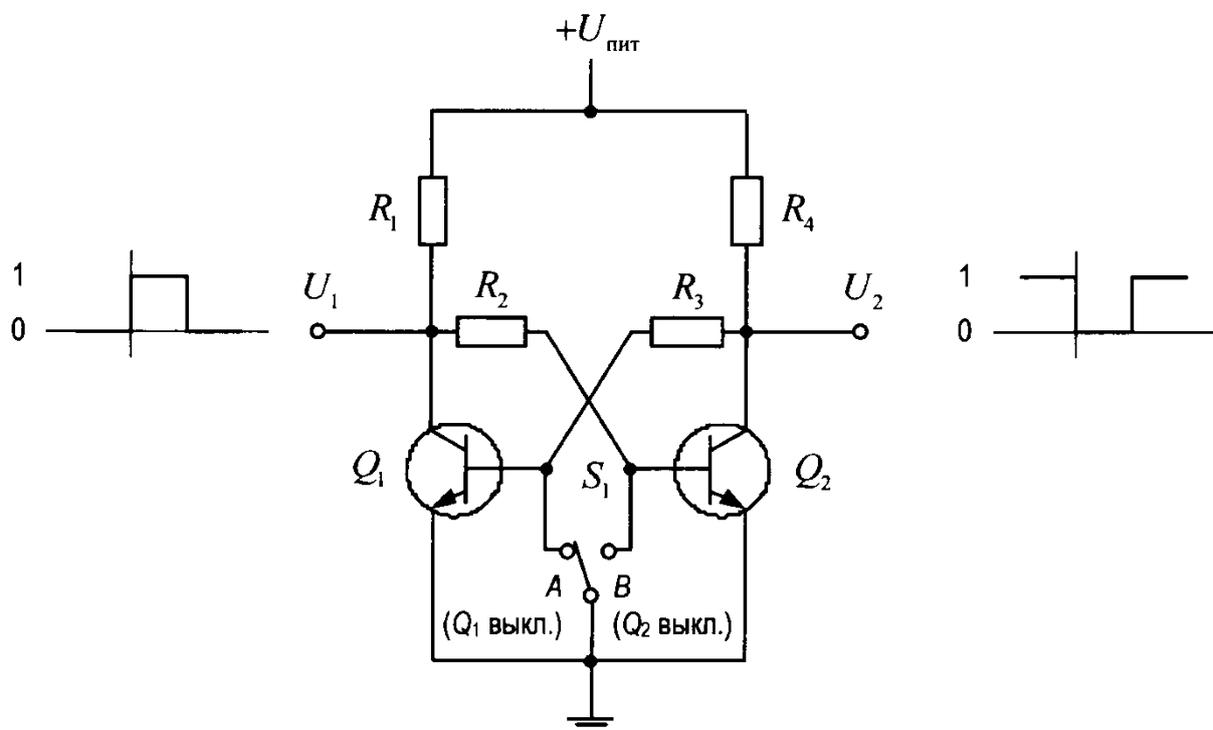


Рис. 67. Бистабильный мультивибратор

Моностабильный мультивибратор (рис. 68) обладает только одним стабильным состоянием, в данном случае это будет $U_{\text{вых}} = 0$.

Его можно перевести в нестабильное состояние ($U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}}$) кратковременным приложением управляющего сигнала, но по истечении определённого времени (определяемого параметрами контура) он автоматически возвратится обратно в стабильное состояние. В данном случае быстрспадающий фронт подаваемого на вход управляющего импульса пройдёт через конденсатор C_1 и блокирующий диод D_1 на базу транзистора Q_1 , в результате транзистор Q_1 будет включён. Напряжение на коллекторе транзистора Q_1 , которое раньше было на уровне напряжения $U_{\text{пит}}$, быстро падает до отрицательного уровня. В результате заряд конденсатора C_T меняется на противоположный, в частности на $-0,6$ В. Теперь на базе транзистора Q_2 присутствует отрицательное напряжение, которое

удерживает его в выключенном состоянии. Это состояние мультивибратора ($U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}}$) называется нестабильным. Далее конденсатор C_T начинает через резистор R_T разряжать это напряжение $-0,6$ В, пытаясь зарядиться до напряжения $U_{\text{пит}}$. Данное отрицательное напряжение на базе транзистора Q_2 спадает со скоростью, определяемой постоянной времени контура $R_T C_T$. Когда напряжение на базе транзистора Q_2 увеличивается до значения напряжения $U_{\text{пит}}$, данный транзистор включается, в результате чего транзистор Q_1 выключается снова. Таким образом, схема возвращается в исходное стабильное состояние.

