



Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

Элементная база электронных компонентов РЭС



Томск 2018

Кобрин Юрий Павлович

Элементная база электронных компонентов РЭС. Учебное пособие к курсовому проектированию по дисциплине «Автоматизированное проектирование РЭС» для студентов специальности «11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств». - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), кафедра КИПР, 2018. – 64 с.

Чтобы сокращение срока обучения на один год (по сравнению со специалитетом) в меньшей мере сказывалось на уровне и качестве подготовке выпускника профиля «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», способного компетентно решать весь комплекс проблем разработки систем, схем, конструкций и технологий в сфере электронного приборостроения, необходимы учебные пособия, в сжатом виде, но в то же время достаточно полно отражающие эти проблемы.

Рассмотрены вопросы анализа электронных компонентов проекта радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения и выбора заменяющих аналогов. Рассмотрены также вопросы формирования библиотеки электронных компонентов САПР.

Учебное пособие предназначено для помощи в подготовке бакалавров и магистрантов в области разработки и исследования РЭС различного назначения, выполнения курсовых и дипломных проектов, но может быть использовано и студентами других специальностей радиотехнического профиля.

©Кафедра КИПР федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)», 2018.

© Кобрин Ю.П. 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1	Элементная база проекта РЭС	3
1.1	Анализ и выбор ЭРЭ	3
1.1.1	Зачем необходимо проводить анализ элементной базы проекта?	3
1.1.2	Основные характеристики ЭРЭ	5
1.1.3	Ручная и автоматизированная сборка	6
1.1.4	Использование импортных и отечественных электронных компонентов.....	7
1.1.5	Использование СБИС и ПЛИС	9
1.2	Проверка режимов эксплуатации ЭРЭ	10
1.3	Обеспечение надёжности РЭС	10
1.4	Оформление результатов анализа и выбора ЭРЭ проектируемого РЭС.....	13
1.5	Особенности установки ЭРЭ, различающихся по способу монтажа	15
1.5.1	Классификация ЭРЭ по способу монтажа	15
1.5.2	Радиоэлементы с выводами	15
1.5.3	Поверхностный монтаж.....	18
1.5.4	Монтаж интегральных микросхем с BGA выводами	22
1.5.5	Смешанный монтаж.....	24
2	Формирование библиотеки электронных компонентов САПР	24
3	Поиск аналогов радиоэлементов	25
3.1	Некоторые советы по выбору заменяющих ЭРЭ	25
3.2	Электрические соединители	25
3.3	Выключатели и переключатели	29
3.4	Резисторы.....	33
3.5	Конденсаторы.....	38
3.6	Диоды	44
3.7	Тиристоры	53
3.8	Оптроны	56
3.9	Транзисторы.....	57
3.10	Микросхемы	59
4	Список литературы.....	60

1 Элементная база проекта РЭС

1.1 Анализ и выбор ЭРЭ

1.1.1 Зачем необходимо проводить анализ элементной базы проекта?

Современные радиоэлектронные средства изготавливаются на базе электрорадиоэлементов¹ (ЭРЭ), номенклатура которых насчитывает тысячи наименований, типов и типовых размеров. Качество и надёжность РЭС, их основные технические характеристики, устойчивая и безаварийная работа в условиях различных дестабилизирующих факторов, наравне с применением передовых технологий изготовления РЭС, во многом определяются используемыми ЭРЭ.

Элементная база проекта РЭС – это совокупность ЭРЭ, соединяемых в ходе электрического монтажа данного РЭС. В неё могут входить резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, цифровые и аналоговые микросхемы, трансформаторы, реле, переключатели, тумблеры, кнопки, индикаторы, предохранители, электронные лампы и др.

Состав элементной базы проекта можно определить в ходе анализа исходной **схемы электрической принципиальной** разрабатываемого РЭС [1,2]. Она даёт представление о принципах работы РЭС в объёме, достаточном для его проектирования, изготовления и эксплуатации. На принципиальной схеме изображают лишь электрические взаимосвязи выводов определённого ЭРЭ с выводами прочих ЭРЭ, но взаимного (физического) расположения элементов, выводов и соединений не показывают.

Любая электрическая схема состоит из **условных графических обозначений** (УГО) различных элементов и устройств, а также связей между ними [2,3]. Форма и размеры УГО определены стандартами ЕСКД [4,5,6,7] и их следует соблюдать при вычерчивании схем. Заметим, что УГО зарубежных компонентов электронных схем и их позиционные обозначения [8,9,10] выполняют по международным и национальным стандартам IEC², ANSI³ и другим, которые в большинстве случаев не совпадают с изображениями УГО в отечественных стандартах.

Условные графические обозначения образуются из простых геометрических фигур: квадратов, прямоугольников, окружностей, а также из сплошных и штриховых линий и точек. Их сочетание по специальной системе, которая предусмотрена стандартом, даёт возможность легко изобразить все, что требуется: различные электрические аппараты, приборы, электрические машины, линии механической и электрической связей, виды соединений обмоток, род тока, характер и способы регулирования и т. п. Все правильные услов-

¹ **Электрорадиоэлемент, электронный компонент, радиоэлемент, радиодеталь** (англ. *Electronic components, radio components*) - структурный элемент электронного устройства, имеющий вид законченного изделия, как правило неразборного.

² **IEC** (от англ. *International Electrotechnical Commission*) - **международная электротехническая комиссия (МЭК)** по стандартизации в области электрических и электронных технологий, в которую в настоящее время входят 83 страны (в том числе и Россия).

³ **ANSI** (от англ. *American national standards institute*) — американский национальный институт стандартов.

ные графические обозначения элементов электрических схем и их отдельных частей приводятся в виде таблиц в стандартах. Кроме этого в условных графических обозначениях на электрических принципиальных схемах дополнительно используются специальные знаки, поясняющие особенности работы того или иного элемента схемы.

Знать назначения УГО и умение читать схемы электрические принципиальные - непременное условие успешной работы специалиста, разрабатывающего РЭС.

Для любого электронного компонента схемы электрической принципиальной проектируемого РЭС определены позиционное обозначение⁴ [2,6], имя образа в базе данных используемой САПР печатного монтажа (условного графического обозначения и посадочного места) [11,12,13,14,15,16,17,18], координаты размещения, угол поворота при размещении, вариант установки.

Анализ и выбор элементной базы является одним из важнейших этапов обеспечения качества проектируемого РЭС:

- часто исходная схема электрическая принципиальная содержит информацию только о типах и номиналах используемых ЭРЭ и неясно, соответствуют ли они условиям эксплуатации, оговорённых в техническом задании;

- нередко по электрическим параметрам ЭРЭ удовлетворяют конструктора, а по условиям эксплуатации - нет (например, невозможна его установка на печатную плату⁵ (ПП), конструкция ЭРЭ не обеспечивает достаточную защиту от неблагоприятных внешних воздействий и т.п.).

При обнаружении несоответствия нужно либо найти подходящий аналог ЭРЭ, либо предложить оптимальный метод обеспечения нормальных условий его функционирования на основе принятия необходимых конструктивных решений.

В ходе обязательного анализа элементной базы, проектируемого РЭС должны быть установлены, рассмотрены и предприняты все меры к неукоснительному выполнению всех требований технического задания (ТЗ):

- на совместимость ЭРЭ по электрическим, конструктивным, электромагнитным, тепловым и другим параметрам;
- на совместимость ЭРЭ по надёжности;
- на соответствие ЭРЭ условиям эксплуатации, хранения и транспортировки.

⁴ **Позиционное обозначение** (англ. *reference designator, component ID*) – обязательное обозначение, присваиваемое каждой части схемы электрической принципиальной РЭС, содержащее информацию о виде электронного компонента и его номере в соответствии с ГОСТ 2.710 [5].

⁵ **Печатная плата** (англ. *printed circuit board, PCB*, или *printed wiring board, PWB*) — пластина из диэлектрика, на поверхности и/или в объёме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы. Печатная плата предназначена для электрического и механического соединения различных электронных компонентов.

1.1.2 Основные характеристики ЭРЭ

Основными характеристиками ЭРЭ, которые следует проанализировать на соответствие ТЗ в первую очередь, являются:

1. Электрические параметры:

- номинальные значения параметров ЭРЭ согласно схеме электрической принципиальной устройства;
- допустимые отклонения величин ЭРЭ от их номинальных значений;
- допустимые и реальные рабочие токи, и напряжения ЭРЭ;
- допустимое рассеивание мощности ЭРЭ;
- диапазон рабочих частот ЭРЭ;
- коэффициенты электрической нагрузки ЭРЭ (запаса по току, напряжению и рассеиваемой мощности).

2. Допустимые эксплуатационные параметры:

- работоспособность в диапазоне рабочих температур и иных климатических факторов заданного климатического исполнения;
- устойчивость против вибрационных и ударных нагрузок, характеризующих объект установки;
- конструктивная и технологическая совместимость всех типов элементов, используемых в конструкции РЭС;
- совместимость технологических процессов и монтажа ЭРЭ, возможность их автоматической установки и другие показатели.

В зависимости от назначения РЭС этот выбор следует осуществлять с учётом приоритетных показателей качества (надёжность, минимальная стоимость, масса и габариты, высокие технологичность и т.д.) при выполнении всех ограничений.

Устойчивость работы РЭС зависит от эксплуатационной надёжности элементной базы, которая во многом определяется не только схемной надёжностью выбранных ЭРЭ, но и использованием их в режимах, не превышающих допустимые.

Для удешевления проектируемого РЭС разумно в первую очередь применять покупные *стандартные и унифицированные элементы*, а также другие изделия массового или серийного производства. Применение принципов стандартизации и унификации при конструировании РЭС позволяет получить следующие преимущества:

- значительно сократить сроки и стоимость проектирования;
- сократить на предприятии изготовителе номенклатуру применяемых деталей и сборочных единиц, увеличить применяемость и масштаб производства;
- исключить разработку специальной оснастки и специального оборудования для каждого нового варианта РЭС, т.е. упростить подготовку производства;
- создать специализированное производство стандартных и унифицированных сборочных единиц для централизованного обеспечения предприятий;
- улучшить эксплуатационную и производственную технологичность;
- снизить себестоимость выпускаемого изделия.

Электрические, конструктивные и другие параметры, а также условия эксплуатации ЭРЭ приводятся в многочисленных справочниках [19,20,21,22,23,24,25,26,27,28].

Справочные данные, технические условия⁶ на ЭРЭ (а на импортные ЭРЭ - *datasheet*⁷) несложно найти в Интернете с помощью широко известных поисковых систем:

1) <https://www.yandex.ru/> - осуществляет поиск информации в интернете с учётом русской морфологии и возможностью регионального уточнения;

2) <https://www.google.ru/> - первая по популярности, крупнейшая мультиязычная поисковая система Интернета, принадлежащая корпорации *Google Inc.*, занимающая более 60 % мирового рынка.

3) Обновляемые справочники по отечественным электронным компонентам с техническими условиями содержатся, например, на сайте <http://trzrus.narod.ru/> [29], а также сайтах интернет-магазинов радиодеталей: <http://www.platan.ru> [30], <http://www.chipdip.ru/> [31], <http://www.dart.ru/cataloguenew/catalogue.shtm> [32] и других.

Обстоятельный список отечественных и зарубежных аналогов радиоэлементов, а также обзор ресурсов сети Интернет по электронным компонентам приведён в [33].

1.1.3 Ручная и автоматизированная сборка

Важнейшим направлением при производстве РЭС является снижение себестоимости сборки и монтажа печатных плат при поддержании стабильно высокого уровня качества. Способ установки компонентов на печатную плату во многом определяет экономичность и производительность этого процесса.

При ручном монтаже на монтажника могут воздействовать различные вредные для здоровья факторы: повышенная загазованность воздуха химическими испарениями, брызги флюсов и припоев, повышенная температура воздуха рабочей зоны (Рис. 1.1, а).

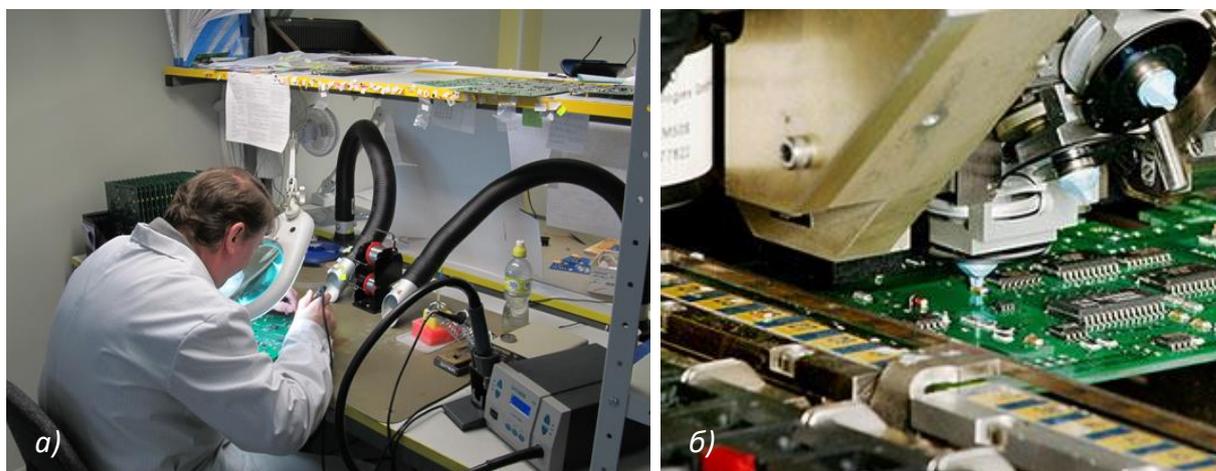


Рис. 1.1 - Монтаж печатного узла: а) - ручной, б) - автоматический

⁶ **Технические условия (ТУ)** — документ, устанавливающий технические требования, которым должны удовлетворять конкретное изделие, материал, вещество и пр.

⁷ **Datasheet** (англ.) - официальный документ от зарубежного производителя (например, электронных компонентов), в котором приводятся описание, параметры, технические характеристики изделия, типовые схемы и т.д.

Крайне важно проводить такие работы в специально подготовленных помещениях, обязательно оборудованных системой вентиляции. Ручной монтаж малопроизводителен, его качество во многом зависит от уровня профессионализма и опыта монтажника, поэтому такой способ применяется обычно при единичном и мелкосерийном производстве, а также в особо сложных случаях, когда автоматизированный монтаж невозможен.

Современные высокопроизводительные автоматические и полуавтоматические системы монтажа (Рис. 1.1, б) бывают двух видов: установщики компонентов и автоматы для пайки. Такие системы снижают затраты на производство, обеспечивают более высокое качество: надёжность, высокую точность монтажа миниатюрных элементов, автоматический контроль и др. Так как размеры ЭРЭ для поверхностного монтажа крайне малы, то их установка и монтаж практически осуществляются чаще всего с помощью автоматизированных и полуавтоматизированных способов установки элементов и использования групповых методов пайки (например пайке «волной», в печах конвекционной пайки и др.) [34,35]). Ручной способ при монтаже ЭРЭ на поверхность используется редко, в основном для выполнения ремонта или макетирования. Заметим, что для монтажных автоматов выводы ЭРЭ должны предварительно отформованы, а безвыводные ЭРЭ часто поставляются вклеенными в ленту, намотанную на бобину или упакованную в магазин-коробку.

По сравнению с ручной пайкой применение для установки радиокомпонентов автоматического способа монтажа обеспечивает более высокую производительность и позволяет исключить человеческий фактор, что во много раз снижает количество ошибок.

1.1.4 Использование импортных и отечественных электронных компонентов

Из-за объективного резкого сокращения объёмов выпуска отечественных ЭРЭ, отставания отечественных ЭРЭ от зарубежных как по техническому уровню, так и по технико-экономическим показателям, в новых разработках и в серийном производстве в настоящее время широко применяются электронные компоненты (электрорадиоэлементы и детали аппаратуры) зарубежных производителей.

Ситуация в области создания и применения импортной элементной базы для существующих и разрабатываемых образцов военных, космических и других РЭС специального назначения стала выходить из-под контроля и становиться угрозой национальной безопасности страны. Поэтому в последнее время Российское правительство стало уделять самое серьёзное внимание проблеме воссоздания и развития отечественной электронной элементной базы на уровне лучших мировых стандартов. К сожалению, пока ещё электронная промышленность России не в полной мере обеспечивает потребности в высококачественных отечественных ЭРЭ [36]. Отсутствие серийно выпускаемых ЭРЭ или несоответствие их параметров необходимому техническому уровню приводит к необходимости применения иностранных ЭРЭ с неизвестным качеством.

Использование современной отечественной элементной базы [37,38] (например, микропроцессоров серий «Эльбрус» и «Байкал») (Рис. 1.2) обеспечивает гарантию невозможности несанкционированных аппаратных закладок⁸ в РЭС. С такими закладками импортные ЭРЭ могут просто не заработать в нужный момент или представлять угрозу государственной и коммерческой тайне.



Рис. 1.2 - Кристалл отечественного микропроцессора «Эльбрус-8С» компании МЦСТ спроектирован по технологии 28 нм, имеет 8 процессорных ядер.

Важнейшая особенность ряда отечественных процессоров «Эльбрус» - заложенный в их архитектуру принцип явного параллелизма операций. Это даёт возможность выполнять на каждом ядре до 25 операций за один машинный такт, что обеспечивает высокую производительность (250 гигафлопс операций над числами с плавающей точкой) даже при сравнительно низкой тактовой частоте (1300 МГц) и позволяет строить на их основе суперкомпьютеры.

В стадии отладки 16-ядерный «Эльбрус-16С» (6 миллиардов транзисторов) с производительностью 750 Гфлопс двойной точности (64 бит) и 1500 Гфлопс одинарной точности (32 бит), заявленный техпроцесс — 16 нм.

Ещё более актуален вопрос о надёжности: приобретение самой современной и самой необходимой высококачественной импортной элементной базы для России как правило закрыто, а «обычную» импортную элементную базу нужно проверять, проводить сертификационные испытания, отчего цена на такие элементы выше в среднем в 3-5 раз.

⁸ **Аппаратная закладка** (англ. *hardware Trojan, hardware backdoor*) - устройство в электронной схеме, скрытно внедряемое к остальным элементам, которое способно вмешаться в работу компьютерной системы. С помощью аппаратной закладки система может быть либо полностью выведена из строя, либо нарушено её нормальное функционирование (несанкционированный доступ к информации, её изменение или блокирование).

Часто аппаратную закладку реализуют с помощью отдельной микросхемы, подключаемую злоумышленниками к атакуемой системе для достижения тех же целей (например, в микросхему BIOS, в процессоры, в прошивки жёстких дисков, сетевых карт и т.д.).

Кстати, практика показывает, что отказов по отечественной элементной базе гораздо меньше, чем по импортной, да и стоят они существенно дешевле [39]. По некоторым оценкам, современная отечественная элементная база, внедрённая в российские космические аппараты, в 2-3 раза увеличила срок их активного существования на орбите Земли [40].

При проектировании РЭС, работающих в экстремальных условиях эксплуатации (космическое пространство, земные недра, мониторинг обстановки вблизи источников излучений ядерных объектов, физические эксперименты, стихийные бедствия) и в специальной технике (системы антитеррора и контроля за перемещением наркотиков, системы экологического мониторинга, системы раннего предупреждения и ликвидации последствий техногенных катастроф), необходимо использовать высоконадёжную элементную базу специального применения (с военной приёмкой), с гарантированной стойкостью к дестабилизирующим воздействиям (особенно к действию космической радиации) [41].

В военных, правительственных и других ответственных системах импортной элементной базы, как правило, не должно быть вообще.

Рекомендуется везде, где это возможно, использовать отечественные аналоги импортных электрорадиоэлементов.

1.1.5 Использование СБИС и ПЛИС

Разработка и использование специализированных сверхбольших интегральных схем (СБИС) позволяет большинство сборочных операций при выпуске РЭС заменить на процессы интеграции элементов при изготовлении электронной компонентной базы со сложнейшими функциями. Появилась возможность создавать СБИС, которые исполняют роль сложных блоков и узлов РЭС или даже полностью реализуют все функции РЭС одной сверхбольшей интегральной схемой - «системой на кристалле» (англ. *System-on-a-Chip, SoC*) [42], например, однокристалльный компьютер, телевизор, телефон и т.п.

Ещё большие перспективы открывает использование программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). **Программируемая логическая интегральная схема** (англ. *programmable logic device, PLD*) - электронный компонент, состоящий из наборов логических блоков и вентилях, используемый для создания цифровых интегральных схем. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не установлена при изготовлении, а задаётся путём программирования, что удобно для быстрого проектирования мелкосерийных специализированных электронных устройств. Для программирования ПЛИС используются *программатор и отладочные среды*⁹, позволяющие задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры: *Verilog, VHDL, AHDL* [43] и др.

⁹ **Программаторы и отладочные среды** (например, NanoBoard [65]) позволяют задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры: *Verilog, VHDL, AHDL* и др.

В настоящее время ПЛИС рассматриваются как наиболее перспективная элементная база для построения цифровой аппаратуры разнообразного назначения. На основе ПЛИС могут быть изготовлены небольшие процессоры, микропрограммные устройства управления, периферийные контроллеры и другие логические блоки и системы.

Появляются и новые возможности исполнения на программируемых микросхемах аналоговых и аналого-цифровых устройств.

1.2 Проверка режимов эксплуатации ЭРЭ

Проверка правильности выбора ЭРЭ выполняется сравнением приведённых в технических условиях и в многочисленных справочниках по радиоэлектронной аппаратуре [25,28,20,24,44] допустимых режимов эксплуатации компонентов (по мощности, напряжению, току, частоте, параметрам импульсного режима и т.п.) с их действующими электрическими нагрузками, указанными в ТЗ на разработку РЭС или полученными расчётным путём с помощью схемотехнических (например, *Microcap* [45], *PSPICE* [46]) или интегрированных САПР (например, *Altium Designer* [13,14,15], *OrCAD* [47]). Это даёт возможность конструктору выполнить расчёт надёжности РЭС и сделать обоснованные предложения о дальнейших шагах по конструированию РЭС.

1.3 Обеспечение надёжности РЭС

Под **надёжностью** понимают свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может оцениваться средним временем наработки на отказ, интенсивностью отказов, работоспособностью, долговечностью, безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью или определёнными сочетаниями этих свойств. Знание этих характеристик, умение их рассчитывать и правильно применять в высокой степени позволят повысить эффективность эксплуатации РЭС.

Основные термины и определения надёжности любой техники установлены действующими стандартами ГОСТ 27.002-2015 [48] и ГОСТ Р 27.002-2009 [49], применимыми на всех этапах жизненного цикла РЭС: проектирования, производства, испытаний, эксплуатации и ремонта.

Наибольшее влияние на надёжность РЭС оказывает надёжность и количество используемых в ней элементов. Надёжность является одним из основных показателей качества РЭС, поэтому при его проектировании обязателен её расчёт, на основе которого делают выводы о правильности выбранной схемы и конструкции. Для оценки надёжности РЭС пользуются **показателями надёжности**, представляющими собой количественные характеристики одного или нескольких свойств (Таблица 1.1).

На практике в первую очередь обычно рассчитывают единичные показатели из группы безотказности, а при необходимости – показатели из группы ремонтпригодности.