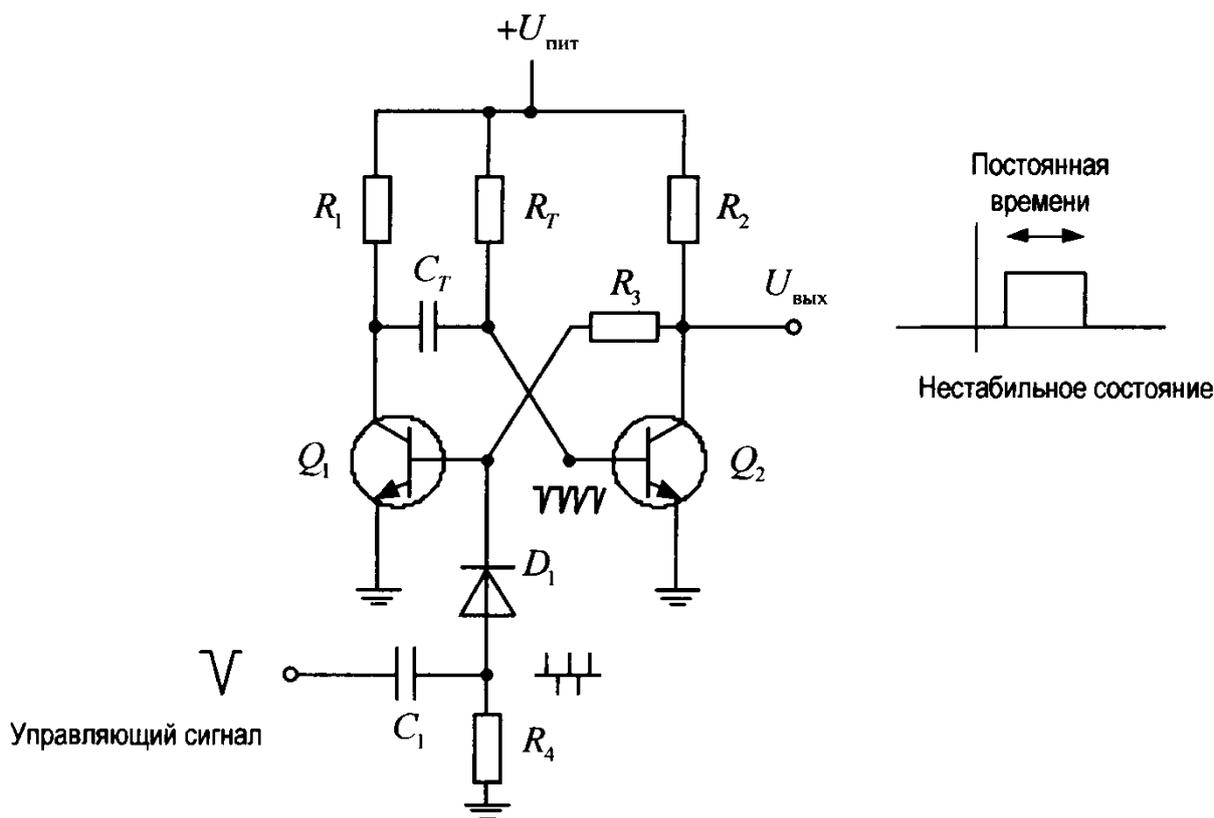


Рис. 68. Моностабильный мультивибратор

Неустойчивый мультивибратор (рис. 69) не имеет единственного стабильного состояния и работает как генератор колебаний.

Для переключения из одного выходного состояния в другое не требуется внешний управляющий сигнал. Переключение между выходными состояниями $U_{\text{пит}}$ и 0 В осуществляется посредством цепи положительной обратной связи и внутренних управляющих сигналов, создаваемых контуром RC . Таким образом, данная схема работает как генератор прямоугольных колебаний. Переключающие транзисторы Q_1 и Q_2 данной схемы и соответствующие конденсаторы временной задержки соединены в схему с перекрёстной обратной связью. Напряжение смещения транзисторов установлено для обеспечения линейной работы, и транзисторы работают как усилители с общим эмиттером со 100%-й положительной обратной связью. Когда транзистор Q_1 выключен, напряжение на его коллекторе поднимается до уровня напряжения $U_{\text{пит}}$, а транзистор Q_2 включён. При этом напряжение на обкладке A конденсатора C_1 поднимается до уровня напряжения $U_{\text{пит}}$. Напряжение на противоположной обкладке B конденсатора C_1 ,

которая подключена к базе транзистора Q_2 , составляет 0,6 В, поскольку транзистор Q_2 включён. Таким образом, напряжение на конденсаторе C_1 составляет $6 \text{ В} - 0,6 \text{ В} = 5,4 \text{ В}$. Это высокое значение заряда.

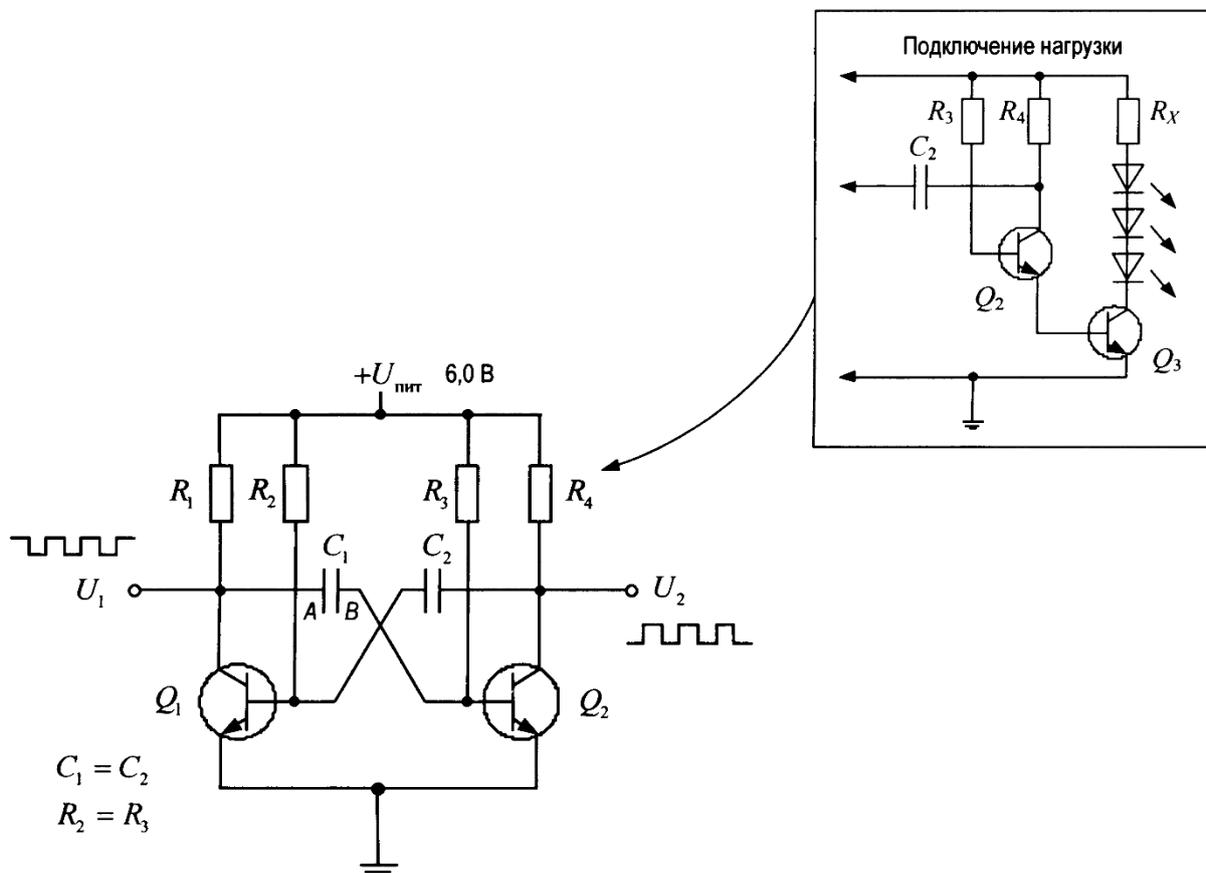


Рис. 69. Неустойчивый мультивибратор

В момент включения транзистора Q_1 напряжение на обкладке A конденсатора C_1 падает до уровня 0,6 В, мгновенно вызывая такое же падение напряжения на обкладке B конденсатора C_1 . В результате напряжение заряда на конденсаторе C_1 изменяется на обратное, т. е. $-5,4 \text{ В}$; это отрицательное напряжение резко выключает транзистор Q_2 (одно нестабильное состояние). Теперь конденсатор C_1 начинает заряжаться через резистор R_3 в обратном направлении до $+6 \text{ В}$ напряжения питания; при этом напряжение на базе транзистора Q_2 повышается до напряжения $U_{\text{пит}}$ со скоростью постоянной времени контура $C_1 R_3$. Когда напряжение на базе транзистора Q_2 достигает уровня 0,6 В, этот транзистор полностью включается, запуская весь процесс сначала. Однако теперь до напряжения $-5,4 \text{ В}$ заряжается конденсатор C_2 , подавая это напряжение через резистор R_2 на базу транзистора Q_1 , и схема переходит во второе нестабильное состояние. Данный процесс повторяется пока на схему подаётся напряжение питания. Амплитуда выходного сигнала примерно равна напряжению $U_{\text{пит}}$, а временной интервал между состояниями определяется параметрами RC -контура, подключённого к базам транзисторов. Сигналом выхода неустойчивого мультивибратора можно запитывать нагрузки с низким импедансом (токовые нагрузки), такие как светодиоды, динамики и т. п., без отрицательного воздействия на работу схемы. Для

этого в схему нужно вставить дополнительный транзистор, как показано на вставке (справа сверху) на рис. 69.

Информацию по сборке практических схем мультивибраторов можно найти в Интернете. В частности, там можно обнаружить программные средства для определения значений компонентов для требуемой частоты и периода выходного сигнала.

Логические элементы на транзисторах. Схемы на рис. 70 функционируют как логические элементы. В схеме элемента ИЛИ (рис. 70, а) на выходе (вывод С) присутствует напряжение высокого уровня, когда на любой из выводов А или В или на оба подаётся высокий уровень. Иными словами, если по крайней мере хоть один транзистор находится в режиме прямого смещения (включён), на выходе схемы будет присутствовать напряжение высокого уровня. В схеме элемента И (рис. 70, б), чтобы на выводе С присутствовало напряжение высокого уровня, высокий уровень должен подаваться одновременно на выводы А и В. Иными словами, чтобы на выходе схемы присутствовало напряжение высокого уровня, оба транзистора должны находиться в режиме прямого смещения (включены).