Таблица 1.1 – Определения базовых показателей надёжности

Показатель	Определение
Единичный показатель надёжности	Показатель, который характеризует одно из свойств, составляющих надёжность РЭС
Отказ	Потеря способности РЭС выполнить требуемую функцию, т.е. Приводит его к состоянию неисправности
Работоспособность	Состояние РЭС, в котором он способен выполнять требуемые функции, соответствующие требованиям, установленным в документации на него.
Долговечность	Способность РЭС выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования (климатических, технических или экономических и др.) И технического обслуживания
Безотказность	Свойство РЭС непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения
Ремонтопригодность	Способность РЭС при данных условиях использования и технического обслуживания (ремонта) к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнить требуемую функцию
Сохраняемость	Способность РЭС выполнять требуемую функцию в течение и после хранения и (или) транспортирования, в результате которых (например, колебаний температуры, действия влажности, вибраций) объект может оказаться в неработоспособном состоянии
Вероятность безотказной работы в течение заданного интервала времени	Вероятность того, что в пределах заданной наработки или заданном интервале времени отказ объекта не возникает.
Средняя наработка на отказ	Средняя продолжительность работы восстанавливаемого РЭС между отказами, показывающая - какая наработка в среднем приходится на один отказ.
Интенсивность отказов	Отношение числа отказавших объектов (образцов аппаратуры, изделий, деталей, механизмов, устройств, узлов и т.п.) В единицу времени к среднему числу объектов, исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие объекты не восстанавливаются и не заменяются исправными. Другими словами, интенсивность отказов численно равна числу отказов в единицу времени, отнесённое к числу узлов, безотказно проработавших до этого времени.

На начальных стадиях проектирования РЭС, когда ещё не выбраны типы и эксплуатационные характеристики ЭРЭ, не разработана его конструкция и не исполнены конструкторские расчёты (теплового режима, защиты от механических воздействий и т.п.) **обязательно** необходимо выполнить **ориентировочный расчёт надёжности**, так как при его неудовлетворительных результатах нет смысла проводить дальнейшее проектирование без дополнительных исследований. На заключительных стадиях проектирования РЭС, когда типы элементов уже выбраны, произведены расчёты тепловых режимов, виброзащитности и т.п. выполняют **уточнённый расчёт** [50].

При расчётах надёжности необходимо помнить, что интенсивности отказов ЭРЭ существенно зависят от режима работы ЭРЭ и, прежде всего, от коэффициентов электрической нагрузки, характеризующих степень электрической нагруженности элементов относительно их номинальных (предельных возможностей), указываемых в технических условиях.

Количественно коэффициенты электрической нагрузки определяют по соотношению:

$$K_H = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}, \text{ где}$$

$F_{\text{раб}}$ - электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме на рассматриваемом схемном элементе;

$F_{\text{ном}}$ - номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента, выполняющего в конструкции функцию схемного элемента.

Для повышения надёжности РЭС рекомендуется рабочий режим электрорадиоэлементов по току, напряжению и мощности выбирать с коэффициентом запаса не более $K_3 = 0,7$ от справочного. Снижение коэффициента нагрузки с единицы до 0,7...0,8 существенно уменьшает интенсивность отказов РЭС (иногда в 5 - 10 раз). Полученные в результате анализа работы схемы РЭС схемотехническими САПР значения протекающих токов в цепях, падения напряжения и мощности на ЭРЭ, позволяют выбрать их с оптимальными коэффициентами электрической нагрузки, что даёт возможность спроектировать РЭС с заданной надёжностью (Таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Оптимальные коэффициенты запаса для ЭРЭ

Наименование ЭРЭ	Контролируемые параметры	Коэффициенты нагрузки		
		Выражение для определения	Режимы	
			импульсный	статический
Транзисторы	Мощность, рассеиваемая на коллекторе, P_k	$\frac{P_k}{P_{k \text{ доп}}}$	0,6	0,3
Полупроводниковые диоды	Обратное напряжение, U_o	$\frac{U_o}{U_{o \text{ доп}}}$	0,8	0,5
Конденсаторы	Напряжение на обкладках, U_C	$\frac{U_C}{U_{C \text{ доп}}}$	0,7	0,4
Резисторы	Рассеиваемая мощность, P	$\frac{P}{P_{\text{доп}}}$	0,6	0,7

Наименование ЭРЭ	Контролируемые параметры	Коэффициенты нагрузки		
		Выражение для определения	Режимы	
			импульсный	статический
Трансформаторы	Ток нагрузки, I_H	$\frac{I_H}{I_{H \text{ доп}}}$	0,9	0,8
Электрические соединители	Ток через один контактный элемент, I_k	$\frac{I_k}{I_{k \text{ доп}}}$	0,8	0,5

Часто учёт электрического режима, температуры, других параметров окружающей среды и факторов, влияющих на безотказность элементов, выполняется приближённо с помощью обобщённого эксплуатационного коэффициента $K_{Э.ОБ}$, на который умножается рассчитанная для РЭС суммарная интенсивность отказов. Значение $K_{Э.ОБ}$ зависит от вида РЭС и условий его эксплуатации (Таблица 1.3).

Таблица 1.3 - Обобщённый эксплуатационный коэффициент $K_{Э.ОБ}$

Вид РЭС, условия эксплуатации	$K_{Э.ОБ}$
Лабораторные условия	1,0
Помещения с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Космос (на орбите)	1,5
Наземные стационарные условия	2 .. 4,7 (2,5)
Наземные возимые РЭС	4 .. 7 (5,0)
Наземные подвижные (переносимые) РЭС	7 .. 15 (7,0)
Морские защищённые условия	7... 12 (7,6)
Морские незащищённые условия	7.. 15 (10,0)
Бортовые самолётные РЭС	5 .. 10 (7,0)
Запуск ракеты	10 .. 44 (20,0)

*В скобках указаны значения, рекомендуемые для использования в расчётах

1.4 Оформление результатов анализа и выбора ЭРЭ проектируемого РЭС

Результаты анализа и выбора ЭРЭ проектируемого РЭС целесообразно свести в приведённые ниже примеры шаблонов таблиц (Таблица 1.4 - Конструкторские характеристики применяемых электронных компонентов, Таблица 1.5 - Электрические и надёжностные характеристики применяемых электронных компонентов, Таблица 1.6 - Эксплуатационные характеристики применяемой элементной базы).

Таблица 1.4 - Конструкторские характеристики применяемых электронных компонентов

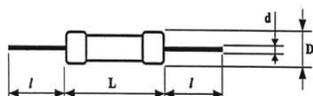
Поз. обознач.	Кол.	Тип	ТУ	Вид	Размеры корпуса					Установочная площадь, мм ²	Масса, г
					Чертеж корпуса	Длина L, мм	Ширина, мм	Высота H (Диаметр D), мм	Диаметр вывода d, мм		
R1-R4	4	C2-33H	ОЖО.467.093 ТУ			3.5	-	1.85	0.6		0,25

Таблица 1.5 - Электрические и надёжные характеристики применяемых электронных компонентов

Поз. обознач.	Ном. значение	Допуск, %	Ном. мощн., Вт	Рассеиваемая мощн., Вт.	Коэф. нагрузки	Интенсивность отказов, $\lambda \times 10^{-6}$ 1/ч
R1	1 кОм	1%	0.125	0.63	0.504	0,0037

Таблица 1.6 - Эксплуатационные характеристики применяемой элементной базы

Наименование, тип и обозначение ЭРЭ	Параметры внешних воздействий						
	Диапазон температур, °C	Влажность, %	Вибрации		Ударные перегрузки, м/с ² (g)	Линейные ускорения, м/с ² (g)	Соответствие ТЗ
			Частота, Гц	Перегрузка, м/с ² (g)			
R1	-55°C .. +155°C						

1.5 Особенности установки ЭРЭ, различающихся по способу монтажа

1.5.1 Классификация ЭРЭ по способу монтажа

При сборке РЭС применяются следующие разновидности ЭРЭ:

- **со штырьковыми выводами**, предназначенные для объёмной (пространственной) пайки;
- **поверхностно-монтажные**, предназначенные для поверхностного монтажа на печатные платы (ПП);
- **имеющие панельки (разъёмы) на ПП** для монтажа и демонтажа процессоров, микросхем, радиоламп и др.

В соответствии с этим существуют две технологии монтажа электрорадиоэлементов на печатную плату:

- традиционная технология с использованием монтажных отверстий для установки ЭРЭ, имеющих выводы;
- технология с установкой ЭРЭ на поверхности ПП без применения монтажных отверстий (поверхностный монтаж).

1.5.2 Радиоэлементы с выводами

При выводном монтаже (англ. *Through hole technology*, **ТНТ**- технология монтажа в отверстия) выводы ЭРЭ устанавливаются в сквозные отверстия печатной платы и припаиваются к контактным площадкам и/или металлизированной внутренней поверхности отверстия (Рис. 1.3).

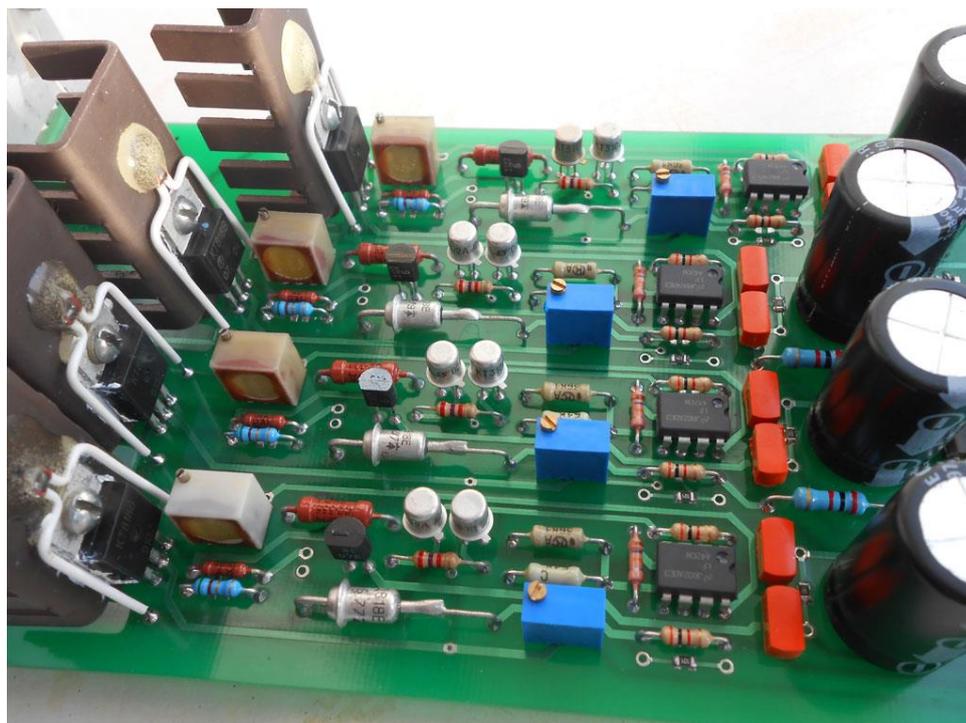
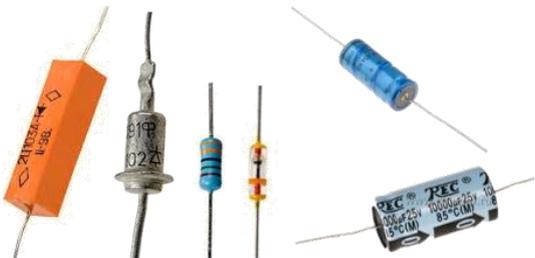
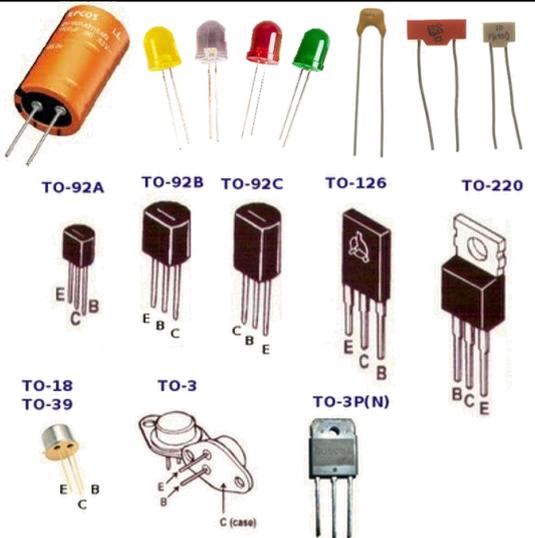


Рис. 1.3 - Технология монтажа **ТНТ**, основанная на установке радиоэлементов с выводами в отверстия печатной платы и последующей пайке (выводной монтаж)

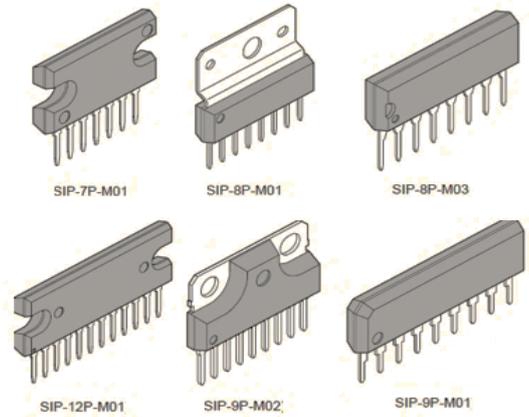
Хотя монтаж в отверстия пока ещё является актуальным для многих предприятий России, постепенно эта технология уступает перед технологией монтажа с использованием планарных компонентов. Тем не менее остаются силовая электроника, источники питания, высоковольтные модули и другие категории электронных средств, где выводной монтаж пока ещё является базовым. Существуют ЭРЭ, не имеющие аналогов в планарном исполнении – разъёмы, телефонные гнёзда, реле, трансформаторы и др., для которых сборка может быть осуществлена только с использованием технологии выводного монтажа. Особенно часто данная технология применяется в условиях единичного и мелкосерийного многономенклатурного производства, где из-за частой смены выпускаемых моделей автоматизация процессов неактуальна (Таблица 1.7).

Большинство используемых в настоящее время выводных радиокомпонентов требуют обязательной технологической подготовки выводов перед монтажом. Общие требования и нормы конструирования по формовке выводов и установке ЭРЭ на печатные платы при конструировании РЭС рекомендуются пока ещё действующим «ГОСТ 29137-91. Формовка выводов и установка изделий электронной техники на печатные платы. Общие требования и нормы конструирования».

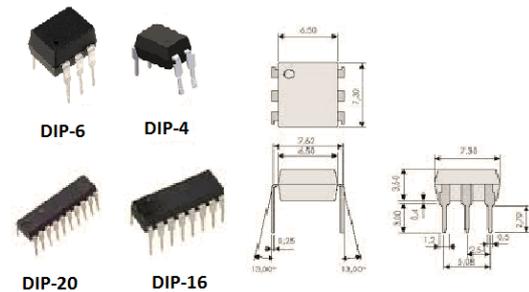
Таблица 1.7 – Виды корпусов радиокомпонентов, используемых при **THT**-монтаже

<p>Корпуса радиокомпонентов с осевыми (аксиальными) (<i>Axial component</i>) выводами, которые располагаются с двух сторон корпуса на продолжении его оси. Радиокомпоненты в таких корпусах не обеспечивают высокую плотность монтажа, так как они размещаются на поверхности печатной платы и занимают относительно большую площадь.</p> <p>Выводы и монтажные отверстия выходят за габарит радиокомпонента с осевыми выводами и этим ещё больше увеличивают занимаемую им площадь.</p>	
<p>Корпуса радиокомпонентов с радиальными выводами (<i>Radial component</i>), которые располагаются в одном направлении параллельно оси корпуса. Так как их выводы расположены под корпусом, допускают компоновку их на ПП с минимальными конструктивными зазорами (0,5... 1,0 мм), что обеспечивает более высокую объёмную плотность монтажа, чем у радиокомпонентов с осевыми выводами. Тем не менее монтаж этих элементов более трудоёмок, чем элементов с осевыми выводами и труднее автоматизируется.</p>	

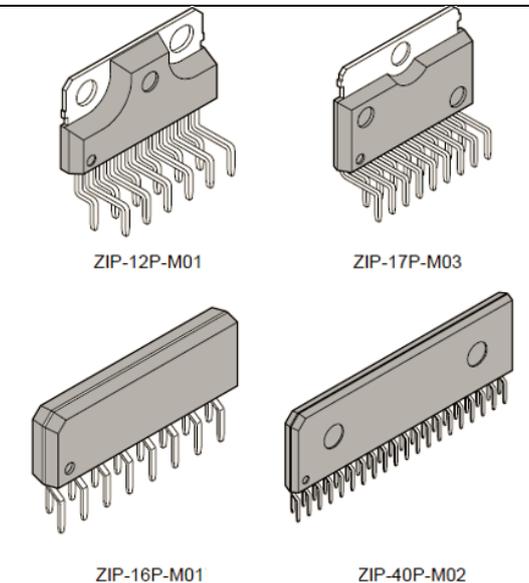
Корпуса SIP (*Single In-line Package*) используются для размещения нескольких активных электронных компонентов различной функциональности для вертикального монтажа в отверстия печатной платы, с одним рядом выводов по длинной стороне. Они обеспечивают достаточно большую интеграцию, улучшенный теплоотвод. В обозначении указывается число выводов.



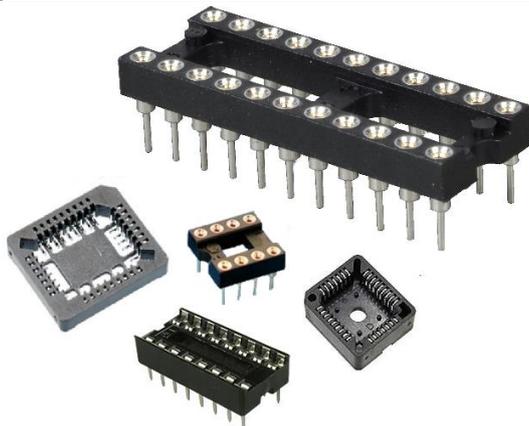
Корпуса DIP (*Dual In-line Package*) имеют прямоугольную форму с двумя рядами выводов по длинным сторонам. В обозначении корпуса из пластика (**PDIP**) или керамики (**CDIP**) указывается число выводов (от 4 до 40). Большинство компонентов имеет шаг выводов 2.54 миллиметра и расстояние между рядами 7.62 или 15.24 миллиметра.



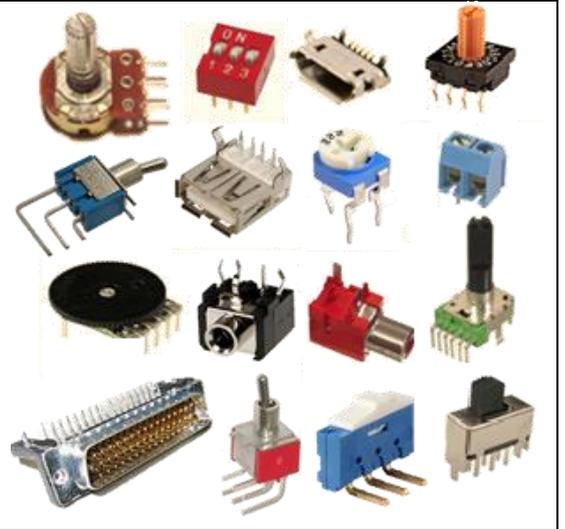
Корпуса ZIP (*Zigzag-In-line Package*) имеют плоский корпус для вертикального монтажа в отверстия печатной платы со штырьковыми выводами, расположенными зигзагообразно. Цифры означают количество выводов и тип корпуса (*ZIP12, ZIP16, ZIP17, ZIP19, ZIP20, ZIP24, ZIP40*). В зависимости от количества выводов имеют разные габариты, расстояния между выводами (1.778, 1.27, 0.89 мм) и расстояния между рядами выводов (2.54, 1.778, 1.27, 0.89).



Панельки для микросхем и транзисторов используют для снижения риска повреждения дорогостоящего компонента при пайке и позволяют его быструю замену без необходимости выпаивания из платы, что важно при отладке РЭС и его модернизации (например, замене на более современный процессор)).



Сложные ЭРЭ (разъёмы USB, переменные и построечные резисторы и конденсаторы, телефонные гнёзда, переключатели, разъёмы питания, клеммники и т.п.), к которым могут прикладываться достаточно большие внешние усилия



1.5.3 Поверхностный монтаж

Общемировой тенденцией совершенствования современных РЭС является переход от традиционной технологии использования выводных радиодеталей к **поверхностному (планарному¹⁰) монтажу, к SMD-технологии** (от англ. *Surface Mounted Device* — прибор, монтируемый на поверхность) монтажа печатных плат, более приспособленной к автоматизации [27,51]. Основным её отличием от «традиционной» технологии сквозного монтажа в отверстия (элементы с проволочными или ленточными выводами) является то, что компоненты припаиваются к контактным площадкам, сформированным проводящим рисунком (Рис. 1.4).

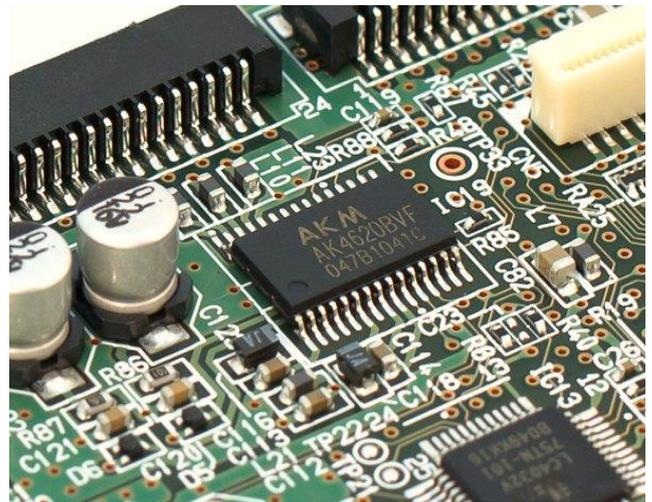


Рис. 1.4 - Поверхностный монтаж

При выводном монтаже отверстия для выводов ЭРЭ занимают на плате много места, и расстояние между соседними выводами микросхемы должны быть значительно больше, чем при использовании технологии поверхностного монтажа, когда выводы микросхемы припаиваются к поверхности платы.

Пассивные компоненты для поверхностного монтажа изготавливаются в двух модификациях:

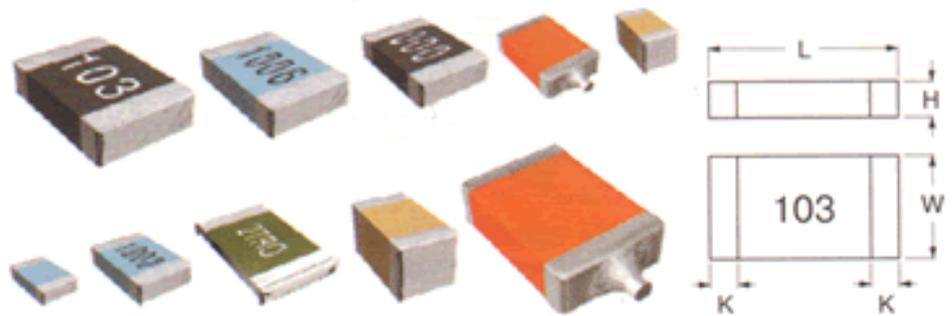
- в виде цилиндра (англ. MELF – *Metal Electrode Face bonding*);
- в виде чипов¹¹, у которых выводы либо отсутствуют, либо имеют меньшую длину.