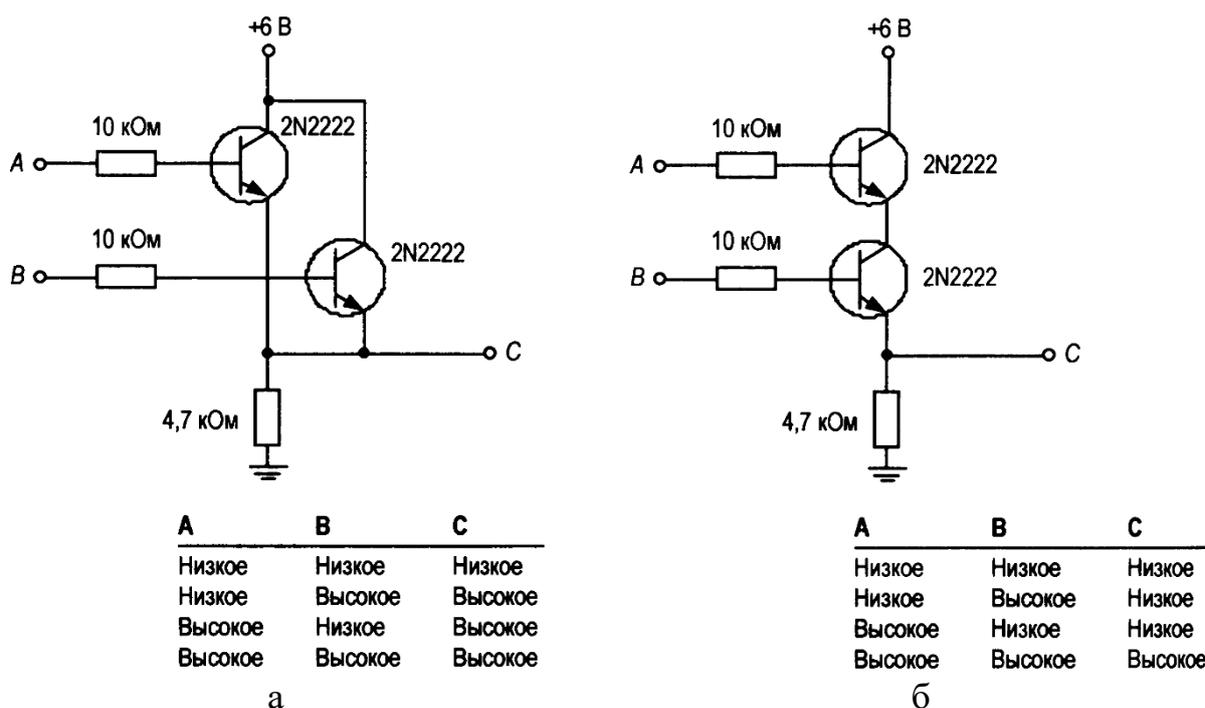


Рис. 70. Логические элементы ИЛИ (а) и И (б) на транзисторах

4.2. Полевые транзисторы с управляющим переходом

Полевые транзисторы с управляющим переходом представляют собой полупроводниковые устройства с тремя выводами, которые используются в качестве управляемых переключателей, варисторов (управляемых напряжением резисторов), а также для управления усилителями. В отличие от биполярных транзисторов полевые транзисторы управляются исключительно напряжением и не требуют тока смещения. Другое уникальное свойство полевого транзистора – он

нормально (т. е. при отсутствии разности потенциалов между затвором и истоком) включён. Но при наличии разности потенциалов между этими двумя выводами полевой транзистор начинает оказывать сопротивление (прямо пропорциональное прилагаемому напряжению) протеканию тока между стоком и истоком. По этой причине полевые транзисторы называются устройствами, работающими в условиях обеднения (носителями заряда), в отличие от биполярных транзисторов, которые являются устройствами, работающими в режиме обогащения (биполярные транзисторы оказывают меньшее сопротивление току, когда на базу подаются управляющие напряжение и ток).

Существует два типа полевых транзисторов – с *n*- и *p*-каналом. В случае полевых транзисторов с *n*-каналом управление силой протекающего между стоком и истоком тока осуществляется подаваемым на затвор отрицательным (относительно истока) напряжением. Эти транзисторы работают при $U_C > U_{и}$. А в случае полевых транзисторов с *p*-каналом управление силой протекающего между истоком и стоком тока осуществляется подаваемым на затвор положительным напряжением. Эти транзисторы работают при $U_C < U_{и}$. На рис. 71 показаны символы для обоих типов полевых транзисторов с управляющим переходом.

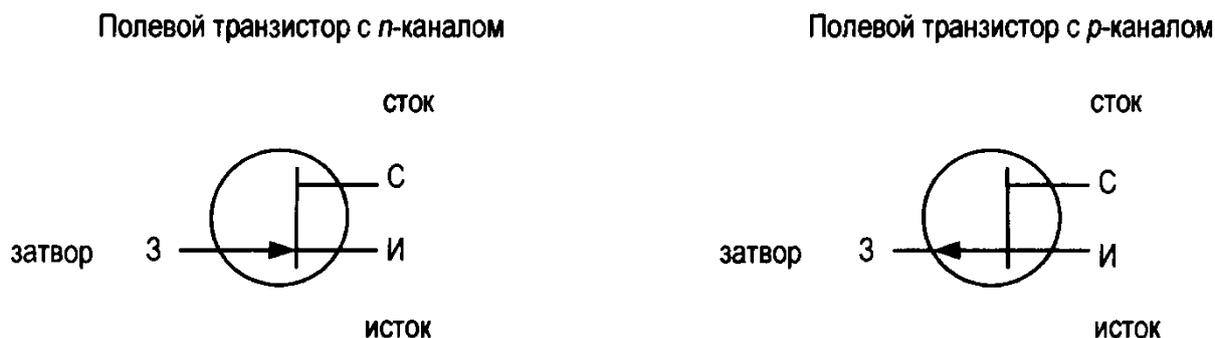


Рис. 71. Символы полевых транзисторов

Одним из важных свойств полевых транзисторов является их чрезвычайно высокий входной импеданс (обычно в районе 10^{10} Ом). Высокий входной импеданс означает, что полевой транзистор потребляет очень низкий входной ток (нижний предел пикоамперного диапазона), вследствие чего он оказывает очень незначительное влияние на внешние компоненты или схемы, подключённые к его затвору, – никакой ток не берётся из управляющей схемы и никакой нежелательный ток не попадает в неё. Способность полевого транзистора управлять силой тока, сохраняя при этом чрезвычайно высокий входной импеданс, делает его полезным устройством для применения в двунаправленных аналоговых коммутирующих схемах, входных каскадах усилителей, простых двухполюсных источниках тока, усилителях, генераторах колебаний, электронных логических ключах регулировки усиления, звуковых микшерах и т. п.

Принцип работы полевых транзисторов. Полевой транзистор с *n*-каналом состоит из канала из кремния *n*-типа, к которому примыкает с двух сторон область кремния *p*-типа. Вывод затвора подсоединён к области кремния *p*-

типа, а к двум концам канала из кремния *n*-типа подсоединены выводы истока и стока (рис. 72).

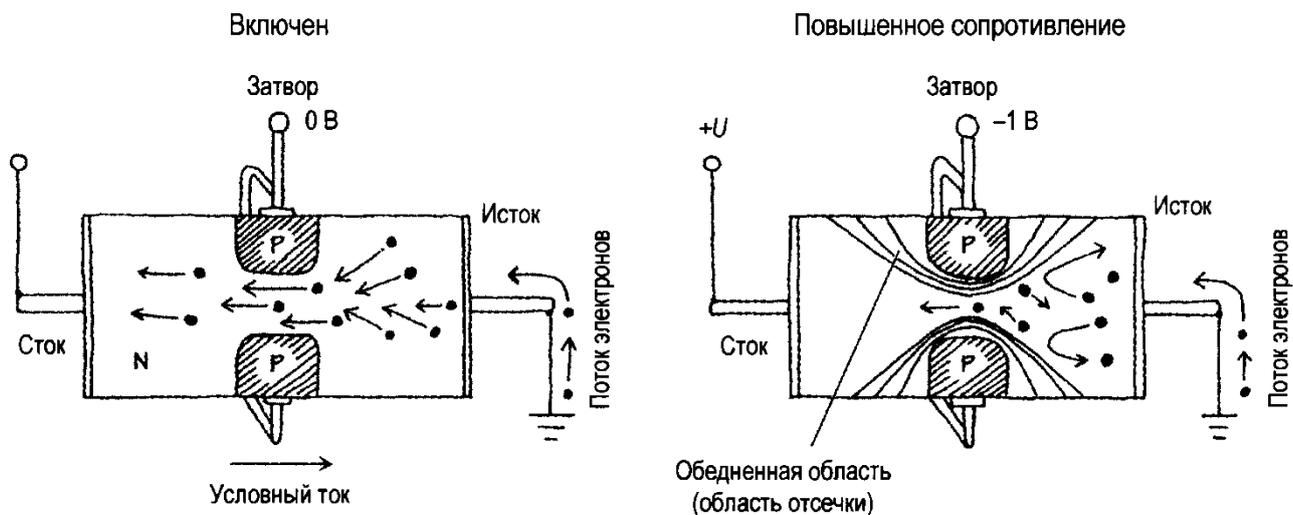


Рис. 72. Устройство и принцип работы полевого транзистора

Когда на затворе полевого транзистора с *n*-каналом отсутствует напряжение, ток свободно протекает по *n*-каналу – у электронов не возникает никаких проблем с прохождением через этот канал, который уже содержит большое количество носителей отрицательного заряда. Но если на затвор подать отрицательное (относительно истока) напряжение, в области между вкраплениями кремния *p*-типа и центром *n*-канала создаётся два обратсмещённых перехода (один около верхнего вкрапления, другой около нижнего). Под влиянием этих условий обратного смещения создаётся обеднённая область, проникающая в канал. Чем больше по абсолютной величине отрицательное напряжение на затворе, тем больше обеднённая область и тем труднее электронам проходить через канал. Для полевых транзисторов с *p*-каналом всё наоборот в том смысле, что на затвор вместо отрицательного подаётся положительное напряжение, вместо *n*-канала используется *p*-канал с вкраплениями *n*-типа вместо вкраплений *p*-типа и носители отрицательного заряда (электроны) заменяются носителями положительного заряда (дырками).

График на рис. 73 иллюстрирует работу типичного полевого транзистора с *n*-каналом. В частности, на графике отображается зависимость тока I_C стока от напряжения $U_{ЗИ}$ между затвором и истоком и напряжения $U_{СИ}$ между стоком и истоком. График для полевого транзистора с *p*-каналом подобен графику для транзистора с *n*-каналом, за исключением того, что ток I_C стока увеличивается с повышением положительного напряжения $U_{ЗИ}$. Иными словами, напряжение $U_{ЗИ}$ положительное, а $U_{СИ}$ – отрицательное.

Когда напряжение на затворе имеет ту же величину, как и на истоке ($U_{ЗИ} = U_Z - U_{И} = 0$), через полевой транзистор протекает максимальный ток. На техническом жаргоне этот ток называется начальным током стока и обозначается $I_{Снач}$. Ток $I_{Снач}$ постоянный, но конкретная величина разная для каждого отдельного полевого транзистора. Обратим внимание на то, как ток I_C стока зависит от напряжения между стоком и истоком ($U_{СИ} = U_C - U_{И}$). При небольшом

напряжении $U_{СИ}$ ток стока I_C изменяется почти в линейном соответствии изменениям этого напряжения (рассматривая кривую для определённого фиксированного напряжения $U_{ЗИ}$). Область графика, в которой это происходит, называется омической или линейной областью. В этой области полевой транзистор ведёт себя как варистор.