¹⁰ **Планарный** - плоский, поверхностный.

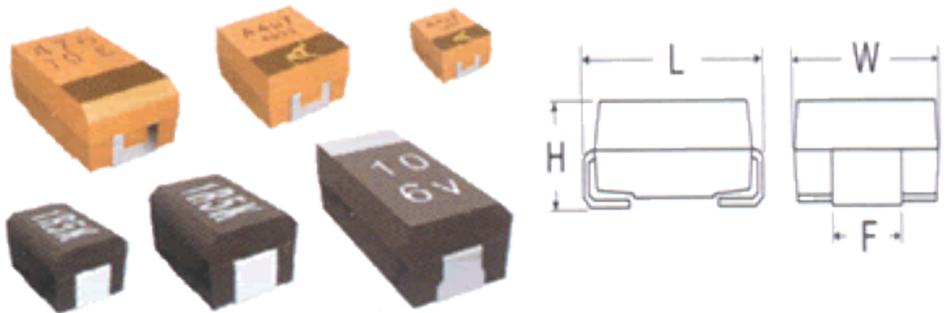
¹¹ **Чип** (от англ. *chip* - обломок, осколок, кусочек), полупроводниковый кристалл, в объёме и/или поверхности которого сформированы элементы интегральной микросхемы (или её части), а также межэлементные соединения и контактные площадки. Часто вместо термина «чип» используется эквивалентное ему понятие «кристалл».

Внешний вид чип-элементов для поверхностного монтажа приведён на Рис. 1.5. Их конструкция часто представляет собой прямоугольный параллелепипед с металлизированными боковыми поверхностями, которые играют роль внешних выводов и используются для пайки при сборке на ПП. За счёт этого обеспечивается более плотная компоновка, значительно уменьшаются нежелательные паразитные ёмкости и индуктивности монтажа, вследствие чего существенно повышается качество передачи слабых и высокочастотных сигналов.

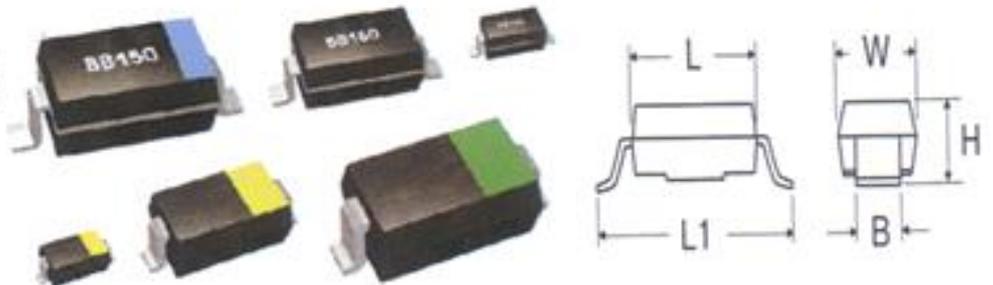
Резисторы
Конденсаторы
Индуктивности
Термисторы
Варисторы



Диоды
Стабилитроны
Конденсаторы
Индуктивности
Термисторы
Варисторы



Диоды
Стабилитроны
Конденсаторы



Диоды
Стабилитроны
Конденсаторы
Резисторы

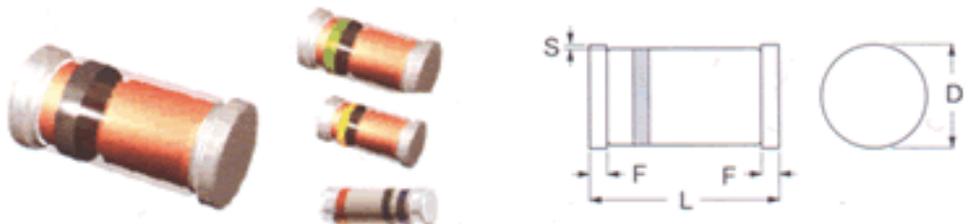


Рис. 1.5 - Корпуса компонентов для поверхностного монтажа (SMD)

Для размещения чип-компонентов не нужно высверливать отверстия на печатной плате, их допускается размещать на обеих сторонах печатной платы. Безвыводные чип-компоненты (элементы без традиционных проволочных или ленточных выводов) для поверхностного монтажа (резисторы, конденсаторы, микросхемы и т.д.) обычно в 4-10 раз меньше и на 25-50% дешевле, чем аналогичные компоненты для сквозного монтажа в отверстия.

Стандартное обозначение корпуса пассивного SMD-компонента состоит из четырёх цифр, которые отображают его длину и ширину (см. Рис. 1.5). В одних стандартах эти параметры задаются в дюймах, а в других — в миллиметрах. Например, название корпуса 0805 получается следующим образом: 0805 = длина x ширина = (0.08 x 0.05) дюйма, а корпус 5845 имеет габариты (5.8 x 4.5) мм. Корпуса с одним и тем же названием могут иметь разную высоту, различные контактные площадки и выполнены из различных материалов, но рассчитаны для монтажа на стандартное установочное место. Для конденсаторов это обусловлено величиной ёмкости и рабочим напряжением, для резисторов — рассеиваемой мощностью и т.д.

Достоинства. По сравнению с технологией монтажа в отверстия поверхностный монтаж обладает рядом преимуществ с конструкторской и технологической точек зрения:

- снижение габаритов и массы печатных узлов (компоненты для поверхностного монтажа имеют значительно меньшие размеры по сравнению с элементной базой для монтажа в отверстия. Планарные компоненты унифицированы, в несколько раз меньше, и могут монтироваться с обеих сторон печатной платы);
- улучшение электрических характеристик (из-за уменьшения длины выводов и более плотной компоновки значительно улучшается качество передачи слабых и высокочастотных сигналов);
- повышение ремонтпригодности и технологичности РЭС (планарные компоненты унифицированы, не нужна формовка выводов перед монтажом, компоненты легкодоступны, возможно применение высокопроизводительного автоматического технологического оборудования на всех этапах сборки);
- снижение себестоимости как за счёт использования компонентов меньших габаритных размеров, имеющих стоимость в два раза меньшую выводных аналогов, так и за счёт их более плотной компоновки и трассировки, а также автоматизированной сборки. Снижает затраты на изготовление платы также отсутствие отверстий для установки компонентов.

Недостатки. Поверхностный монтаж обладает и рядом недостатков [52]:

- печатные узлы, собранные из планарных компонентов, боятся сгибов и ударов, перегрева при пайке, что снижает надёжность устройств, эксплуатируемых в экстремальных условиях;
- корпуса безвыводных компонентов и материал печатных плат имеют существенно различающиеся коэффициенты теплового расширения, и их жёсткое крепление к проводящему рисунку с помощью пайки при воздействии в процессе эксплуатации больших перепадов температур приводит к возникновению значительных механических напряжений и к трещинам компонентов (вплоть до их разрушения);

– конструктор обязан особенно тщательно проектировать проводящий рисунок печатных плат, чтобы обеспечить равную скорость нагревания контактов компонента симметричность тепловых полей.

– преимущество поверхностного монтажа - отсутствие отверстий под выводы. Тем не менее, если раньше при переходе электрической цепи с одной стороны платы на другую часто можно было использовать металлизированное отверстие для вывода компонента, то теперь при разработке платы необходимо предусматривать сверление огромного количества переходных отверстий. Трассировка платы получается сложнее, для такой работы требуется опытный разработчик;

– необходимо предусматривать скрупулёзное применение установленных технологических приёмов при производстве. Для исключения брака нужно точно соблюдать требования технологии групповой пайки: точность переноса паяльной пасты на плату и режим работы паяльного оборудования (повышенные требования к точности температуры пайки, одинаковую скорость нагревания контактов каждого компонента и её зависимости от времени).

Если нет подходящих SMD-элементов и приходится использовать выводные ЭРЭ, то их выводы формуруются так, чтобы их можно было монтировать на поверхность (Рис. 1.6). Для SMT-монтажа используются корпуса с двумя основными типами выводов: «крыло чайки» (*gullwing*) и J-образные, которые за счёт изгиба выводов позволяют компенсировать тепловые и механические деформации.

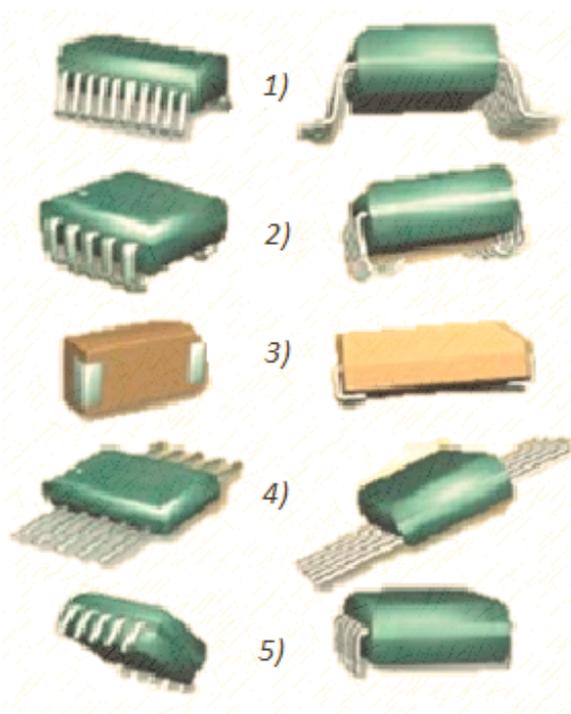


Рис. 1.6 - Основные типы формовки выводных ЭРЭ для поверхностного монтажа

- 1) «Крыло чайки» — ножки загнуты вниз и наружу;
- 2) J-образные — ножки загнуты вниз и внутрь под корпус компонента, форма буквы J;
- 3) L-образные — ножки загнуты вниз и внутрь под корпус компонента, форма буквы L;
- 4) Плоские ленточные выводы — ножки направлены в разные стороны прямо от корпуса;
- 5) Встык - выводы ЭРЭ для монтажа в отверстия обрезаются, чтобы их можно было паять встык с контактными площадками поверхностного монтажа

Корпуса с выводами типа «крыло чайки» (Рис. 1.6, 1) позволяют совершать ручную пайку и обеспечивают более простой контроль паяных соединений. В настоящее время корпуса с выводами «крыло чайки» популярнее, т.к. они позволяют применять более простое производственное оборудование.

Корпус с *J*-образными выводами (Рис. 1.6, 2) занимает на ПП меньше места (место пайки переносится под корпус микросхемы, из-за чего возможна компоновка с максимально малыми зазорами между соседними корпусами), устойчив при транспортировке, хорошо согласуется с различными упаковками, корпуса не застревают в механизмах подачи автоматов установки микросхем на ПП. Существенный недостаток таких выводов — сложность визуального контроля паяного соединения.

Микросхемы в корпусах типа DIP разрабатывались только для монтажа в отверстия, однако такие микросхемы также могут быть приспособлены и к монтажу на поверхность. При соответствующей формовке выводов они могут быть смонтированы так же, как и микросхемы в корпусах с планарными выводами, лежащими в плоскости основания корпуса. Кроме того, микросхемы в DIP-корпусах могут монтироваться на поверхность пайкой встык (Рис. 1.6, 5).

1.5.4 Монтаж интегральных микросхем с BGA выводами

В последнее время при проектировании многих современных электронных устройствах (мобильных процессоров, чипсетов, современных графических процессоров и т.п.) отмечается тенденция к всё большему уплотнению монтажа. Резкое увеличение числа выводов микросхем привело к появлению корпусов типа **BGA** (англ. *Ball grid array* — массив шариков). BGA выводы представляют собой *шарики из припоя*, нанесённые на контактные площадки с обратной стороны микросхемы (Рис. 1.7).

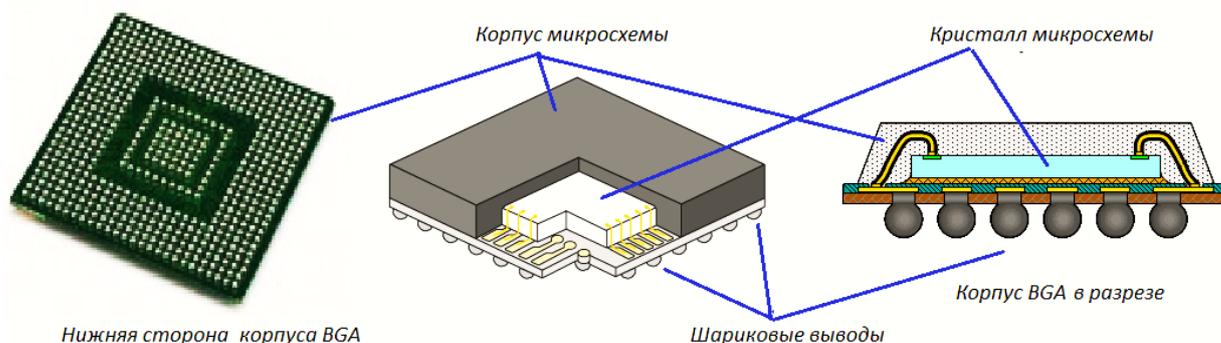


Рис. 1.7 - Микросхема в матричном корпусе с выводами BGA

Микросхему располагают на печатной плате, согласно маркировке первого контакта на микросхеме и на плате (Рис. 1.8). Затем микросхему нагревают с помощью паяльной станции или инфракрасного источника, так что шарики начинают плавиться и обеспечивают контакт микросхемы с платой, на которую она устанавливается. Сочетание определённого припоя, температуры пайки, флюса и паяльной маски не позволяет шарикам полностью деформироваться. Поверхностное натяжение заставляет расплавленный припой зафиксировать микросхему ровно над тем местом, где она должна находиться на плате.

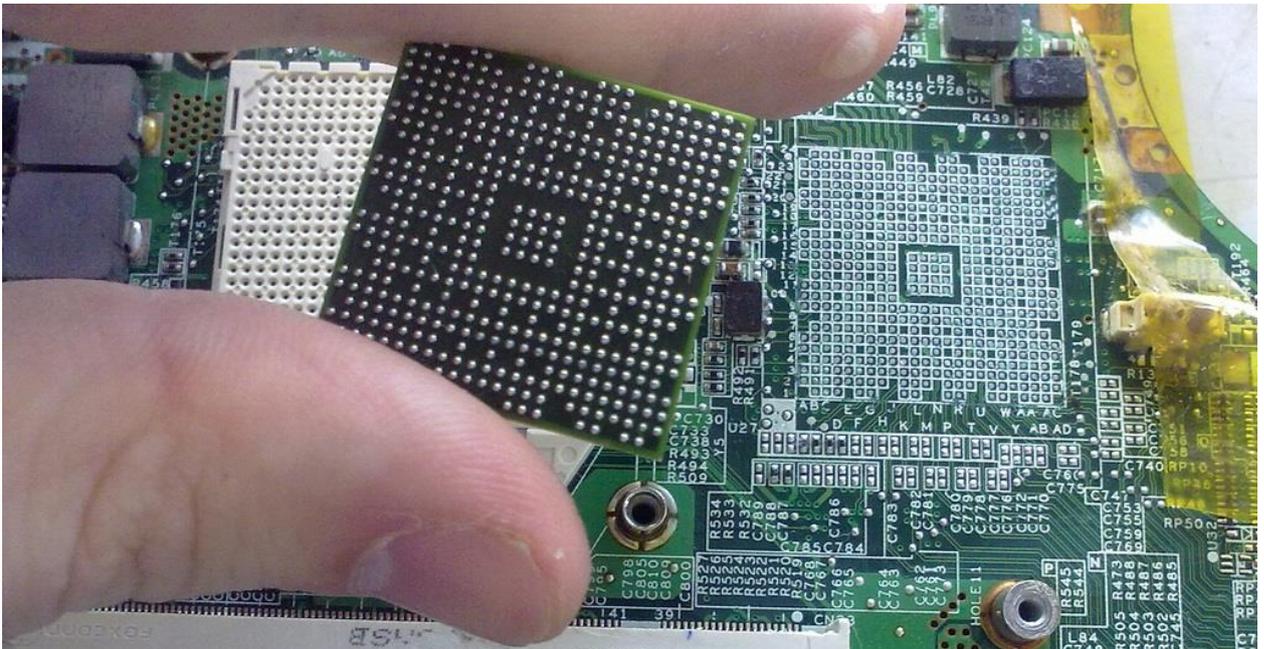


Рис. 1.8 – Монтаж корпуса с выводами типа BGA

Достоинства BGA-монтажа:

1. Матричное расположение выводов под корпусом микросхемы позволяет разместить огромное количество выводов на площадь корпуса (до 700 контактов на корпусе размером 35×35 мм).
2. Достоинством также является лучший тепловой контакт между микросхемой и платой, что во многих случаях избавляет от установки теплоотводов, поскольку тепло уходит от кристалла на плату более эффективно. Если BGA-микросхемы рассеивают очень большие мощности и теплоотвод по всем шариковым выводам недостаточен, то к корпусу микросхемы прикрепляется (иногда приклеивается) радиатор.
3. BGA-выводы имеют малую длину, которая определяется лишь расстоянием между платой и микросхемой и, следовательно, незначительные паразитные параметры (индуктивность и ёмкость). Это позволяет работать на более высоких частотах по сравнению с другими корпусами, монтируемыми на поверхность.

Недостатки BGA-монтажа:

1. **Негибкость выводов.** При сильном изменении температур контакт между шариками и микросхемой или платой может нарушиться. К этому также могут привести вибрация, удары или изгиб платы. Поэтому корпуса BGA пока ещё не очень популярны в авиационных и в военных РЭС.
2. **Трудность диагностики нарушений BGA-монтажа.** Так как контактные выводы размещены на обратной стороне микросхемы, обращённой к плате, то определить целостность монтажа визуально трудно или вовсе невозможно. Для выявления дефектов BGA-монтажа используют рентген и специализированные микроскопы.
3. **Трудоёмкость устранения нарушений BGA-пайки.** Для качественного ремонта необходимо нагреть и демонтировать микросхему, удалить повреждённые шарики (часто удаляют все), установить новые (готовые, либо созданные прямо на микросхеме с помощью паяльной пасты и трафаретов), и провести повторный монтаж микросхемы на плату.

Данная процедура весьма трудоёмкая, так как паяльником подобраться невозможно. Для подобной работы требуется монтажник высокой квалификации и специализированная паяльная станция с обязательной возможностью регулировки и поддержки заданной температуры конкретного чипа для пайки микросхем.

1.5.5 Смешанный монтаж

Существуют целый ряд электронных компонентов, не имеющих аналогов в планарном исполнении (некоторые виды соединителей, разъёмов, реле, трансформаторов, колодок, держателей и т.п.), для которых сборка может быть выполнена только с использованием технологии выводного монтажа. Вследствие этого на печатной плате могут присутствовать компоненты как для выводного, так и для поверхностного монтажа. Конечно, технология монтажа печатных узлов при этом усложняется. Тем не менее применение смешанного монтажа позволяет использовать оптимальные как выводные, так и планарных компоненты и получить достаточно современный печатный узел с хорошими параметрами.

2 Формирование библиотеки электронных компонентов САПР

Посадочное место (ПМ) — это комплект конструктивных элементов печатной платы, предназначенный для монтажа отдельного ЭРЭ, в которое входят в различных сочетаниях контактные площадки (КП), металлизированные отверстия, печатные проводники на наружных слоях и гладкие крепёжные отверстия. Кроме этого, ПМ может включать в себя параметры защитной паяльной маски¹², элементы маркировки и графические элементы сборочного чертежа [52,34].

Конструкторско-технологическое изображение посадочного места компонента электронной схемы создаётся с помощью соответствующего графического редактора используемой САПР печатного монтажа [11,13,14,15,16,53,18,17,12].

Исторически получилось, что длительное время многие радиокомпоненты разрабатывались без учёта специфики монтажа их на печатные платы, и уж тем более, без учёта требований автоматизированного монтажа.

Поэтому большинство, используемых в настоящее время компонентов, требуют обязательной технологической подготовки их перед монтажом и, при этом, нередко они допускают только ручной монтаж. Для одного и того же ЭРЭ может быть предусмотрено несколько вариантов установки на ПП. (сопротивления, конденсаторы, диоды и др.). Каждому из таких вариантов установки должен соответствовать свой вариант посадочного места в базе данных САПР.

¹² **Паяльная маска** (англ. *Solder Mask* или *Solder Resist*) – это теплостойкий защитный материал, который наносят избирательно на отдельные участки печатной платы, чтобы защитить их от попадания припоя и флюсов в процессе производства платы и монтажа компонентов. Чаще всего она зелёного цвета («зелёнка»), но в последнее время используется целый спектр цветов.

На практике для большинства элементов приходится разрабатывать способы их монтажа на печатные платы.

Оптимальный вариант - сослаться на нормативные документы, определяющие вариант формовки выводов и установки ЭРЭ - такие как ГОСТ 29137—91 или более поздние нормативные документы. ОСТ 45.010.030-92 детализировал ГОСТ 29137-91 для самых распространённых отечественных радиоэлементов. Конструктор в большинстве случаев может определить код варианта установки элемента по ОСТ 45.010.030-92, тем не менее в документации должна быть приведена ссылка на ГОСТ 29137—91.

3 Поиск аналогов радиоэлементов

3.1 Некоторые советы по выбору заменяющих ЭРЭ

Необходимо провести проверку правильности выбора ЭРЭ, указанных в перечне к схеме электрической принципиальной и определить варианты замен ЭРЭ при необходимости. Большинство радиодеталей могут быть легко заменены на более современные, близкие по параметрам, без потери качественных характеристик РЭС.

Следует самому сделать выбор аналога равноценного заменяющего элемента, если:

- указанный в схеме электрической принципиальной тип радиоэлемента не подходит для печатного монтажа;
- установлена целесообразность использовать вместо элементов с выводами безвыводные SMD-элементы;
- на схеме РЭС и в его описании не указан тип радиоэлемента;
- радиоэлемент является **устаревшим** и не выпускается промышленностью;
- радиоэлемент не входит в перечень допустимых к применению на данном предприятии [41].

При выборе типа заменяющего ЭРЭ следует учитывать:

- идентичность его по функциональному назначению, электрическим и частотным параметрам;
- возможность его установки (крепления) на печатную плату;
- условия эксплуатации;
- класс точности изготовления элемента (разброс параметров).

Нужно иметь в виду - чем больше технологический разброс параметров у выбранного элемента, тем меньше его стоимость. С другой стороны, класс точности изготовления элементов (допуски на комплектующие элементы) оказывает огромное воздействие на разброс значений выходных параметров РЭС. Если выбран элемент с большим разбросом, то вероятно потребуется его подборка при наладке, что может увеличить стоимость РЭС.

3.2 Электрические соединители

Электрический соединитель (коннектор, разъем) – это устройство, предназначенное для включения, разъединения и переключения механическим путём электрических цепей в обесточенном состоянии [22,54,55].

Условные графические обозначения контактных соединений приведены на Рис. 3.1 [56].

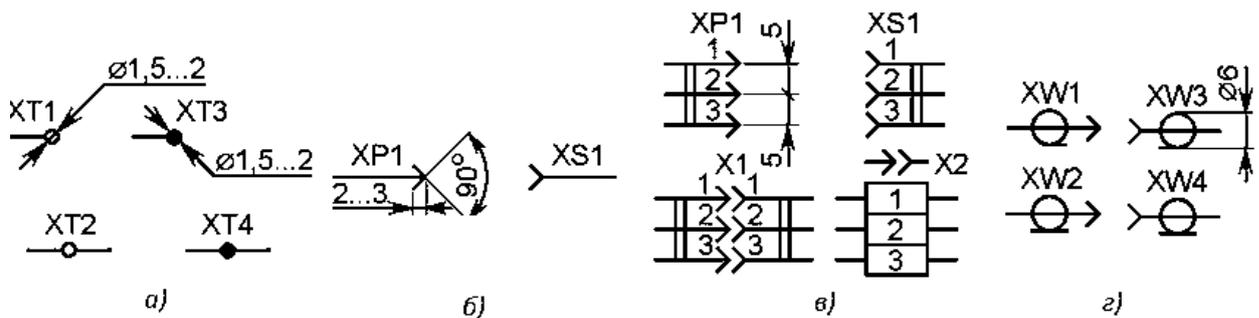


Рис. 3.1 – Условные графические обозначения разъёмных контактных соединений:
 а) - контакты разборного и неразборного соединений; б) - штырь и гнездо разъёмного соединителя; в) - вилка и розетка разъёмного соединителя; г) - штырь и гнездо коаксиального разъёмного соединителя

Разъёмные контактные соединения позволяют повысить ремонтопригодность при эксплуатации, так как появляется возможность оперативно заменить отказавший блок, чтобы потом починить его. Упрощается сборка РЭС, однако при этом масса, габариты и стоимость РЭС возрастают.

Габариты коммутирующих устройств тем больше, чем выше напряжение коммутации или разрывная мощность контактов.

Чтобы каждый контакт штекера (часть разъёма, содержащая штыри) соединился именно с предназначенным ему контактом гнезда (часть разъёма, состоящая из отверстий с контактными пластинами) в большинстве разъёмов предусмотрен «ключ» — направляющие в форме разных выступов и пазов, позволяющих вставить штекер в гнездо единственным возможным способом.

Разъёмный электрический контакт подвержен влиянию таких дестабилизирующих условий эксплуатации, как влажность воздуха, коррозия, пыль, широкий температурный диапазон, химически агрессивная среда, вибрации. Поэтому применение разъёмных соединений в РЭС практически всегда приводит к *снижению надёжности*. Кроме того, ресурс разъёмных соединений не превышает нескольких тысяч соединений/разъединений, а устойчивость к механическим и климатическим воздействиям значительно хуже, чем у неразъёмных соединений. Чтобы уменьшить окисление, контакты изготавливают из металлов с хорошей электропроводностью (сплавов алюминия или меди) и часто покрываются драгоценными металлами (серебро, золото, платина). Правильный выбор электрических соединителей способствует повышению эксплуатационной надёжности РЭС, снижению стоимости.

Код разъёмного соединителя — латинская буква X. При изображении штырей разных частей схемы в позиционное обозначение первых вводят букву P (например, XP1), а гнезд — S (например, XS1).

Электрические соединители целесообразно применять в условиях крупносерийного и массового производства РЭС, когда они конструктивно состоят из большого числа модулей, по условиям использования которых необходима их оперативная замена в случае отказа. В условиях индивидуального и мелкосерийного производства применение, разъёмов может привести к необоснованному удорожанию РЭС и снижению их надёжности.

Известно множество конструкций электрических соединителей (Таблица 3.1), которые в зависимости от назначения можно сгруппировать по последующим признакам:

- по числу контактов;
- по допустимым токам и напряжениям (слаботочные, сильноточные, низковольтные, высоковольтные);
- по диапазону рабочих частот (низкочастотные, высокочастотные, на постоянный ток);
- по применению (питания, сигнальные, компьютерные, аудио, видео и т.д.);
- по методу монтажа (для печатного или объёмного монтажа, монтажа на панель, на провод, на шасси и т.д.);
- по допустимым климатическим и механическим условиям эксплуатации.

Таблица 3.1 - Конструкции некоторых электрических соединителей

<p>Разъёмы питания сетевые</p>	
<p>Разъёмы питания низковольтные</p>	
<p>Клеммники (винтовые клеммные колодки или пружинные зажимы для коммутации проводов или кабелей). Выпускаются с шагом 2.50 мм, 3.50 мм, 3.81 мм, 5.00 мм, 5.08 мм, 7.50 мм, 7.62 мм. Варианты конструкции позволяют подключать кабель или провода параллельно или перпендикулярно печатной плате.</p>	

<p>Клеммы для присоединения проводов</p>	
<p>Соединители низкочастотные прямоугольные типа МРН одно-рядные и двухрядные (от 4 до 44 контактов) для печатного и объёмного монтажа предназначены для работы в низкочастотных цепях постоянного, переменного и импульсного токов с частотой до 3 МГц</p>	
<p>USB-соединители (англ. <i>Universal Serial Bus</i>) это универсальный последовательный интерфейс для передачи данных к среднескоростным (стандарта USB 2.0 до 480 Мбит/с) и высокоскоростным (стандарта USB 3.0¹³ до 5 Гбит/с) периферийным устройствам. К USB-разъёмам подключают всевозможные устройства в режиме <i>Plug and play</i> без использования собственного блока питания. Для миниатюрных и мобильных устройств используют более тонкие разъёмы <i>Mini USB</i>, постепенно вытесняемые более совершенными разъёмами <i>Micro USB</i>.</p>	

¹³ Третья версия разъёмов USB раскрашена в синий цвет и отличается от привычных разъёмов стандарта **USB 2.0** дополнительными контактами, позволяющими увеличить пропускную способность интерфейса.

3.3 Выключатели и переключатели

Работа с любым РЭС состоит из включения и выключения питания, выбора режима работы, способа управления, систем контроля, сигнализации и т.д. Для всех этих операций используют контактные коммутационные устройства - выключатели (Рис. 3.2) и многопозиционные переключатели (Рис. 3.3) различных исполнений.



Рис. 3.2 - Конструкции некоторых выключателей РЭС

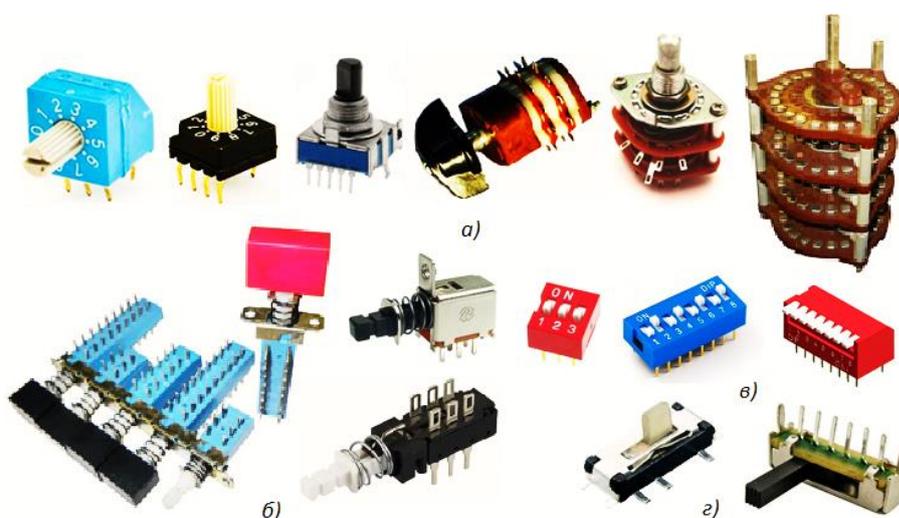


Рис. 3.3 – Конструкции некоторых многопозиционных переключателей:

а) – галетных; б) - клавишных; в) – микропереключателей в корпусе DIP; г) - движковых

Специфической особенностью коммутационных устройств является эксплуатация их в режиме неоднократных переключений при наличии токов и напряжений в цепях контактов, что предъявляет повышенные требования к износоустойчивости.

Позиционное обозначение изделий контактных коммутационных устройств определяется коммутируемой цепью и конструктивным исполнением. Если устройство помещено в цепь управления, сигнализации, измерения, его обозначают латинской буквой *S*, а если в цепь питания — буквой *Q*. Способ управления находит отражение во второй букве кода: кнопочные выключатели и переключатели обозначают буквой *B* (*SB*), автоматические — буквой *F* (*SF*), все остальные — буквой *A* (*SA*).

Условные графические обозначения (УГО) коммутационных изделий — выключателей, переключателей и электромагнитных реле построены в соответствии с [56] на основе символов замыкающего, размыкающего и переключающего контактов, приведённых на Рис. 3.4.

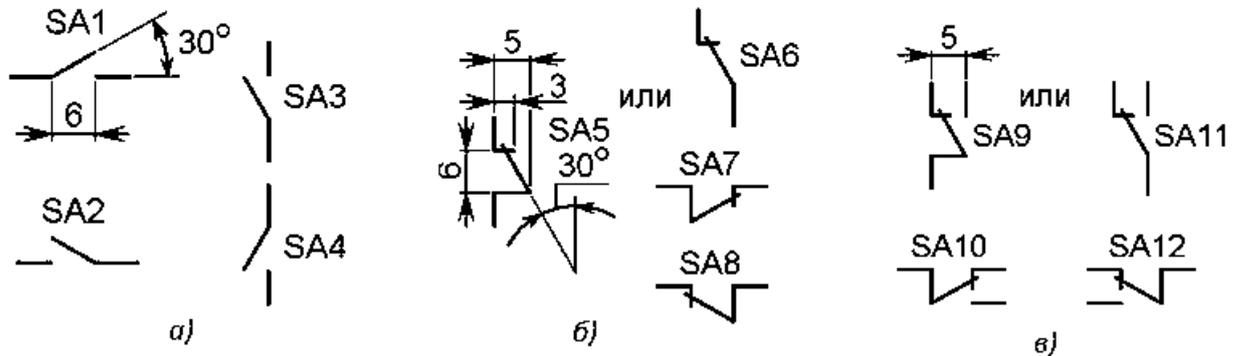


Рис. 3.4 – УГО контактов коммутационных устройств:

а) – замыкающих; *б)* – размыкающих; *в)* – переключающих

За исходное положение замыкающих контактов принято разомкнутое состояние коммутируемой электрической цепи, размыкающих — замкнутое, переключающих — положение, в котором одна из цепей замкнута, другая разомкнута.

Если в выключателе несколько контактов, символы их подвижных частей располагают параллельно и соединяют линией механической связи (ГОСТ 2.755-87). Например на Рис. 3.5, *а)* показано УГО выключателя SA1, содержащего один размыкающий и два замыкающих контакта, и SA2, состоящего из двух замыкающих контактов, причём один из которых (на рисунке — правый) замыкается позже другого. Выключатели Q1 и Q2 служат для коммутации цепей питания. Контакты Q2 механически связаны с каким-либо органом управления, о чём свидетельствует отрезок штриховой линии. На основе символов переключающих контактов строят и УГО многопозиционных переключателей (Рис. 3.5).

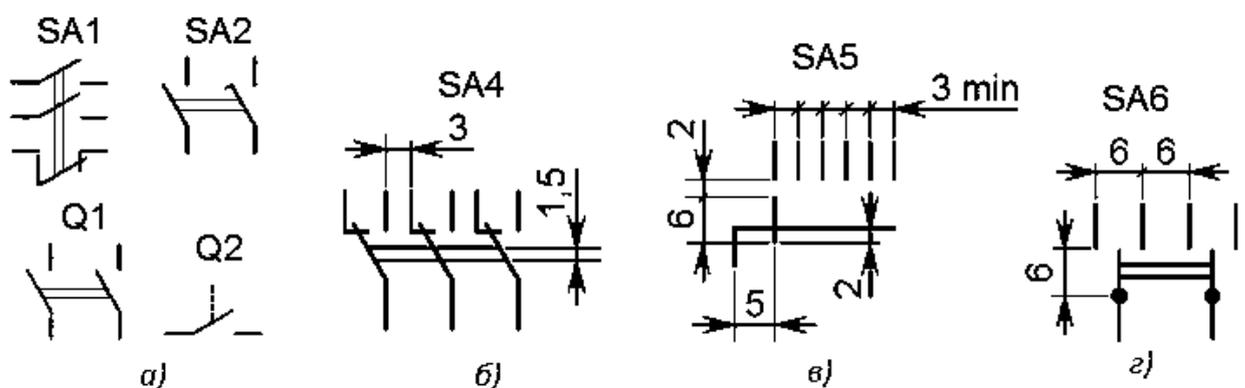


Рис. 3.5 – УГО некоторых переключателей:

а) – трёхполюсный на два положения; *б)* – однополюсный на шесть положений;
в) – двухполюсный на 3 положения (среднее положение - нейтральное)

В обозначении кнопочных выключателей и переключателей используется символ кнопки, соединённый с обозначением подвижной части контакта линией механической связи (Рис. 3.6). При этом если условное графическое обозначение построено на базе основного символа контакта (Рис. 3.6, а)), то это означает, что выключатель (переключатель) не фиксируется в нажатом положении (при отпускании кнопки возвращается в исходное положение). Если же необходимо показать фиксацию, используют специально предназначенные для этой цели символы контактов с фиксацией (Рис. 3.6, б)).

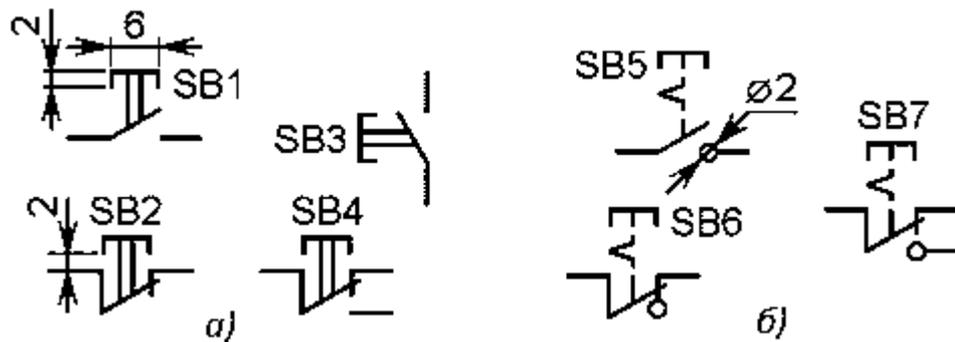


Рис. 3.6 - УГО кнопочных выключателей и переключателей:

а) – с самовозвратом; б) - с возвратом в исходное положение повторным нажатием

Для управления различными исполнительными устройствами в схемах автоматики, коммутации цепей в РЭС активно применяются **электромагнитные реле**, позволяющие использовать для управления мощными силовыми электрическими контактами небольшие токи и напряжения (Рис. 3.7).

УГО реле состоит из условного обозначения катушки (K1) и группы контактов (K1.1; K1.2), которыми управляет реле (см. Рис. 3.7, а)). При пропускании электрического тока через обмотку катушки электромагнита возникающее магнитное поле притягивает к сердечнику якорь, который через толкатель смещает и тем самым переключает контакты (см. Рис. 3.7, б)), соединяющие силовоточные и высоковольтные цепи. На Рис. 3.7, в) и Рис. 3.7, г) представлены конструкции некоторых маломощных электромагнитных реле.

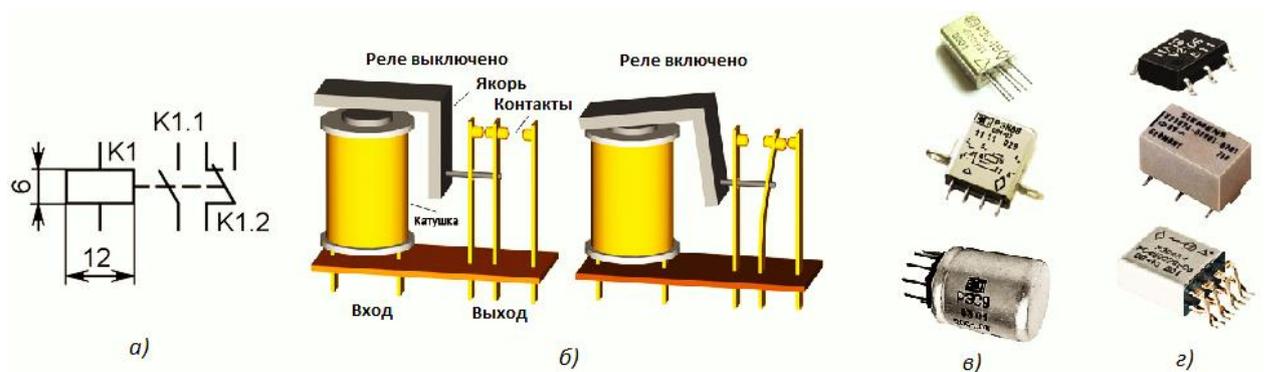


Рис. 3.7 - Электромагнитное реле:

а) – УГО; б) – Принцип работы реле; в) – Выводные реле; г) – Реле для SMD монтажа

Для повышения быстродействия, надёжности, срока службы и способности работы в жёстких условиях агрессивной и пыльной среды разработаны конструкции реле с герконами. Геркон (герметичный контакт, *reed switch, magnet switch*) – герметизированный пружинный магнитоуправляемый контакт в стеклянной колбе, заполненной инертным газом (контакты не подгорают!!), которые замыкаются при приближении магнита (Рис. 3.8, а)). При воздействии магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом или катушкой провода, контакты намагничиваются. Если сила магнитного притяжения больше силы упругости, контакты соединяются, и цепь замыкается. Если магнитное поле исчезает, контакты опять размыкаются под действием силы упругости, и цепь размыкается.

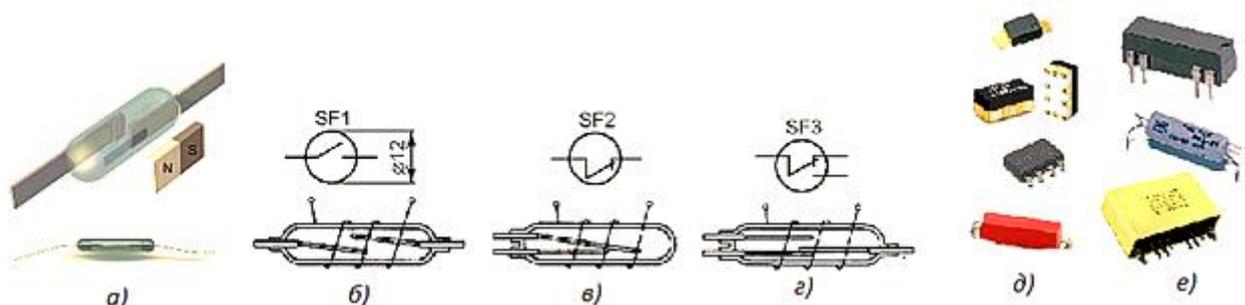


Рис. 3.8 - Герконы:

а) – принцип работы; б) – замыкающие; в) – размыкающие; г) – переключающие;
 д) – конструкции для SMD монтажа; е) – конструкции с выводами

Чтобы отличить магнитоуправляемый контакт от контактов других типов, в его условное обозначение вводят символ герметичного корпуса – окружность (см. Рис. 3.8, б) – г)). Герконы способны коммутировать токи до 5 А при напряжении 100 В и обеспечивать десятки и сотни миллионов срабатываний.

Многообразие разновидностей коммутационных устройств, различающихся по функциональному назначению, принципу действия, конструкции, параметрам, техническим возможностям и условиям эксплуатации усложняют выбор оптимального варианта устройства коммутации для конкретного РЭС [22,21,19,33]. Основные требования сводятся к улучшению качества коммутации (контактное сопротивление в замкнутом и разомкнутом состоянии) и повышению надёжности и удобства в работе.

Для оператора удобнее и оперативнее использовать коммутационные устройства нажимного типа, хотя надёжная фиксация кнопок и клавиш в крайних положениях усложняется.

Более достоверная фиксация обеспечивается при использовании перекидных выключателей (тумблеров), в которых индикация состояния легко определяется визуально. Заметим, что перекидной способ тоже недостаточно совершенен, так как требует существенных усилий для перевода тумблера из одного положения в другое, а кроме того, имеет незначительное число положений (полюсов) при переключении (не более трёх).

Наибольшее число положений (многополюсность) реализуется при поворотном способе управления. Благодаря особенностям конструкции в поворотных (галетных) переключателях обеспечивается малое и стабильное сопротивление контактов.

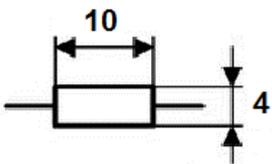
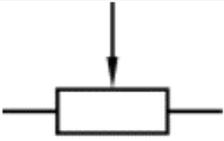
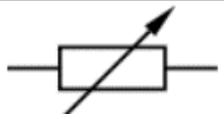
При движковом способе управления надёжная фиксация переключателя может обеспечиваться в двух и более положениях. Целесообразно применять движковые переключатели в РЭС, у которых выступающая часть переключателя не должна быть большой.

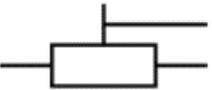
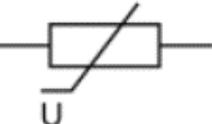
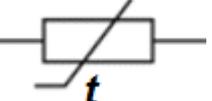
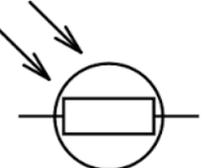
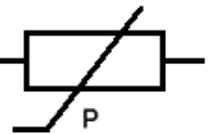
Новый толчок в развитии быстродействующих коммутационных устройств дало применение оптопар (оптронов) [26,57]. Среди основных достоинств оптопар - идеальная электрическая (гальваническая) развязка между входом и выходом, а также возможность реализации бесконтактного оптического управления РЭС. Это позволяет эффективно заменять оптоэлектронными приборами и устройствами громоздкие, недолговечные и нетехнологичные (с позиций микроэлектроники) всевозможные электромеханические изделия (реле, трансформаторы, потенциометры).

3.4 Резисторы

Самыми распространёнными пассивными элементами практически всех электрических и электронных устройств являются **резисторы** (англ. *resistance* – сопротивление). Они служат для ограничения тока в электрической цепи, создания падений напряжения на отдельных участках цепи, разделения пульсирующего тока на составляющие (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Условные графические обозначения резисторов на схемах

Условное графическое обозначение	Тип	Применение
	Постоянный резистор (без указания номинальной мощности рассеивания)	У постоянных резисторов значение сопротивления постоянно и не зависит от внешних воздействий (температуры, света, протекающего через него тока, приложенного напряжения и т.д.).
	УГО постоянного резистора по стандарту ANSI (Северная Америка)	При работе резисторы нагреваются. Используют в качестве различных нагрузок, делителей в цепях питания, элементов фильтров, в цепях формирования импульсов и др.
	Переменный резистор . Стрелка обозначает подвижный контакт.	У переменных резисторов значение сопротивления регулируется при помощи специальной ручки (вращающейся или типа ползунка).
	Переменный резистор, включённый как реостат (ползунок соединён с одним из крайних выводов).	Используют для всевозможных оперативных регулировок в процессе эксплуатации РЭС.