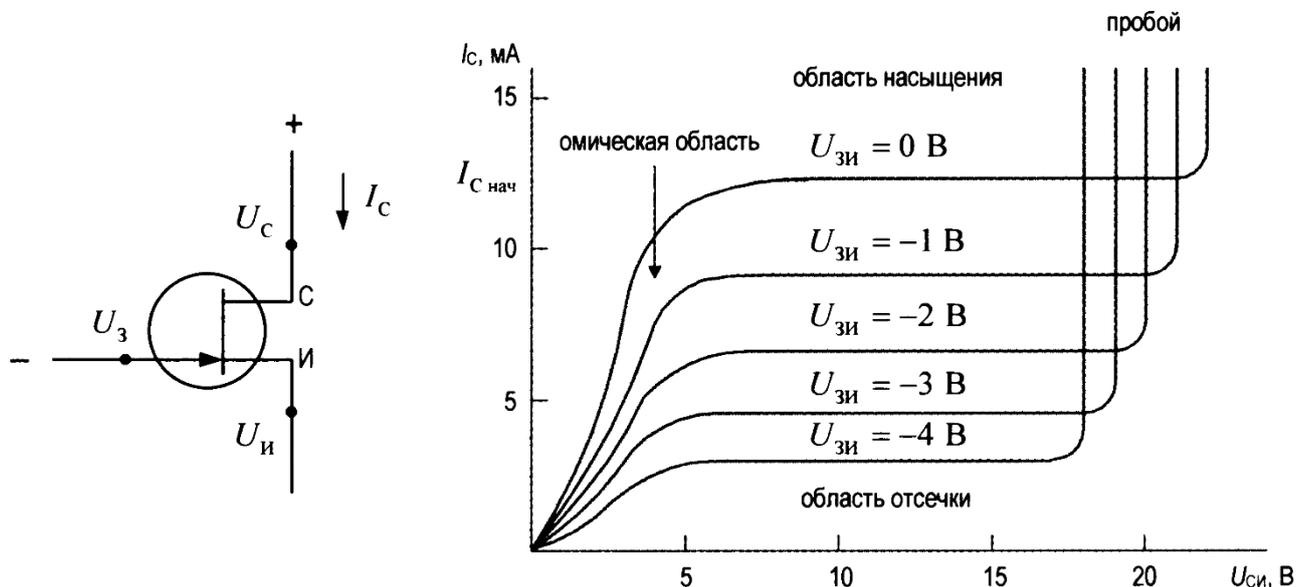


Рис. 73. График зависимости тока I_C от напряжений $U_{ЗИ}$ и $U_{СИ}$

Далее рассмотрим часть графика, где кривые выравниваются. Эта область называется активной, в ней ток I_C стока сильно зависит от напряжения между затвором и истоком $U_{ЗИ}$, но почти не зависит от напряжения между стоком и истоком $U_{СИ}$ (для наблюдения зависимости от напряжения $U_{ЗИ}$ необходимо перемещаться между кривыми).

Также следует обратить внимание на значение напряжения $U_{ЗИ}$, при котором полевой транзистор отключается (точка, в которой ток практически не протекает через устройство). Определённое значение напряжения $U_{ЗИ}$, вызывающее отключение полевого транзистора, называется напряжением отсечки и обозначается $U_{ЗИ\text{ отс}}$.

Продолжая анализ графика видно, что с возрастанием напряжения $U_{СИ}$ в определённый момент достигается точка, в которой ток I_C резко возрастает до практически вертикальной кривой. В этой точке полевой транзистор утрачивает способность препятствовать протеканию тока вследствие слишком высокого напряжения между стоком и истоком. На техническом жаргоне полевых транзисторов этот эффект называется пробоем стока-истока, а напряжение пробоя обозначается $U_{СИ\text{ проб}}$.

Типичные полевые транзисторы имеют значения тока $I_{C\text{ нач}}$ в диапазоне от 1 мА до 1 А, напряжения $U_{ЗИ\text{ отс}}$ – в диапазоне от -0,5 до -10 В для полевых транзисторов с n -каналом (или от +0,5 до +10 В для полевых транзисторов с p -каналом) и значение $U_{СИ\text{ проб}}$ – в диапазоне от 6 до 50 В.

Подобно биполярным транзисторам каналы полевых транзисторов имеют внутреннее сопротивление, которое меняется в зависимости от тока истока и

температуры. Обратная величина этого сопротивления называется крутизной характеристики полевого транзистора и обозначается S . Типичный полевой транзистор имеет крутизну характеристики в области нескольких тысяч $1/\text{Ом}$ (Ом^{-1}).

Другим внутренним параметром полевых транзисторов является сопротивление сток-исток в открытом (включённом) состоянии, обозначаемое $R_{\text{СИ отк}}$. Это сопротивление представляет внутреннее сопротивление полевого транзистора, когда он находится в состоянии полной проводимости (когда $U_{\text{зи}} = 0$). Сопротивление $R_{\text{СИ отк}}$ полевых транзисторов указывается в таблицах характеристик и обычно находится в диапазоне от 10 до 10^3 Ом.