Условное графическое обозначение	Тип	Применение
	Подстроечный резистор	Применяют для эпизодических регулировок при наладке РЭС.
	Подстроечный резистор, включенный как реостат (ползунок соединен с одним из крайних выводов).	Значение сопротивления меняется при помощи шлица, вращаемого с помощью отвертки
	Варистор	Сопротивление зависит от приложенного напряжения
	Терморезистор (термистор)	Сопротивление зависит от температуры
	Фоторезистор	Сопротивление зависит от освещенности
	Тензорезистор (от лат. <i>tensus</i> — напряженный и лат. <i>Resisto</i> - сопротивляюсь)	Сопротивление изменяется в зависимости от его деформации. Используют для измерения деформации механически связанных с тензорезисторами элементов

Позиционное обозначение резистора состоит буквы *R* (Лат. *Rezisto*) и порядкового номера резистора по схеме. Рядом с УГО (сверху или справа) может быть указано номинальное сопротивление резистора. В конструкторской документации при указании номинала резистора употребляют обозначения: ом (Ом), килоом (кОм), мегаом (МОм), гигаом (ГОм). Сопротивление от 0 до 999 Ом указывают числом без обозначения единицы измерения (51 Ом \Rightarrow 51), сопротивления от 1 до 999 кОм - числом со строчной буквой к (36 кОм \Rightarrow 36 к), сопротивления от 1 до 999 МОм - числом с прописной буквой М (100 МОм \Rightarrow 100 М).

При выборе типа заменяющих резисторов определяющими являются два параметра: **номинальное сопротивление** и **допустимая рассеиваемая мощность** [20,58,33].

Предприятиям экономически не выгодно выпускать ЭРЭ с произвольными номиналами сопротивлений и ёмкостей. Использование рядов предпочтительных чисел сокращает количество номиналов, уменьшает число типоразмеров ЭРЭ и удешевляет производство.

ГОСТ 28884-90 [59] установил *шкалы номинальных значений* (ряды предпочтительных чисел) для промышленно выпускаемых резисторов и конденсаторов:

E6 ($\pm 20\%$), E12 ($\pm 10\%$), E24 ($\pm 5\%$), E48, E96 (2 %) и E192 (1 %).

Число в названии ряда указывает общее число элементов в нём. При изготовлении ЭРЭ не удаётся добиться абсолютной точности номинального значения, в скобках приведена допустимая погрешность (в процентах).

Номинал ЭРЭ определённого ряда получают путём умножения или деления их на 10 или на числа, кратные 10.

Наиболее популярен ряд E24 (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Ряд номинальных значений E24

1.0	1.3	1.8	2.4	3.6	4.7	6.2	8.2
1.1	1.5	2.0	2.7	3.9	5.1	6.8	9.1
1.2	1.6	2.2	3.3	4.3	5.6	7.5	10.0

Если ряд E24 неприемлем из-за особых требований (медицинская аппаратура, измерительные приборы, электронные узлы высокоточных военных систем и т.д.), то применяют ряды E48, E96 и E192 с *более дорогими прецизионными* резисторами.

При производстве конденсаторов большой ёмкости чаще всего используются ряды E3 и E6, так как многие типы конденсаторов с высокой точностью изготовить сложно (Таблица 3.4). Ряды E6 и E12 распространяются и на переменные резисторы.

Таблица 3.4 - Ряды номинальных значений E6 и E12

E3	1.0	-	-	-	2.2	-	-	-	4.7	-	-	-
E6	1.0	-	1.5	-	2.2	-	3.3	-	4.7	-	6.8	-
E12	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2

При прохождении электрического тока через резистор происходит его нагрев. Если пропускать через него ток, превышающий заданное значение, то токопроводящее покрытие разогреется настолько, что резистор сгорит. Поэтому существует разделение резисторов по рассеиваемой мощности.

Тепловой режим работы резисторов оказывает существенное влияние на срок службы РЭС, так как при повышении температуры интенсивность отказов резисторов всех типов возрастает и увеличивается влияние выделяемого тепла на другие элементы. Номинальная мощность резистора $P_{\text{ном}}$ определяется максимально допустимой температурой нагрева, при которой резистор может работать длительное время. Практически всегда наблюдается прямая зависимость между габаритами резистора и его номинальной мощностью (Рис. 3.9). При нагрузке резистора мощностью, равной номинальной, его температура превышает температуру окружающей среды на величину ΔT - температуру перегрева.

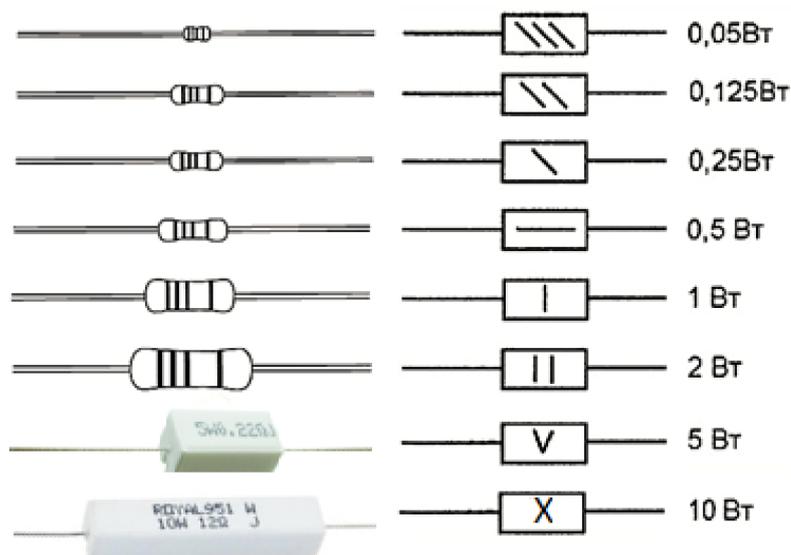


Рис. 3.9 - Зависимость габаритов резисторов от мощности

Температурный коэффициент сопротивления резисторов¹⁴ (ТКС) учитывается в точных измерительных приборах, а также в РЭС, предназначенных для работы в широком диапазоне температур.

Маломощный резистор иногда заменяют более мощным (с запасом по мощности, чтобы повысить надёжность). Но мощные резисторы более габаритные (см. Рис. 3.9), и для их установки на печатной плате потребуется больше места.

По разным причинам (например, отсутствует SMD-резистор подходящей мощности) иногда конструктору приходится заменять один мощный резистор несколькими резисторами малой мощности, используя их *параллельное* или *последовательное* соединение. Как при параллельном, так и при последовательном соединении резисторов, итоговая мощность P_R будет равна сумме мощностей n соединяемых резисторов.

При проектировании рекомендуется использовать следующие типы отечественных резисторов для печатного монтажа с выводами.

Выводные резисторы С2-10 (СЖО.467.072 ТУ) с металлодиэлектрическим проводящим слоем. Используются в электрических цепях аппаратуры постоянного тока и высокочастотной импульсной аппаратуры. Применяются как встроенные элементы внутреннего монтажа или элементы навесного монтажа. Выпускаются пяти типоразмеров по величине допустимой мощности рассеяния - от 0,125 до 2 Вт в интервале температур окружающей среды от минус 60 до + 70°C. Уровень шумов 1 .. 5 мкВ/В. Диапазон номинальных сопротивлений (1 .. 9880) Ом. Ряды E24 и E192, допуски: $\pm 0,05\%$, $\pm 1\%$.

Выводные резисторы С2-33Н (аналог резисторов МЛТ). Постоянные непроволочные резисторы С2-33Н (ОЖО.467.093 ТУ) предназначены для работы в цепях постоянного, переменного тока и в импульсных режимах. Выпускаются шести типоразмеров по величине допустимой мощности рассеяния - от 0,125 до 2 Вт в интервале температур окружающей

¹⁴ ТКС - относительное изменение величины сопротивления при изменении его температуры на один градус по Цельсию (Кельвину).

среды от минус 60 до + 155°С. Ряды E24 и E96, допуски: $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$. Уровень шумов 1 .. 5 мкВ/В.

Резисторы C2-23H (ОЖО.467.081 ТУ) - тонкоплёночные постоянные непроволочные резисторы общего применения всеклиматического неизолированного варианта исполнения, предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсном режиме. Выпускаются шести типоразмеров по величине допустимой мощности рассеяния - от 0,125 до 2 Вт в интервале температур окружающей среды от минус 60 \pm шумов: 0,2 мкВ/В

Прецизионные резисторы C2-29B (ОЖО.467.009 ТУ) выпускаются в шести типоразмерах по величине допустимой мощности рассеяния - от 0,062 до 2 Вт. Шкала номинальных значений - E192. Классы точности $\pm 0,05\%$, $\pm 0,1\%$, $\pm 0,25\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$.

Отечественные безвыводные непроволочные **толстоплёночные SMD-резисторы P1-12** общего применения (Рис. 3.10) для монтажа на поверхность плат и в гибридные интегральные схемы (АЛЯР.434110.005 ТУ и РДВ 22.02.218-2007) предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсном режиме (Таблица 3.5). Имеют номинальные сопротивления ряда E24 от 1 Ом до 27 мОм в интервале температур окружающей среды от минус 60 до + 155°С.

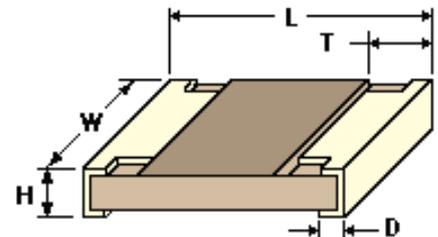


Рис. 3.10 - Размеры резистора P1-12

Таблица 3.5 - Основные параметры и размеры резисторов P1-12

Типоразмер резистора EIA	Типоразмер метрический	Номинальная мощность рассеяния, Вт	Габаритные размеры и допустимые отклонения, мм (Рис. 3.10)				
			L	W	H	D	T
0402	1005	0,062	1.0 \pm 0.1	0.5 \pm 0.05	0.35 \pm 0.05	0.25 \pm 0.1	0.2 \pm 0.1
0603	1608	0,1	1.6 \pm 0.1	0.85 \pm 0.1	0.45 \pm 0.05	0.3 \pm 0.2	0.3 \pm 0.2
0805	2012	0,125	2.1 \pm 0.1	1.3 \pm 0.1	0.5 \pm 0.05	0.4 \pm 0.2	0.4 \pm 0.2
1206	3216	0,25	3.1 \pm 0.1	1.6 \pm 0.1	0.55 \pm 0.05	0.5 \pm 0.25	0.5 \pm 0.25
1210	3225	0,33	3.1 \pm 0.1	2.6 \pm 0.1	0.55 \pm 0.05	0.4 \pm 0.2	0.5 \pm 0.25
2010	5025	0,5	5.0 \pm 0.1	2.5 \pm 0.1	0.55 \pm 0.05	0.4 \pm 0.2	0.6 \pm 0.25
2512	6332	1,0	6.35 \pm 0.1	3.2 \pm 0.1	0.55 \pm 0.05	0.4 \pm 0.2	0.6 \pm 0.25
4020	4020	2,0	10 \pm 0.2	5.0 \pm 0.2	0.55 \pm 0.2	0.4 \pm 0.2	0.6 \pm 0.25

Компоненты для поверхностного монтажа (SMD) слишком малы, чтобы на их корпусе была нанесена стандартная маркировка. Поэтому существует специальная система маркировки таких компонентов: на корпус прибора наносят код, состоящий из двух или трёх символов. К сожалению, системы маркировки у разных фирм (PHILIPS, BOURNS и др.) имеют отличия [60,61].

Постоянные резисторы (в особенности малой мощности) - очень мелкие детали. Они имеют длину всего несколько миллиметров и диаметр порядка миллиметра. Прочитать на такой детали номинал практически невозможно. Поэтому многие из выводных резисторов имеют *маркировку цветными полосками* (Рис. 3.11) [62].

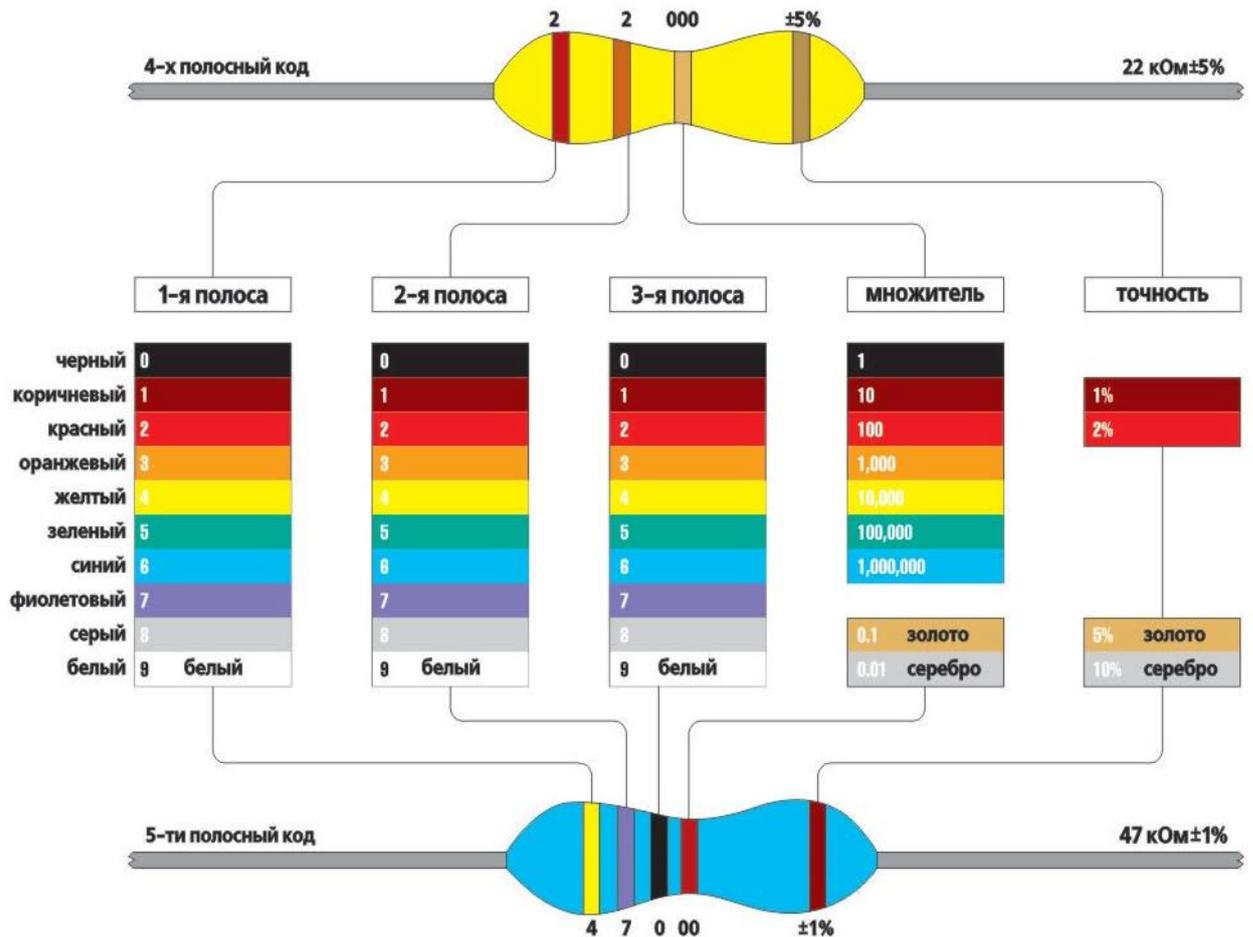


Рис. 3.11 - Цветовая маркировка резисторов

Для резисторов с точностью 20% используют маркировку с тремя полосками, для резисторов с точностью 10% и 5% маркировку делают с четырьмя полосками, для более точных резисторов - с пятью. Первые две полоски всегда означают первые два знака номинала. Если полосок 3 или 4, третья полоска означает десятичный множитель, то есть степень десятки, которая умножается на двузначное число, указанное первыми двумя полосками. Если полосок 4, последняя указывает точность резистора. Если полосок 5, третья означает третий знак сопротивления, четвертая - десятичный множитель, пятая - точность.

Заметим, что подобная же цветовая маркировка используется также для ёмкостей и индуктивностей (единицы измерения пФ и мкГн, соответственно).

3.5 Конденсаторы

В РЭС используют конденсаторы [20,58,33] разнообразных типов и типоразмеров ёмкостью от долей пикофарада (пФ) до десятков тысяч микрофарад (мкФ), с рабочими напряжениями от единиц до тысяч вольт.

При замене конденсаторов следует обязательно учитывать *номинальное рабочее напряжение*, которое должно быть не меньше, чем реально действующее в схеме. ГОСТ 9665-77 устанавливает следующие номинальные напряжения конденсаторов: 1; 1,6; 2,5; 3,2; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250 и т.д. до 10000 В.

Для повышения надёжности работы при выборе конденсаторов рекомендуется использовать соответствующие коэффициенты запаса (см. подраздел 1.3). Так, если схема работает от 12 вольт, то нужно ставить конденсатор на 16 вольт, если схема работает от 15-16 вольт, то конденсатор лучше поставить на 25 вольт.

К основным параметрам, учитываемым при замене конденсатора, относят номинальную ёмкость, частотный диапазон, в котором работает конденсатор, тангенс угла диэлектрических потерь, температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ).

Как и у резисторов, для номинальных значений ёмкостей установлены семь стандартных рядов [59]: E3, E6, E12, E24, E48, E96, E192. Допускаемое отклонение ёмкости любого конденсатора от номинала обычно указывают в процентах.

Температура и влажность окружающей среды являются важнейшими факторами, влияющими на надёжность. Под воздействием окружающей среды происходит изменения размеров обкладок, зазоров между ними и свойств диэлектрика, что приводит к изменению ёмкости конденсатора, и это нужно учитывать при замене конденсаторов в проектируемом РЭС. Длительное воздействие повышенной температуры вызывает старение диэлектрика, в результате чего параметры конденсаторов претерпевают необратимые изменения.

При повышении температуры, влажности и частоты возрастают потери в конденсаторах, которые характеризует *тангенс угла потерь*. В зависимости от конструкции и применённого диэлектрика конденсаторы характеризуются различными температурными коэффициентами ёмкости (ТКЕ), который показывает относительное изменение ёмкости при изменении температуры на один градус. У керамических высокочастотных, слюдяных, полистирольных и фторопластовых конденсаторов значения тангенса угла потерь находятся в пределах $(10 \dots 15) \times 10^{-4}$, поликарбонатных $(15 \dots 25) \times 10^{-4}$, керамических низкочастотных 0,035, оксидных 5 .. 35%, полиэтилентерефталатных 0,01 .. 0,012. По величине и знаку ТКЕ конденсаторы разделяются на группы, которым присвоены соответствующие буквенные обозначения и цвет окраски корпуса (Таблица 3.6).

Таблица 3.6 - Маркировка линейного температурного коэффициента емкости

Группа	Межд.	P100		NP0	N030	N080	N150	N220	N330	N470	N750	N1500	N2200
	ГОСТ	П100	П33	МП0	М33	М75	М150	М220	М330	М470	М750	М1500	М2200
ТКЕ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		100	33	0	-33	-75	-150	-220	-330	-470	-750	-1500	-2200
Разброс ТКЕ		-49 .. +130		-75 .. +30	-80 .. +30	-80 .. +30	-105 .. +30	-120 .. +30	-180 .. +60	-210 .. +60	-330 .. +120	-670 .. -250	
Цвет	 кра+фио	 сер	 чер	 кор	 кра	 ора	 жел	 зел	 гол	 фио	 ора+ора	 жел+ора	
Символ (межд.)		A	N	C	H	L	P	R	S	T	U	V	K

Особенно важна точность подбора ёмкости и ТКЕ в схемах высокостабильных генераторов, колебательных контуров, таймеров и других частотно-зависимых цепочек. Как правило, в высокочастотных схемах значение ТКЕ указывается. Но если он не приведён, то

желательно применять конденсаторы с малым изменением ёмкости от температуры, например, с кодами ПЗЗ, МПО, МЗЗ. Для сохранения настройки колебательных контуров при работе в широком интервале температур часто используют последовательное и параллельное соединение конденсаторов, у которых ТКЕ имеют разные знаки. Благодаря этому при изменении температуры частота настройки такого термокомпенсированного контура остаётся практически неизменной.

Наихудшее ТКЕ имеют конденсаторы с кодом Н90 (у них ёмкость может изменяться до -90% при изменении температуры от -60°C до +85°C). Но они обычно используются в цепях фильтрации по питанию или как разделительные между каскадами, где ТКЕ для работы схемы большого значения не имеет.

Повышенное давление не оказывает существенного влияния на работу конденсаторов. В условиях низкого давления снижается электрическая прочность воздушного промежутка и создаются условия для пробоев и перекрытия. Во избежание пробоев и перекрытия при пониженном атмосферном давлении необходимо снижать напряжение на конденсаторе.

В РЭС применяют два типа конденсаторов – неполярные и полярные.

В высокочастотных цепях РЭС как правило используют неполярные конденсаторы с малыми потерями и высокой стабильностью на основе органических и неорганических диэлектриков: полистирола, фторопласта, керамики, слюды, бумаги и т.п. (Рис. 3.12).

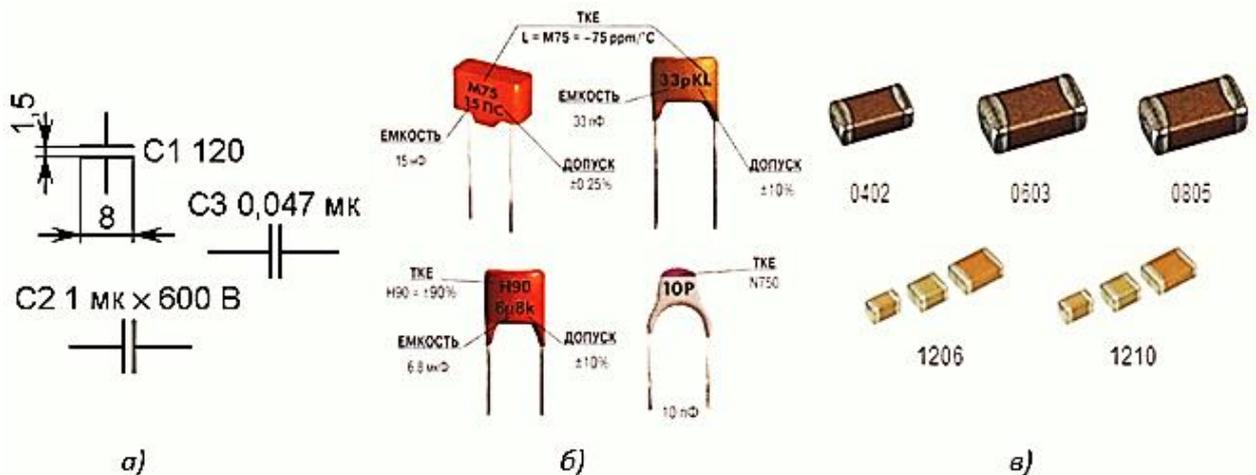


Рис. 3.12 – Неполярные конденсаторы:

- а) – обозначение на схеме; б) – К10-17 и К10-47 с радиальными выводами;
в) – К10-17в и К10-47в для SMD-монтажа

Наименьшими потерями обладают конденсаторы с диэлектриком из высокочастотной керамики, со слюдяными и плёночными диэлектриками, наибольшими — конденсаторы с бумажным диэлектриком, а также из сегнетокерамики.

Учитывая тенденции современной микроминиатюризации, особый интерес представляют чиповые (SMD) керамические конденсаторы (Рис. 3.12 в)).

Для использования в печатном монтаже рекомендуется в первую очередь использовать неполярные отечественные конденсаторы следующих типов.

Выводные конденсаторы с керамическим диэлектриком **K10-17а** (в пластмассовом корпусе) и **K10-17б** (залитые обволакивающим компаундом) (ОЖО.460.107 ТУ) предназначены для применения в цепях постоянного и переменного тока в широком диапазоне частот. Выпускаются по шкале E24 в изолированном всеклиматическом исполнении с номинальными значениями ёмкости от 2,2 пФ до 2,2 мкФ на номинальные рабочие напряжения от 25 до 160 В. Группы по ТКЕ: ПЗЗ, М47, М750, М1500, Н50 и Н90.

Для поверхностного монтажа выпускают незащищённые SMD-конденсаторы **K10-17в** и **K10-17-4в** в соответствии с ОЖО.460.172 ТУ.

Выводные сегнетокерамические конденсаторы K10-47а (в пластмассовом корпусе) и **K10-47б** (залитые обволакивающим компаундом) (ОЖО.460.174 ТУ) также предназначены для применения в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока в широком диапазоне частот. Номинальные значения ёмкости от 10 пФ до 3,3 мкФ. Группы по ТКЕ: МПО, Н30, Н90. Промежуточные значения номинальных ёмкостей соответствуют ряду E12 для МПО; ряду E6 для Н30 и Н90. Номинальные рабочие напряжения 50, 100 и 250 В.

Для поверхностного монтажа для работы в цепях постоянного и переменного тока и в импульсных режимах, а также в составе СВЧ аппаратуры, выпускают незащищённые керамические монолитные SMD-конденсаторы **K10-47в** (ОЖО.460.174 ТУ, ОЖО.460.174-М ТУ), применяемые только в герметичных невскрываемых объёмах или в объёмах, вскрываемых в помещениях с искусственно регулируемым климатическими условиями. Номиналы ёмкостей от 10 пФ до 15 мкФ. Ряды значений номинальной ёмкости E6 и E24. Группы по ТКЕ: МПО, Н30 и Н90. Номинальные рабочие напряжения 16, 50, 100, 250 и 500 В. Интервал температур для групп МПО и Н30 - от минус 60 до +125 °С, для группы Н90 - от -60 .. +85 °С.

Для поверхностного монтажа применяются также керамические монолитные «чип» - конденсаторы **K10-50в** (Рис. 3.13) (ОЖО.460.192 ТУ, ОЖО.460.182 ТУ, ОЖО.460.183 ТУ) для работы в цепях постоянного и переменного тока и в импульсных режимах. Номинальные ёмкости от 22 пФ до 4,7 мкФ. Ряды значений номинальной ёмкости E6, E12 и E24. Группы по ТКЕ: МПО, Н20, Н50 и Н90. Номинальные рабочие напряжения 16 и 25 В.



Рис. 3.13 - Конденсаторы K10-50в

Выводные полиэтилентерефталатные металлизированные конденсаторы K73-17 (АДПК.673633.020 ТУ) предназначены для работы в цепях постоянного, переменного, пульсирующего токов и в импульсном режиме. Обладают возможностью самовосстановления и, следовательно, возможность короткого замыкания практически исключается (Рис. 3.14).

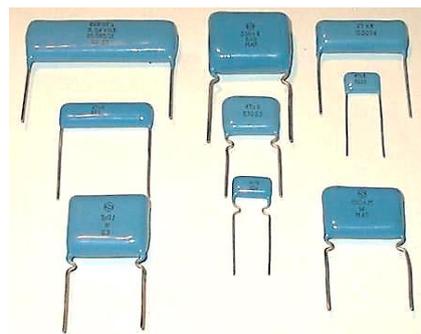


Рис. 3.14 - Конденсаторы K73-17

Конденсаторы К73-17 устойчивы к большим импульсным токам, высокому уровню пульсаций и имеют большой срок службы. Номинальные значения ёмкости от 0,01 до 4,7 мкФ. Допустимое изменение ёмкости конденсаторов от измеренной в нормальных условиях не более 18 % в интервале рабочих температур от -60 до +125 °С. Номинальные рабочие напряжения 63, 160, 250, 400, 630 В.

Для работы в низкочастотном диапазоне, а также для фильтрации выпрямленных напряжений питания необходимы конденсаторы, ёмкость которых измеряется десятками, сотнями и даже тысячами микрофарад. Такую ёмкость при достаточно малых размерах имеют полярные и неполярные *оксидные* (прежнее название — *электролитические*) конденсаторы (Рис. 3.15), которые в качестве диэлектрика используют тонкую оксидную плёнку, нанесённую на поверхность алюминиевого, танталового или ниобиевого электрода — анода. В роли второго электрода (катода) выступает электролит (Рис. 3.15, б)).

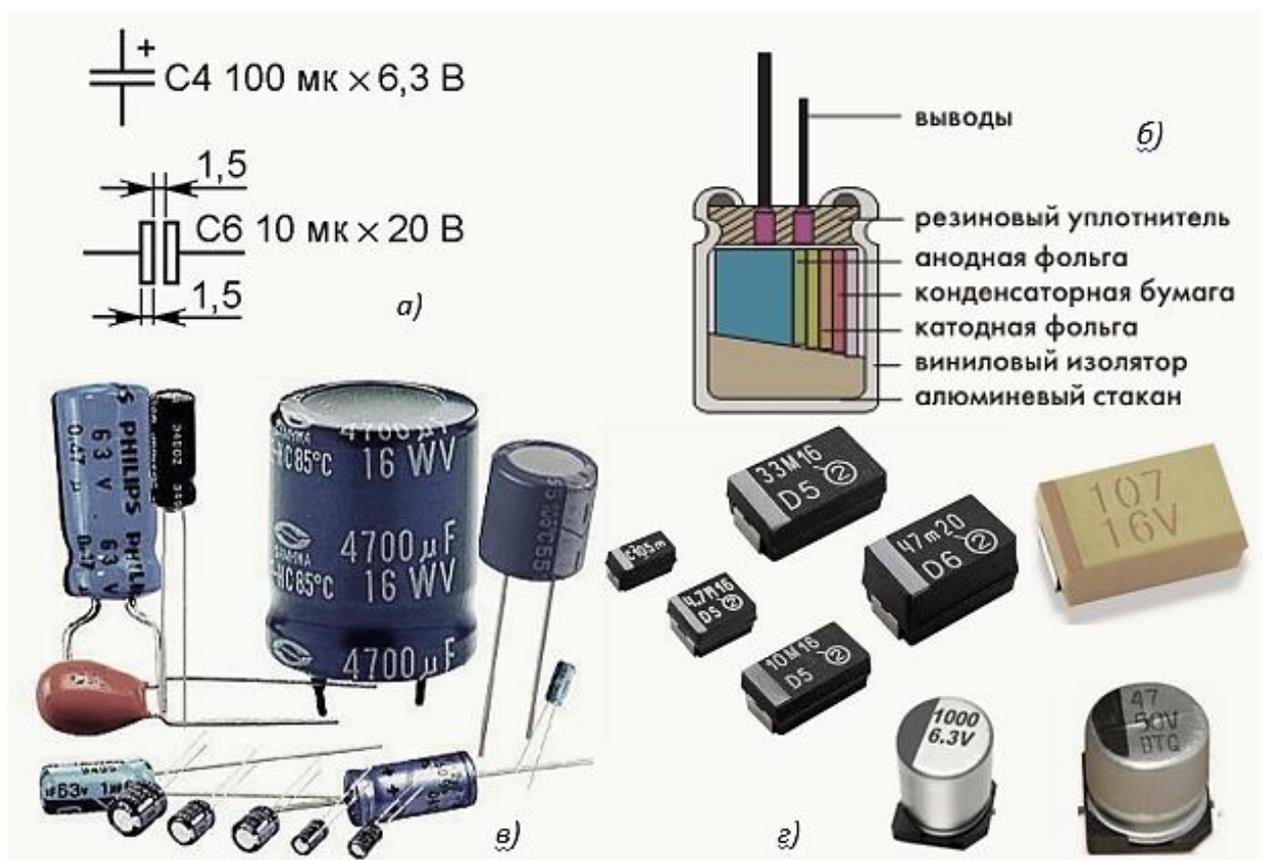


Рис. 3.15 - Оксидные конденсаторы:

а) – условные обозначения полярных и неполярных конденсаторов; б) – конструкция; в) – выводные (длинный вывод – плюсовой, короткий – минусовой); г) – безвыводные (со стороны отрицательного вывода конденсатора на верхней части корпуса чёрный полукруг или полоса)

У оксидных конденсаторов как правило значительный ток утечки, а фактическая ёмкость при нормальной температуре может быть на 20% меньше и на 80% больше номинальной. При максимальной рабочей температуре, которая для конденсатора широкого применения составляет 70 .. 80 °С, ёмкость может увеличиваться на 20 .. 30% по сравнению

с измеренной при нормальной температуре. У конденсаторов, предназначенных для бытовой аппаратуры, ёмкость при температуре -10°C может уменьшиться в два раза по сравнению с ёмкостью при нормальной температуре (конденсаторы К50-6, К50-7). В аппаратуре для полевых, условий работы используются конденсаторы (К50-3, К50-3А, К50-3Б), у которых ёмкость снижается не более чем в два раза при температуре $-40 \dots -60^{\circ}\text{C}$. Номинальная ёмкость электролитических конденсаторов значительно уменьшается по мере их срока эксплуатации, так как жидкий электролит со временем высыхает из-за невозможности достичь достаточной герметизации корпуса. У оксидных конденсаторов при низких температурах увеличивается тангенс угла потерь. Все типы оксидных конденсаторов с жидким или пастообразным электролитом при температурах ниже 60°C практически неработоспособны из-за резкого снижения ёмкости и увеличения тангенса угла потерь.

В отличие от неполярных конденсаторов полярные конденсаторы очень чувствительны к перенапряжениям, а включать их в схему нужно строго соблюдая полярность. Включение конденсатора с обратной к рабочей полярности вызывает увеличение тока утечки и резкое ухудшение параметров. От этого он может нагреться, а при достаточной мощности цепи и взорваться. По той же причине конденсаторы с оксидным диэлектриком можно применять только в цепях, где полярность напряжения на конденсаторе неизменна (с пульсирующим или постоянным напряжением). При работе конденсатора в цепи, где имеется и переменная и постоянная составляющие, общая сумма напряжения постоянного тока и амплитудного значения напряжения, переменного тока не должна превышать номинального напряжения. Если переменная составляющая напряжения мала (например, во всех каскадах усиления высокой и промежуточной частот приёмника), то, выбирая конденсатор достаточно учитывать только постоянное напряжение на нем. Но в цепях оконечных каскадов усилителей и в выпрямителях надо учитывать также и переменную составляющую.

Вариконды (от англ. *variable* - переменный и *condenser* — конденсатор) представляют собой сегнетокерамические конденсаторы на основе титаната бария, стронция, кальция и т.д., отличающиеся особо нелинейными свойствами (Рис. 3.16). Они характеризуются повышенной диэлектрической проницаемостью и её резкой зависимостью от температуры и напряжённости поля. При изменении приложенного к ним переменного напряжения ёмкость таких конденсаторов может изменяться в 4—8 раз. Значения номинальной ёмкости варикондов в зависимости от материала и конструкции могут быть выбраны в пределах от 1 пФ до 1 мкФ.

При замене следует учитывать особенности варикондов - значительную временную и температурную нестабильность ёмкости, ограниченный диапазон рабочих частот и температур, высокие значения диэлектрических потерь.

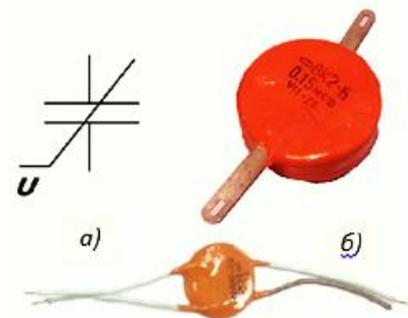


Рис. 3.16 – Вариконд:

- а) - условное обозначение;
б) – конструкции варикондов

Существенные нелинейные свойства варикондов используют для электрической настройки колебательных контуров, в разнообразных устройствах автоматики, для стабилизации тока и напряжения, умножения частоты, преобразования синусоидального напряжения в импульсное, усиления электрической мощности, модуляторов, и т. д.

3.6 Диоды

Диоды имеют один электрический $p-n$ -переход и два вывода. При подключении диодов следует строго соблюдать полярность - они пропускают ток только в одном направлении – от анода (+) к катоду (-). Обычно диоды используются для выпрямления переменного тока в источниках питания, детектирования сигналов и т.п.

При замене нужно учитывать, что заменяющий диод должен относиться к той же группе (высокочастотные или СВЧ-диоды, выпрямительные, импульсные, стабилитроны т.д.), что и заменяемый. Точечные диоды заменяется также точечными, плоскостное – плоскостными. В любом случае при замене диодов в первую очередь обращают внимание на такие параметры как предельно допустимый средний прямой ток и максимальное обратное напряжение. Эти параметры у заменяющих диодов должны быть не меньше, чем у заменяемых. В некоторых схемах РЭС при замене необходимо учитывать также обратный ток (ток утечки диода, когда он заперт) и прямое падение напряжения. Ёмкость перехода заменяющих диодов не должна быть больше, чем у заменяемых. Если частота переменного напряжения, приложенного к диоду, превышает допустимую рабочую частоту f_d , то потери в диоде резко возрастают и он нагревается. Важнейший параметр всех диодов – допустимый диапазон температур окружающей среды T и максимальная допустимая температура корпуса T_k .

В схемах РЭС применяются разные по конструкции и свойствам типы диодов [25,28,44,21].

Выпрямительные диоды (Рис. 3.17) используют для преобразования переменного тока в постоянный.

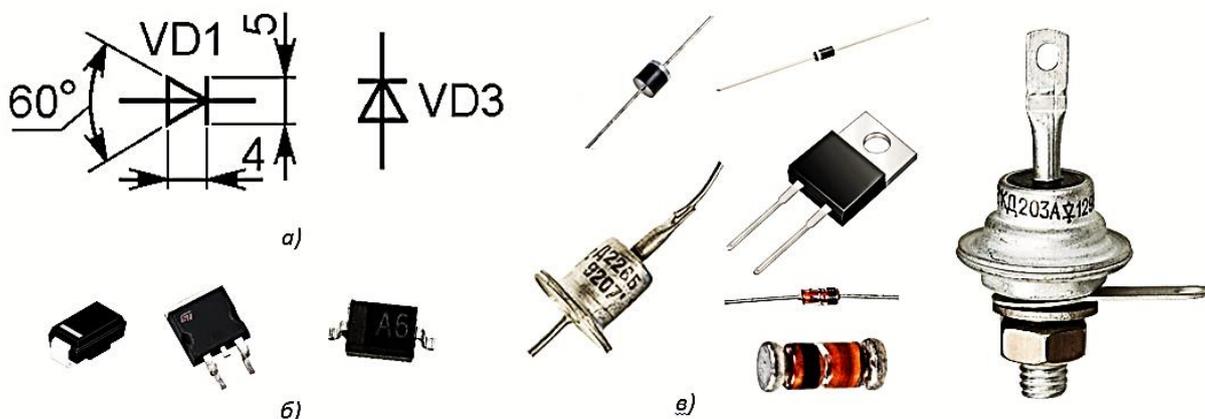


Рис. 3.17 – Полупроводниковые выпрямительные диоды:

а) - условное обозначение; б) – SMD-диоды; в) – выводные диоды

Выпрямительные диоды работают с токами и напряжениями в широком диапазоне. Частотный диапазон выпрямленных переменных напряжений также очень широк: от промышленной частоты 50 Гц до десятков и сотен кГц в источниках вторичного электропитания

с промежуточной частотой преобразования. Поэтому в РЭС используется большое количество различных типов выпрямительных диодов, позволяющих проектировать РЭС с минимальными потерями преобразования при небольших габаритах, массе и стоимости. Мощность, рассеиваемая всевозможными выпрямительными диодами может находиться в пределах от долей до десятков и более Вт.

Для диодов, работающих в мощных силовых цепях, обязателен тепловой расчёт и нередко требуются теплоотводы-радиаторы.

Диодные мосты (Рис. 3.18), часто используемые для двухполупериодного выпрямления, можно составить из четырёх одинаковых диодов, но удобнее использовать готовые. На вход мостовой схемы подаётся переменное напряжение $\sim U_{вх}$ (не обязательно синусоидальное). В каждый из полупериодов ток проходит только через 2 диода, 2 других — заперты. В результате, на выходе получается напряжение $U_{вых}$, пульсирующее с частотой вдвое большей частоты питающего напряжения.

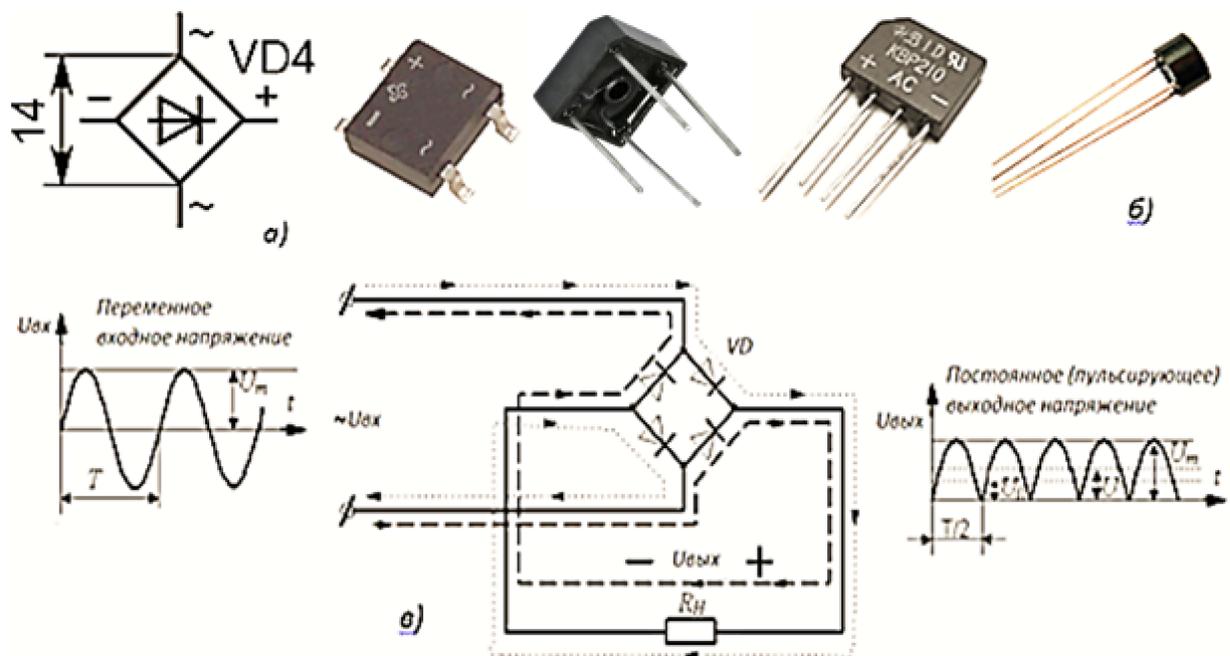


Рис. 3.18 – Диодные выпрямительные мосты:

- а) - условное обозначение; б) – конструкции выпрямительных мостов;
в) – принцип работы двухполупериодного выпрямительного моста

Для уменьшения потерь выпрямительные диоды должны иметь малые сопротивления в прямом направлении. У германиевых диодов малое падение напряжения при протекании прямого тока (0,3 .. 0,6 В) и они могут работать при температуре 80 .. 100 °С. Кремниевые диоды характеризуются малыми обратными токами и более высокой рабочей температурой (150 - 200 °С). Они выдерживают большие по сравнению с германиевыми диодами обратные напряжения, однако сопротивление в прямом направлении у них больше - 0,8 .. 1,2 В.

Стабилитроны и стабилиторы (Рис. 3.19) - разновидности полупроводниковых диодов, которые имеют на вольтамперной характеристике (ВАХ) участки со слабой зависимостью напряжения от значения проходящего тока, поэтому уровень напряжения на них остаётся постоянным при изменении тока в широких пределах.

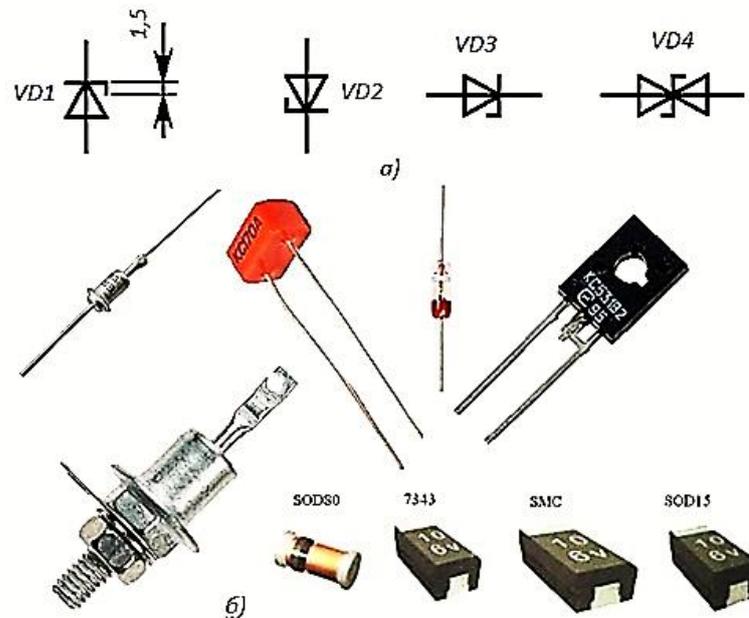


Рис. 3.19 – Стабилитроны и стабилиторы:

- a)* - условные обозначения (*VD1 – VD3* – однонаправленные, *VD4* – двуханодный);
б) – конструкции различных стабилитронов и стабилиторов

Стабилитроны (диоды Зенера) работают на обратной ветви вольтамперной характеристики. Как видно (Рис. 3.20 *a*), в области пробоя напряжение на стабилитроне $U_{СТ}$ лишь незначительно изменяется при больших изменениях тока стабилизации $I_{СТ}$. Такая характеристика используется для получения стабильного (опорного) напряжения.

Стабилитроны используются прежде всего в стабилизаторах постоянного напряжения источников питания, ограничителях постоянного тока или импульсного напряжения, в качестве источников эталонного или опорного напряжения в устройствах, где необходима высокая точность стабилизации уровня напряжения.

У стабилиторов используется *прямая ветвь* вольтамперной характеристики (Рис. 3.20, *в*). У них меньшее напряжение стабилизации - 0.7 .. 3 В, и полярность включения другая (Рис. 3.20, *г*).

Типовые схемы включения стабилитрона и стабилитора - это схемы параметрической стабилизации напряжения (Рис. 3.20, *б*, *г*). Напряжение на стабилитрон подаётся в обратной полярности, а на стабилитор – в прямой.