Рассмотрим описание областей рабочих характеристик (рис. 74) и формулы (табл. 4) для вычисления рабочих параметров полевых транзисторов.

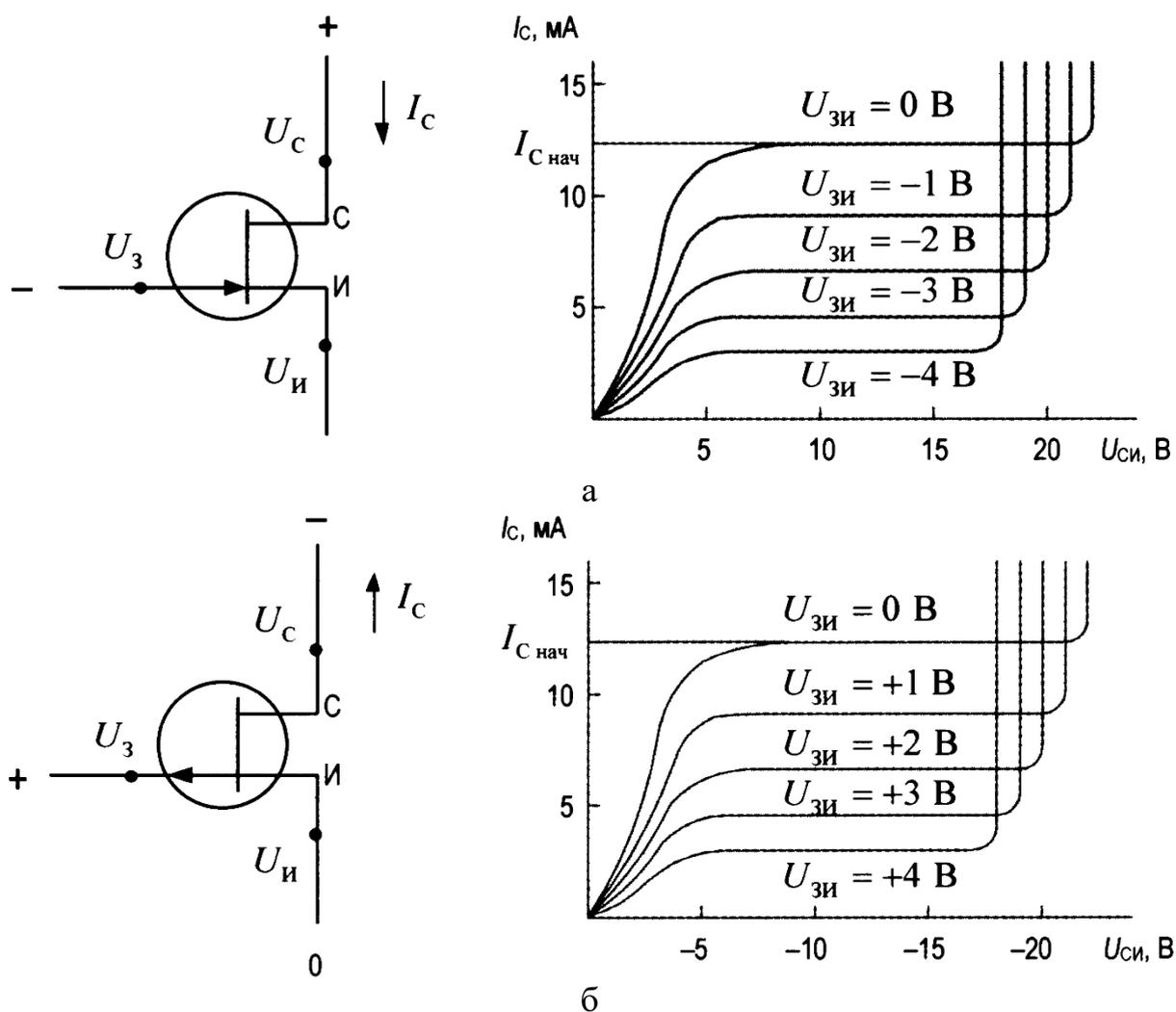


Рис. 74. Кривые зависимости тока I_c полевых транзисторов с n -каналом (а) и p -каналом (б) от напряжений на затворе и стоке

Омическая область. Полевой транзистор только начинает оказывать сопротивление протекающему через него току. В данной области он функционирует подобно варистору.

Область насыщения. В этой области полевой транзистор испытывает самое сильное воздействие напряжения затвор-исток и практически не испытывает воздействия напряжения сток-исток.