Основные параметры стабилитронов и стабилиторов, учитываемые при замене:

- $U_{СТ}$ - напряжение стабилизации при номинальном токе стабилизации (3.1 .. 200 В);
- $I_{СТ. ном.}$ - номинальный ток стабилизации;
- $I_{СТ. мин.}$ - минимальный ток стабилизации;
- $I_{СТ. макс.}$ - максимальный ток стабилизации;

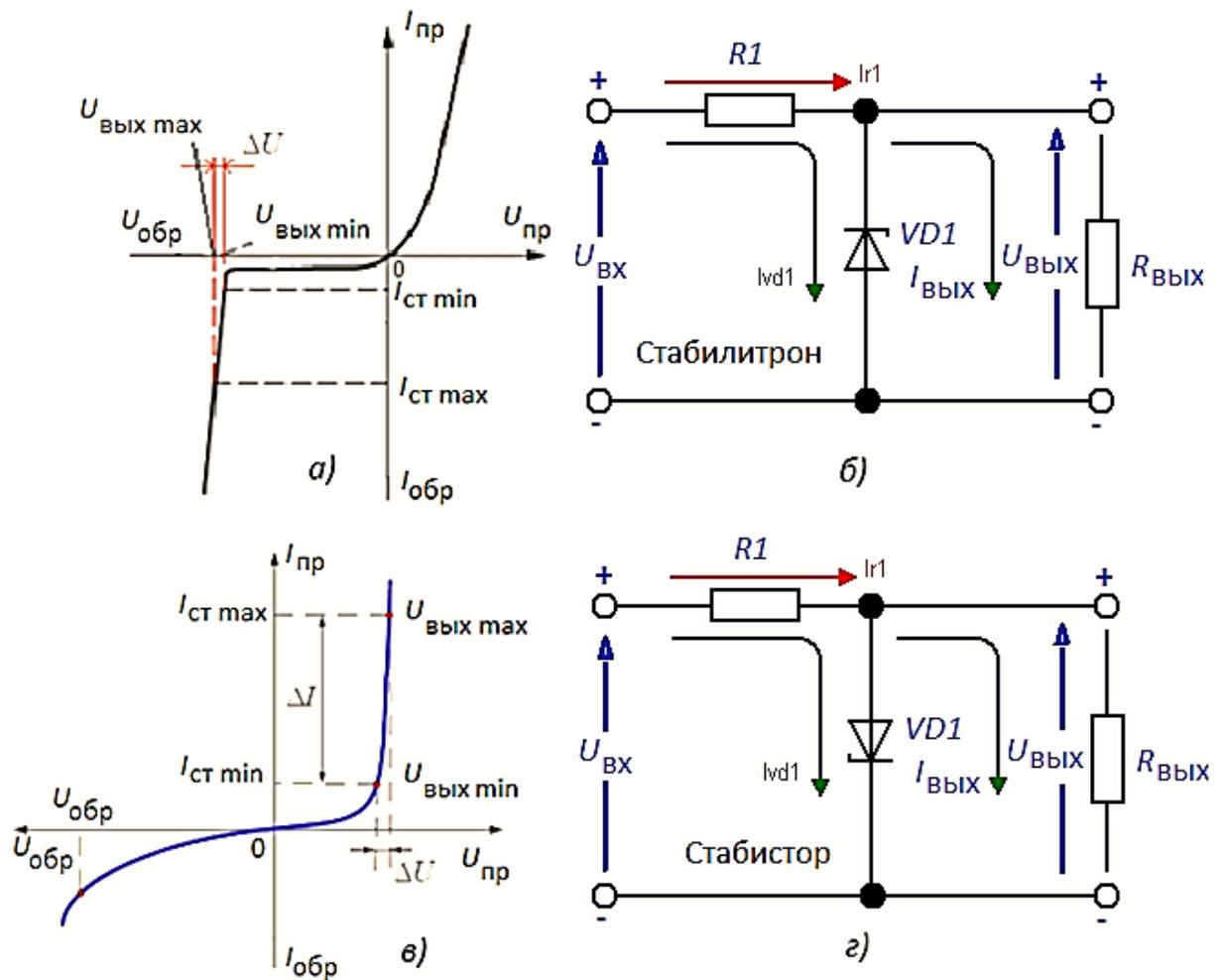


Рис. 3.20 – Параметрические стабилизаторы напряжения на стабилитронах и стабилистрах: а) VAX стабилитрона; б) подключение стабилитронов; в) VAX стабилистра; г) подключение стабилисторов

- P_{\max} - максимальная рассеиваемая мощность;
- ΔU - максимально допустимое отклонение напряжения стабилизации от номинального для стабилитронов данного типа;

– $r_{\text{ст}}$ – дифференциальное сопротивление - отношение приращения напряжения стабилизации к вызвавшему его приращению тока стабилизации;

- $\alpha_{\text{ст}}$ - температурный коэффициент напряжения стабилизации, $\%/^{\circ}\text{C}$.

Двуханодные (двуполярные) стабилитроны представляют собой два одинаковых встречно включённых стабилитрона. Они предназначены для симметричного ограничения двуполярных напряжений.

Напряжение стабилизации, максимальный и минимальный токи заменяемых стабилитронов и стабилисторов не должны отличаться более чем на 10%.

Высокочастотные, импульсные и СВЧ-диоды (Рис. 3.21). Это универсальные диоды, способные работать в детекторах¹⁵, модуляторах и других нелинейных преобразователях высокочастотных электрических сигналов до 600 МГц (СВЧ диоды - до 12 ГГц).

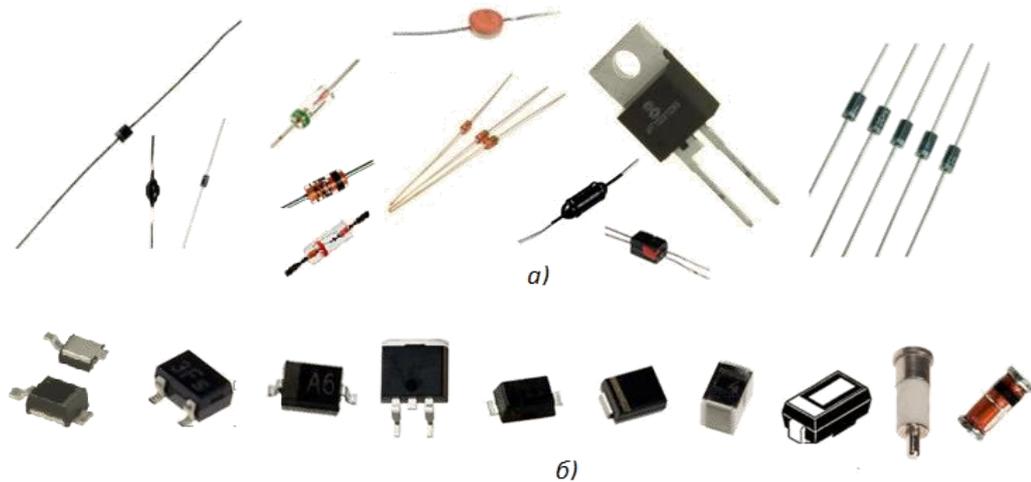


Рис. 3.21 - Высокочастотные, импульсные и СВЧ-диоды:
а) выводные; б) SMD-диоды

Применение полупроводниковых диодов в высокочастотных схемах приводит к необходимости учитывать паразитную ёмкость $p-n$ -перехода диода. Для улучшения частотных свойств стремятся уменьшить площадь $p-n$ -перехода, исполняя его точечным, вследствие чего ёмкость $p-n$ -перехода может составлять менее 1пФ. Для уменьшения паразитных индуктивностей выводов применяют высокочастотные SMD-диоды (Рис. 3.21, б).

Разновидностью высокочастотных диодов являются **импульсные диоды**, предназначенные для работы в быстродействующих импульсных ключевых схемах с минимальной длительностью переходных процессов при включении и выключении (1 мкс и менее). Главными признаками, отличающими импульсные диоды от других видов диодов, являются малая площадь $p-n$ -перехода и малое время жизни неравновесных носителей заряда. Конструкция импульсных диодов, а также их вольтамперные характеристики практически такие же, как у высокочастотных. Мощные импульсные диоды могут иметь плоскостные $p-n$ -переходы.

Как и прочие диоды, импульсные диоды характеризуются параметрами предельных режимов по токам и напряжениям [28,21]. Важнейшими параметрами импульсных диодов являются ёмкость $p-n$ -перехода, время установления прямого напряжения и время восстановления запирающих свойств диода после снятия прямого напряжения.

Варикапы (от англ. *variable*) — «переменный», и *capacity*) — «ёмкость») - это полупроводниковые приборы с изменяемой ёмкостью (Рис. 3.22). Принцип их работы основан на изменении барьерной ёмкости полупроводникового $p-n$ -перехода при изменении приложенного напряжения.

¹⁵ Детектор (демодулятор) - электронный узел, отделяющий полезный (модулирующий) сигнал от несущей составляющей. Существует много разновидностей детекторов: амплитудный, частотный, фазовый, видео и др.

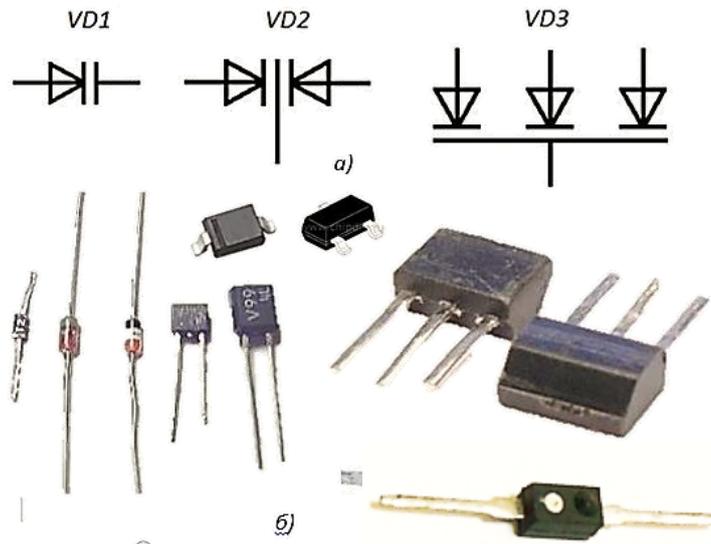


Рис. 3.22 – Варикапы:

- а) - условные обозначения (VD1 – одиночный, VD2, VD3 – матрица варикапов);
 б) – конструкции различных варикапов

У варикапов барьерная ёмкость может меняться в достаточно широких пределах - в 3 – 5 раз и более. В справочных данных указывают минимально C_{min} и максимально C_{max} возможные ёмкости варикапа при фиксированном обратном напряжении $U_{обр}$. Пределы изменения ёмкости заменяемых и заменяющих варикапов должны быть одинаковыми.

Чаще всего варикапы служат для перестройки резонансной частоты колебательных контуров или автоподстройки на частоту передатчика в радиоприёмных узлах телевизоров, приёмников и радиотелефонов, для усиления и генерации СВЧ сигналов, деления и умножения частоты, частотной модуляции, управляемых фазовращателей и др.

Диоды Шоттки вместо $p-n$ -перехода в качестве барьера используют металл – полупроводник (Рис. 3.23). В области этого перехода возникает потенциальный барьер Шоттки, изменение высоты которого приводит к изменению протекания тока.

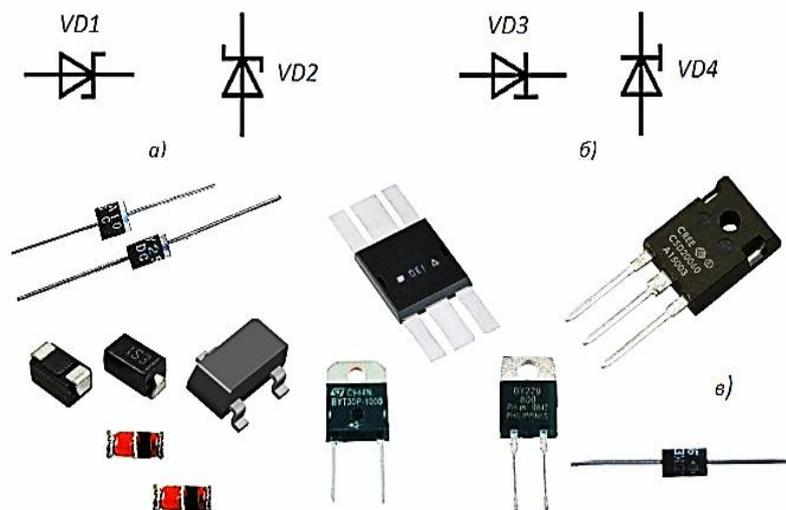


Рис. 3.23 – Диоды Шоттки:

- а) - условные обозначения (VD1, VD2 – обычный), б) - VD3, VD4 - ограничительный);
 в) – конструкции различных диодов Шоттки

У диодов Шоттки пониженное падение напряжения при прямом включении (0,2-0,4 вольта) на переходе, маленькое время восстановления, малая ёмкость перехода (барьера), что позволяет повысить их рабочую частоту. Диоды Шоттки, выполненные по нанотехнологии, входят в состав интегральных микросхем, где ими для повышения быстродействия шунтируют переходы транзисторов.

Диоды Шоттки активно применяют в блоках питания компьютеров и импульсных стабилизаторах напряжения на частотах в сотни килогерц.

Туннельные диоды используют туннельный эффект в тонких $p-n$ -переходах и предназначены в качестве активных элементов для генерирования и усиления высокочастотных электрических сигналов на частотах до нескольких гигагерц, а также в качестве переключаемых элементов во всевозможных импульсных устройствах, что весьма оправдано, учитывая высокое быстродействие туннельных диодов (Рис. 3.24).

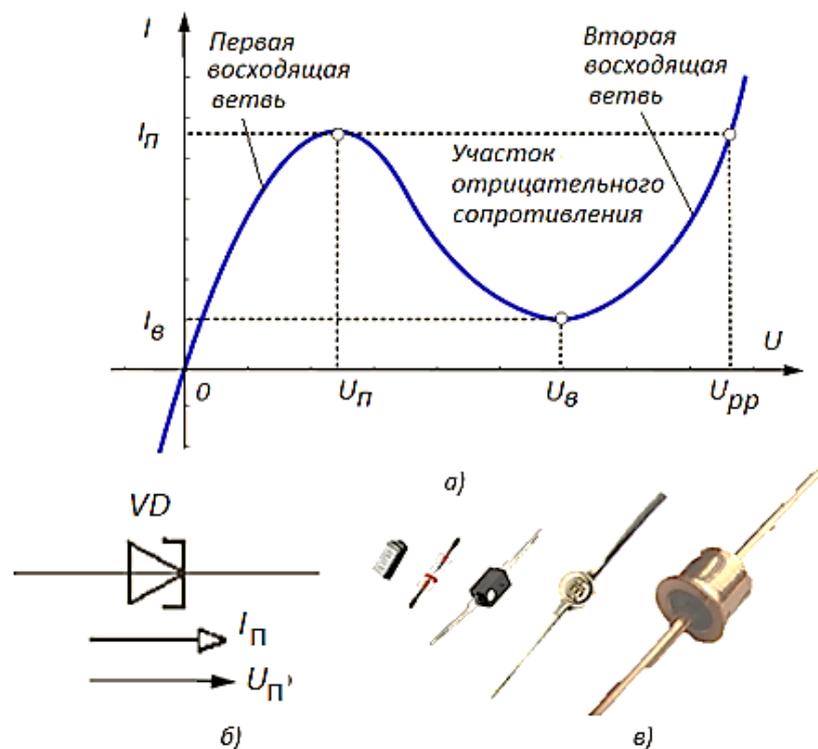


Рис. 3.24 – Туннельные диоды:

- а) - вольтамперная характеристика; б) – условное обозначение;
в) - конструкции различных туннельных диодов

Важнейшая особенность туннельных диодов - наличие отрицательного дифференциального сопротивления на некотором участке прямой ветки ВАХ (см. Рис. 3.24, а). При низких напряжениях (доли вольт) за счёт туннельного эффекта ток через диод сначала растёт, затем падает и при дальнейшем повышении напряжения (единицы вольт) ток снова растёт, как и у обычного диода.

Вследствие малой инерционности туннельного эффекта отрицательное сопротивление фактически не зависит от частоты. Туннельные диоды могут работать в широком интервале температур (от нескольких сот градусов Цельсия до абсолютного нуля).

При замене обращают внимание на следующие параметры туннельного диода:

- I_p - ток пика;
- U_p - напряжение пика;
- I_v - ток впадины;
- U_v - напряжение пика;
- U_{pp} - напряжение конца участка отрицательного сопротивления - прямое напряжение, большее U_p , при котором ток равен I_p ;
- C_d - ёмкость диода (обычно при напряжении U_v) - характеризует частотные свойства диода

Светодиод (англ. *light-emitting diode, LED*) - полупроводниковый прибор, преобразующий электрический ток непосредственно в световое излучение определённого цвета (Рис. 3.25). Так как светодиод является полупроводниковым прибором, то при включении в цепь *необходимо соблюдать полярность*. Светодиод будет «гореть» только при прямом включении. В зависимости от материала полупроводника, из которого изготовлен светодиод и от легирующих примесей, он может излучать свет разной длины волны (разного цвета) и иметь различные электрические характеристики.

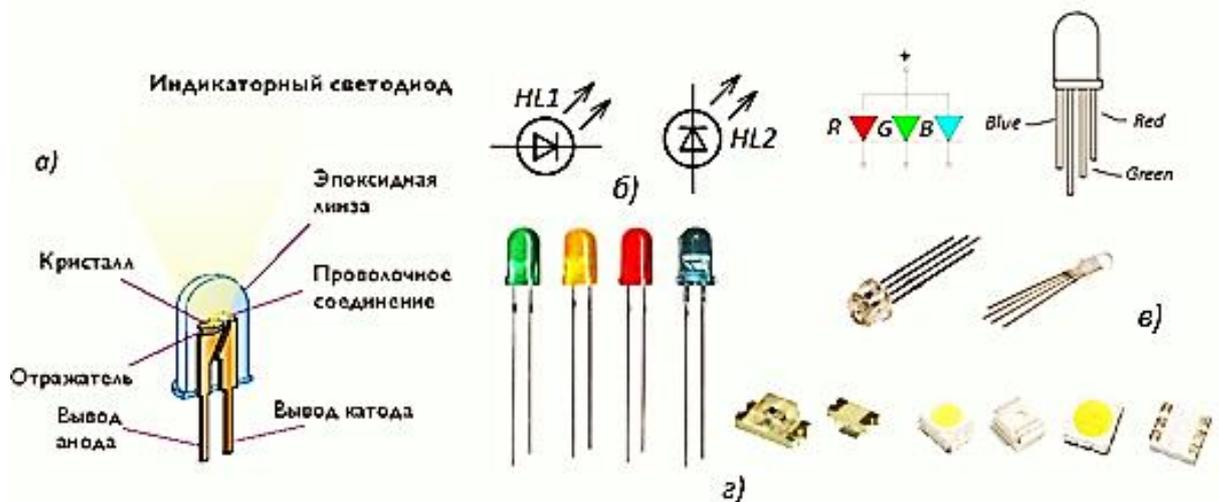


Рис. 3.25 – Светодиоды:

- а) - устройство; б) – условное обозначение; в) - RGB-светодиоды;
 в) - конструкции различных светодиодов

Многоцветные RGB-светодиоды (см. Рис. 3.25, в), совмещающие в себе три обычных светодиода — красный, зелёный и синий, что соответствует их названию. Общим выводом могут быть и катод (-) и анод (+). Светодиоды широко применяются в качестве средств отображения визуальной информации: в промышленном и медицинском оборудовании, игрушках и т.д.

Многоцветные светодиоды применяют для создания многокрасочных информационных электронных табло и вывесок, в светофорах, щитах на автомагистралях, в гигантских видеозэкранах.

Для отображения цифр, букв и других знаков в РЭС часто применяют конструкции из нескольких светодиодов - сегментные знаковые индикаторы, светодиодные матрицы, кластеры и так далее (Рис. 3.26).

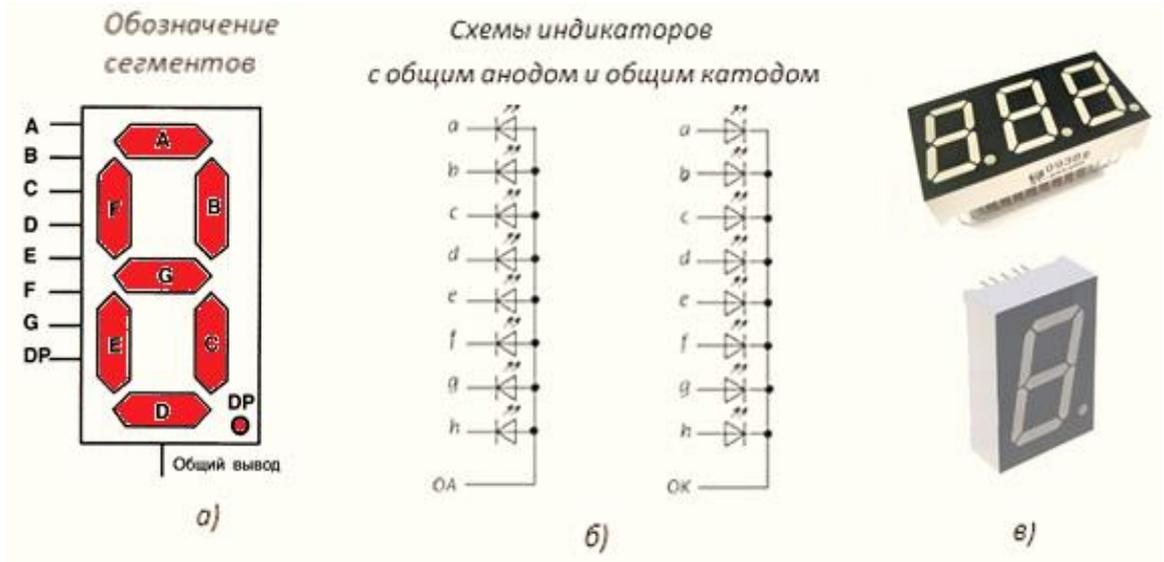


Рис. 3.26 – Светодиодные знаковые индикаторы:

а) - обозначение сегментов; б) – схемы; в) - конструкции различных индикаторов

Фотодиоды (Рис. 3.27). У полупроводниковых фотодиодов в корпусе есть окошко, через которое освещается $p-n$ -переход [28,33]. В отсутствие света обратный ток через $p-n$ -переход очень мал, а под воздействием света он существенно возрастает.