Таблица 4 – Полезные формулы

Название, формула	Описание
Ток стока (омическая область) $I_C = I_{C \text{ нач}} \left[2 \left(1 - \frac{U_{\text{ЗИ}}}{U_{\text{ЗИ отс}}} \right) \frac{U_{\text{СИ}}}{-U_{\text{ЗИ отс}}} - \left(\frac{U_{\text{СИ}}}{U_{\text{ЗИ отс}}} \right)^2 \right]$	Напряжение $U_{\text{ЗИ отс}}$ полевого транзистора с n -каналом отрицательное. Напряжение $U_{\text{ЗИ отс}}$ полевого транзистора с p -каналом положительное
Ток стока (активная область) $I_C = I_{C \text{ нач}} \left(1 - \frac{U_{\text{ЗИ}}}{U_{\text{ЗИ отс}}} \right)^2$	Параметры $U_{\text{ЗИ отс}}$ и $I_{C \text{ нач}}$ обычно известны (из таблицы параметров справочника или справочного листка устройства)
Сопротивление сток-исток $R_{\text{СИ}} = \frac{U_{\text{СИ}}}{I_C} \approx \frac{U_{\text{ЗИ отс}}}{2I_{C \text{ нач}} (U_{\text{ЗИ}} - U_{\text{ЗИ отс}})} = \frac{1}{S}$	
Сопротивление во включённом состоянии $R_{\text{СИ отк}} = \text{const}$	
Напряжение сток-исток $U_{\text{СИ}} = U_C - U_{\text{И}}$	Типичные параметры полевого транзистора: 1) $I_{C \text{ нач}}$ от 1 мА до 1 А; 2) $U_{\text{ЗИ отс}}$ от -0,5 до -10 В (n -канал), от 0,5 до 10 В (p -канал); 3) $R_{\text{СИ отк}}$ от 10 до 1000 Ом; 4) $U_{\text{СИ проб}}$ от 6 до 50 В; 5) S (при 1 мА) от 500 до 3000 мкСм
Крутизна характеристики полевого транзистора $S = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_{\text{ЗИ}}} \right _{U_{\text{СИ}}} = \frac{1}{R_{\text{СИ}}} = S_0 \left(1 - \frac{U_{\text{ЗИ}}}{U_{\text{ЗИ отс}}} \right) = S_0 \sqrt{\frac{I_C}{I_{C \text{ нач}}}}$	
Крутизна характеристики полевого транзистора для короткозамкнутого затвора $S = \left \frac{2I_{C \text{ нач}}}{U_{\text{ЗИ отс}}} \right $	

Напряжение отсечки ($U_{\text{ЗИ отс}}$). Определённое напряжение, при котором полевой транзистор функционирует подобно разрыву в цепи (сопротивление канала максимальное).

Напряжение пробоя ($U_{\text{СИ проб}}$). Напряжение между стоком и истоком, вызывающее пробой (практически полное отсутствие сопротивления протеканию тока) в канале полевого транзистора.

Начальный ток стока ($I_{C \text{ нач}}$). Ток стока при нулевом напряжении затвор-исток (или при подсоединённом к стоку затворе, $U_{\text{ЗИ}} = 0$).

Крутизна характеристики полевого транзистора (S). Скорость изменения тока стока в зависимости от изменения напряжения затвор-исток при

определённом фиксированном значении напряжения $U_{СИ}$. Аналогично взаимной проводимости ($1/r_{пс}$) биполярных транзисторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённый в данной работе материал знакомит студентов с наиболее распространёнными типами элементов и компонентов, используемых в электронике. Учебное пособие также даёт представление об основных способах и приёмах построения типовых электронных функциональных узлов.

Без этих сведений затруднено освоение более сложных разделов, связанных с применением микросхем с большой степенью интеграции. Кроме того, знания, полученные после внимательного прочтения пособия, должны помочь самостоятельному изучению принципа действия и свойств вновь появляющихся компонентов электроники и создаваемых впервые функциональных узлов и устройств.

Эта область знаний развивается очень быстро, и чтобы безнадежно не отстать, специалист должен непрерывно осваивать новые разделы. При этом обычно требуется знание основ электроники и наличие определённого технического кругозора. Даже в процессе создания электронных устройств на основе интегральных схем, которые представляют собой решения скорее системотехнической, чем схемотехнической задачи, необходимы знания о принципах работы отдельных электронных схем.

При любых изменениях в области электроники, которые могут произойти в ближайшем будущем, сохранится важность вопросов понимания физических процессов, происходящих в типовых электронных цепях.

После прочтения данного пособия студенты смогут достаточно свободно пользоваться специальной литературой и решать несложные задачи в области создания электронных устройств целевого назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Остроумов Б. А. В. И. Ленин и Нижегородская радиолaborатория: История лаборатории в документах и материалах / АН СССР. Ин-т истории естествознания и техники. Науч.-техн. о-во им. А. С. Попова. Центр. музей связи им. А. С. Попова. – Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1967. – 407 с.
2. Миловзоров О. В. Электроника [Текст]: учебник для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2013. – 407 с. – Серия: Бакалавр. Базовый курс.
3. Водовозов А. М. Основы электроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А. М. Водовозов. – Электрон. текстовые данные. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 140 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/51731.html>.
4. Никитин Ю. А. Электроника и схемотехника. Полупроводниковые диоды [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю. А. Никитин. – СПб. Лань, 2022. – 69 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/279290>.
5. Аполлонский С. М. Электрические аппараты автоматики [Электронный ресурс]: учеб. пособие / С. М. Аполлонский, Ю. В. Куклев. – СПб. Лань, 2022. – 228 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/206732>.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
1. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР	2
2. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	3
2.1. Электрофизические свойства полупроводников	3
2.2. Применение кремния	7
3. ДИОДЫ	8
3.1. Принцип работы диодов с <i>p-n</i> -переходом	8
3.2. Типы диодов	11
3.3. Практические рекомендации	13
3.4. Применение выпрямительных диодов	14
3.5. Стабилитроны	29
3.6. Применение стабилитронов	32
3.7. Варакторы (параметрические диоды)	36
3.8. <i>PIN</i> -диоды	38
3.9. Микроволновые диоды	39
4. ТРАНЗИСТОРЫ	40
4.1. Биполярные транзисторы	43
4.2. Полевые транзисторы с управляющим переходом	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	79