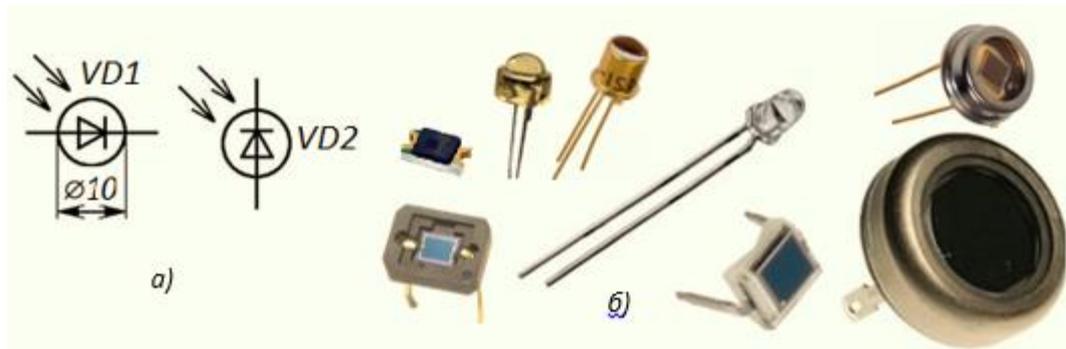


Рис. 3.27 – Фотодиоды: а) – условные графические обозначения; б) - конструкции

В последние годы светодиоды активно используют в автомобильных фарах, фонарях, светильниках и люстрах. Светодиодной подсветкой оснащаются высококачественные жидкокристаллические телевизоры и компьютеры.

В зависимости от материала (кремний, германий, арсенид галлия и др.) фотодиоды могут иметь спектральную характеристику, позволяющую регистрировать свет в инфракрасном, оптическом и ультрафиолетовом диапазоне длин волн спектра. Это обязательно следует учитывать при замене. Кроме этого необходимо обратить внимание на напряжение питания, интегральную чувствительность (измеряется в миллиамперах на люмен, мА/лм) заменяющего фотодиода, и его инерционность.

Фотодиоды находят применение в качестве различных датчиков автоматизации производственных процессов - датчиков освещённости, концевых датчиков, датчиков расстояния, в регистрирующих и измерительных приборах фотометрии, в медицине – датчики пульса и т.п. Фотодиоды широко используются как составная часть оптопар и оптореле.

В качестве элемента питания они входят в состав солнечных батарей на космических кораблях, так как под воздействием света на выводах фотодиода появляется напряжение, зависящее от потока излучения и нагрузки.

Кроме фотодиодов, для тех же целей применяют фоторезисторы, фототранзисторы и фототиристоры, в которых используется внутренний фотоэффект.

3.7 Тиристоры

Тиристорами (от греческого *thyra* — дверь и английского *resistor* — резистор) называют переключательные (обычно кремниевые) полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми состояниями: закрытое состояние (низкая проводимость) и открытое состояние (высокая проводимость) [28,33,21]. Тиристоры имеют три или более чередующихся *p-n*-переходов (структура *p-n-p-n*) (Рис. 3.28, а). У всех видов тиристоров на вольтамперной характеристике (ВАХ) присутствует участок отрицательного дифференциального сопротивления (Рис. 3.28, б).

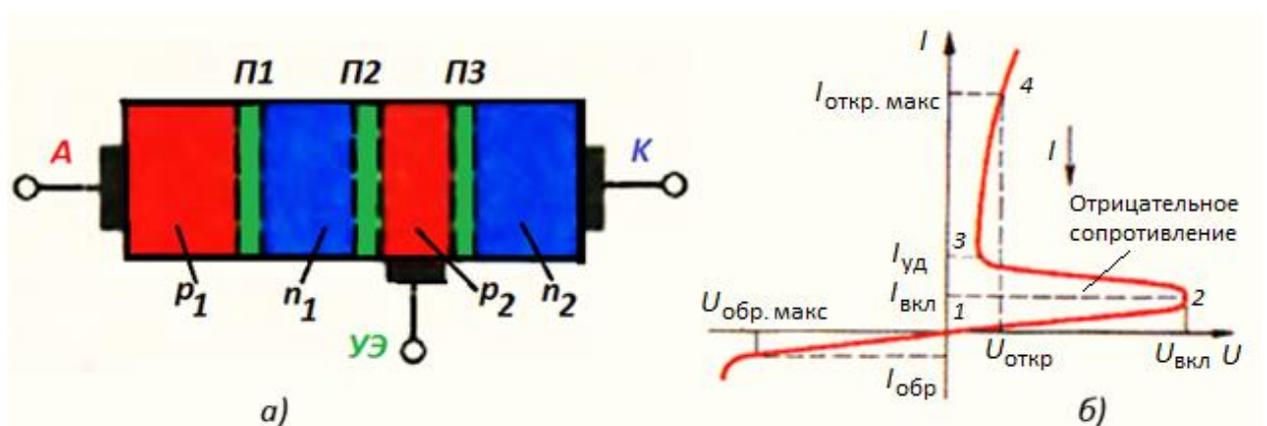


Рис. 3.28 – Тиристор:

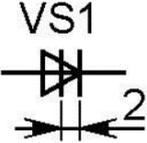
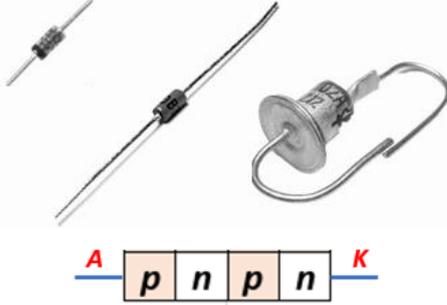
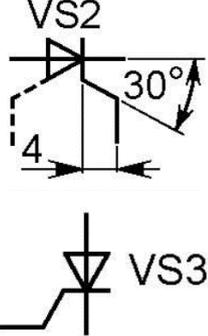
а) - схема четырехслойной структуры; б) – вольтамперная характеристика

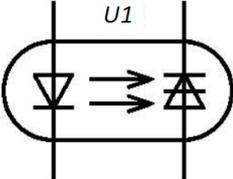
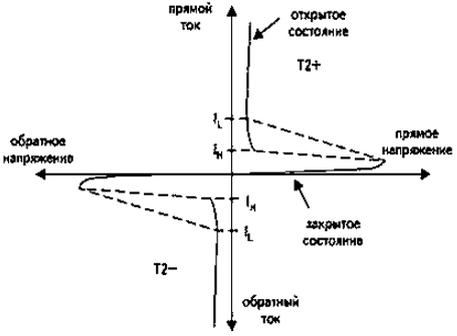
Участок характеристики между точками 1 и 2 соответствует закрытому состоянию с высоким сопротивлением. В этом случае основная часть напряжения U падает на коллекторном переходе П2, который в смещён в обратном направлении. Эмиттерные переходы П1 и П2 включены в прямом направлении. Первый участок ВАХ тиристора аналогичен обратной ветви ВАХ *p-n*-перехода. При достижении напряжения включения $U_{вкл}$, или тока включения $I_{вкл}$ ВАХ тиристора переходит на участок между точками 3 и 4, соответствующий открытому состоянию (низкое сопротивление). Между точками 2 и 3 находится переходный участок характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением, не наблюдаемый на статических ВАХ тиристора.

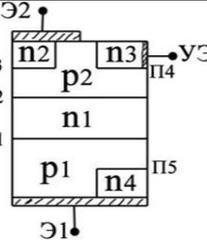
Тиристоры с дополнительным третьим выводом (управляющим электродом) от одного из внутренних слоёв структуры называют тринисторами.

Тиристоры - мощные электронные ключи, используемые для коммутации высоковольтных цепей, управления большими токами, для регулирования мощностей, для плавного пуска двигателей или включения лампочек и т.п. (Таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Некоторые виды тиристоров

Название	УГО	Примеры конструкции
<p>Динистор (диодный тиристор без управляющих электродов) - имеет два вывода. Переходит в проводящее состояние при превышении определённого уровня напряжения, зависящего от типа динистора. Выключение осуществляется либо размыканием цепи, либо кратковременной подачей на динистор обратного напряжения.</p>		
<p>В обозначении тринисторов управление по аноду показывают линией, продолжающей одну из сторон треугольника, символизирующего анод (VS2), по катоду — ломаной линией, присоединённой к символу катода (VS3). Подавая управляющее напряжение, можно регулировать значение $U_{вкл}$. Чем больше ток через управляющий переход, тем меньше $U_{вкл}$.</p> <p>Применяют тринисторы в устройствах переменного тока — для управления электродвигателями, в выпрямителях и инверторах, импульсных схемах, устройствах автоматики и др.</p>		

Название	УГО	Примеры конструкции
<p>Оптотиристор — оптоэлектронный полупроводниковый прибор (оптопара), в котором источник света -- управляющий светодиод малой мощности интегрирован в одном светонепроницаемом корпусе с кремниевой тиристорной структурой (фототиристором).</p> <p>Оптотиристор включается не напряжением, а светом, падающим на тиристорную структуру, обеспечивая электрическую (гальваническую) развязку силовых цепей от цепей управления, что упрощает системы управления.</p> <p>Оптотиристоры применяют в различных преобразователях электроэнергии постоянного и переменного тока частотой до 500 Гц.</p>		
<p>Симистор (англ. <i>triac</i> – <i>triode for alternating current</i>) - симметричный тиристор, эквивалентный двум встречно-параллельно включённым тиристорам. Может проводить ток как от анода к катоду, так и в обратном направлении.</p> <p>Предназначены для коммутации нагрузки в сети переменного тока. В современных блоках управления (кухонные приборы, нагревательные устройства, швейные и стиральные машины, пылесосы, вентиляторы, строительный электроинструмент и т.п.), блоках пуска электродвигателей электронных устройств установлены именно симисторы.</p>		 <p>ВАХ симистора</p>

Название	УГО	Примеры конструкции
<p>Симисторы имеют пятислойную структуру и обладают отрицательным сопротивлением и на прямой и на обратной ветвях вольтамперной характеристики.</p> <p>Включают симистор подачей сигналов управления, выключают - снятием разности потенциалов между силовыми электродами или изменением их полярности.</p>	 <p>Структура симистора</p>	

Основные параметры, учитываемые при замене тиристоры: I — максимальный рабочий ток; $U_{обр}$ — максимальное обратное напряжение; $I_{вкл}$ — максимальный ток включения.

3.8 Оптроны

Оптрон (от англ. *optical-electronic device*) - оптоэлектронный прибор, состоящий из светоищлучателя (светодиод) и фотоприёмника (фоторезистор, фотодиод, фототранзистор, фототиристор), конструктивно связанных друг с другом и объединённых между собой тем или иным видом оптической и электрической связи (Рис. 3.29). Функционально принцип действия оптронов любого вида одинаков [33,26,57,21]. В излучателе энергия электрического сигнала преобразуется в световую, в фотоприемнике, наоборот, световой сигнал вызывает электрический отклик.

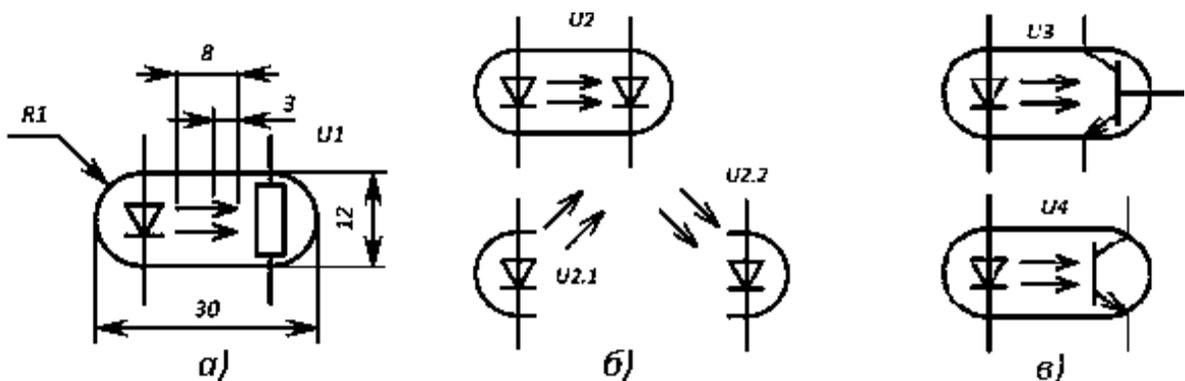


Рис. 3.29 – Оптроны:

а) - резисторный; б) – диодный; в)- транзисторный

Простейший оптрон (элементарная оптопара) представляет собой оптоэлектронный полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми имеется оптическая связь, обеспечивающая электрическую изоляцию между входом и выходом. В оптоэлектронной интегральной микросхеме может быть одна или нескольких оптопар и электрически соединенных с ними одного или нескольких согласующих или усилительных устройств.

Принципиальное физическое достоинство оптронов заключается в обеспечении очень высокой электрической (гальванической) изоляции входа и выхода и отсутствие обратной связи с выхода на вход. Такая гальваническая развязка позволяет объединять блоки РЭС, между которыми имеется значительная разность потенциалов, нужны защита входных цепей измерительных устройств от помех и наводок или бесконтактное управление сильнотоковыми и высоковольтными цепями

Разработаны всевозможные конструкции оптронов (Рис. 3.30), которые повсеместно применяются в РЭС: в радиотехнических схемах модуляции, автоматической регулировки усиления, бесконтактной перестройки режимов, в системах контроля и регулирования, в автоматизированных системах управления, в вычислительной, связной и измерительной технике, медицинской электронике и т.п.

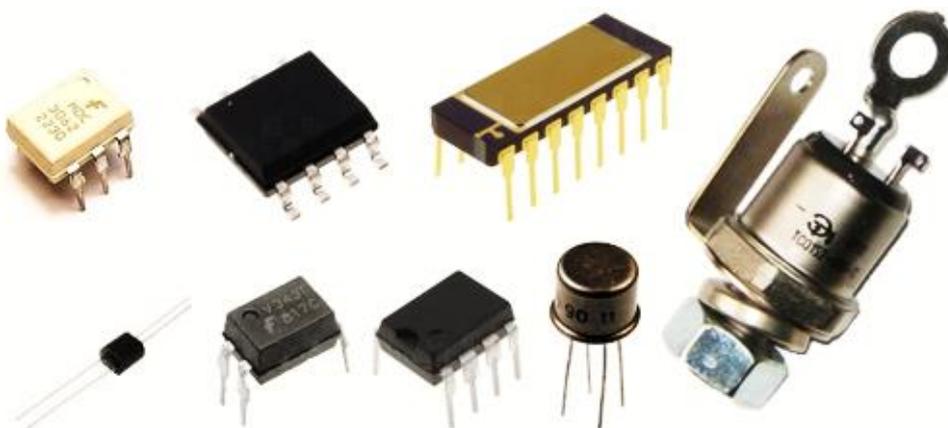


Рис. 3.30 - Конструкции оптронов

3.9 Транзисторы

Транзисторы (англ. *transistor* от *transfer* — передача и *resist* — сопротивление) полупроводниковый радиоэлектронный компонент с тремя выводами, позволяющий управлять током в электрической цепи путём изменения управляющего тока или напряжения (Рис. 3.32). Широко используются для усиления, генерации и преобразования электрических сигналов в телевидении, радио, связи, медицины, промышленности и т.п. Это самые распространённые элементы сложнейших интегральных микросхем - основы современных информационных и компьютерных технологий.

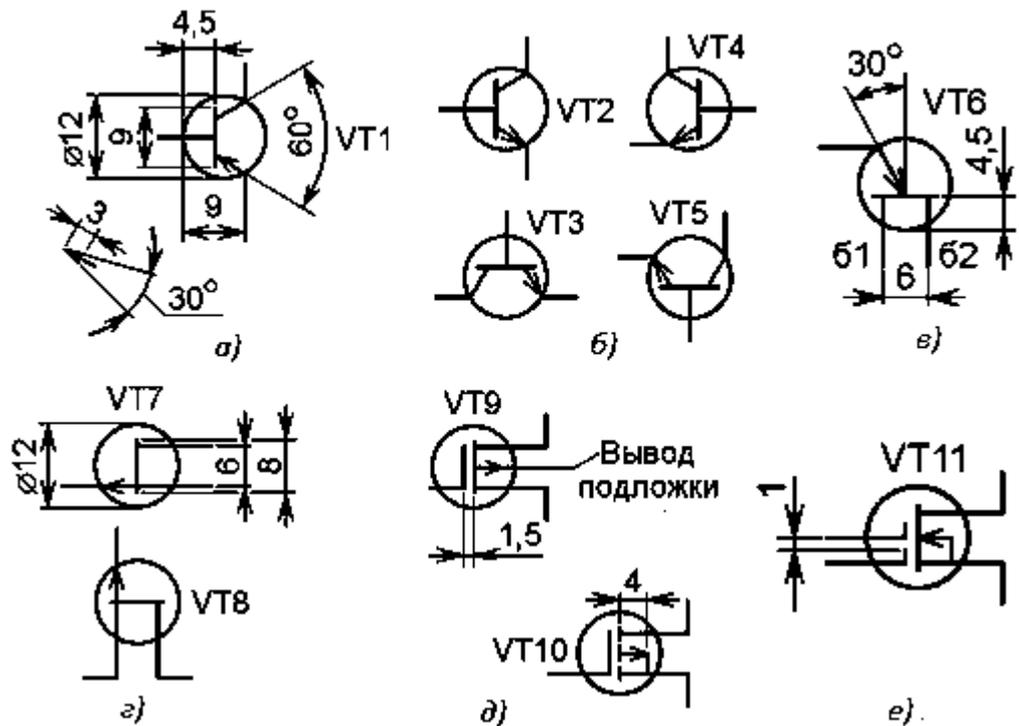


Рис. 3.32 – Условные графические обозначения некоторых видов транзисторов:

- а) *p-n-p* типа; б) *n-p-n* типа; в) однопереходный; г) полевой с *p*-каналом;
 б) полевой с изолированным затвором и *p*-каналом;
 в) полевой с двумя изолированными затворами и *n*-каналом

Существует масса разновидностей транзисторов, отличающихся материалом полупроводника, принципом действия, конструкцией (Рис. 3.31), рабочими характеристиками [33,23,63,62,21].

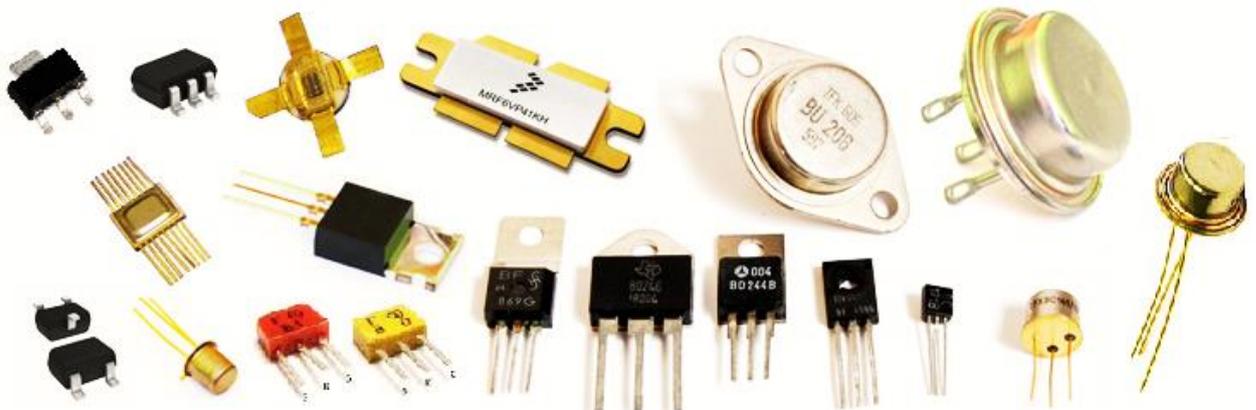


Рис. 3.31 - Конструкции некоторых типов транзисторов

По принципу действия все транзисторы разделяются на два основных вида: биполярные (англ. — *BJT*, *bipolar junction transistor*) и полевые (англ. — *FET*, *field-effect transistor*). В биполярном транзисторе управление производится током на управляющем электроде — *базе*. В полевом транзисторе управление рабочим током обеспечивается электрическим полем в области управляющего электрода — *затвора*. Полевые транзисторы называют

также униполярными (*unipolar transistor*), так как в процессе протекания электрического тока участвует только один вид носителей. Основа любого транзистора - совокупность областей с *n*- и *p*-проводимостью, и для каждого типа транзисторов существует взаимно дополняющая комплементарная пара, в которой *n*-области одного соответствуют *p*-областям другого и наоборот. В настоящее время основными материалами при производстве транзисторов являются кремний, германий и арсенид галлия.

Биполярные транзисторы в настоящее время чаще используются в аналоговой технике, а полевые - в цифровой технике (компьютеры, память, цифровая связь и т.п.).

В ходе анализа работы схемы электрической принципиальной для заменяемого транзистора следует определить реальные рабочие параметры - частоту, напряжение и ток.

Очевидно, что заменяющий транзистор должен относиться к той же группе, что и заменяемый (например, малой мощности высокой частоты или большой мощности средней частоты) и иметь такую же структуру, что и заменяемый: *p-n-p* или *n-p-n*, полевой транзистор с *p*-каналом или *n*-каналом. Кремниевые транзисторы рекомендуется заменять только кремниевыми, германиевые — германиевыми, биполярные – биполярными и т.д.

Для повышения качества работы проектируемого РЭС, значения предельных параметров заменяющего транзистора целесообразно выбирать лучше, чем у заменяемого.

3.10 Микросхемы

За редким исключением отечественные предприятия-изготовители вынуждены изготавливать микросхемы функционально идентичные соответствующим мировым аналогам, а потому большинство параметров микросхем оказываются практически идентичными параметрам других изготовителей. Поэтому при замене микросхем можно пользоваться Интернетом и любыми справочниками [25,24,64], в том числе и справочниками западных изготовителей для тех отечественных микросхем, которые имеют соответствующие аналоги.

Заметим, что разновидностей корпусов микросхем исчисляется сотнями. Хотя для упрощения технологического процесса изготовления РЭС типы корпусов микросхем унифицированы (в том числе и на международном уровне), тем не менее компании-изготовители в соответствии с пожеланиями заказчиков и технологией монтажа могут один и тот же вид микросхемы выпускать в разных корпусах.

Будьте внимательны! Уточните – в каком корпусе Вы планируете применять микросхему!

Обратите внимание, что шаг выводов у российских микросхем измеряется в миллиметрах (обычно 2,5 мм или 1,25 мм). У микросхем зарубежных производителей шаг выводов измеряют в долях дюйма - милах (1/1000 дюйма) или используют величину 1/10 или 1/20 дюйма, что в метрической системе соответствует 2,54 и 1,27 мм.

В современных импортных корпусах микросхем для поверхностного монтажа, применяют и метрические размеры: 0.8 мм, 0.65 мм и другие.

Выводы корпусов ИМС могут быть круглыми (диаметр 0.3 .. 0.5 мм) или прямоугольными (вписанные в окружность 0.4 .. 0.6 мм).

Габаритные и присоединительные размеры корпусов отечественных интегральных микросхем приведены в ГОСТ Р 54844-2011 [65]. Просмотреть чертежи с размерами корпусов наиболее распространённых микросхем можно также на сайте <http://www.chipdip.ru/info/import-ic-packages/>.

4 Список литературы

1. ГОСТ 2.701-2008 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. - М.: Стандартинформ, 2009. - 17 с.
2. ГОСТ 2.702-2011 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. - М.: Стандартинформ, 2011. - 26 с.
3. Митин Г.П. Условные обозначения в отечественных и зарубежных электрических схемах. - М.: Изумруд, 2003. — 224 с.
4. ГОСТ 2.708-81 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники. - М.: Стандартинформ, 2007. - 14 с.
5. ГОСТ 2.709-89 ЕСКД. Обозначения условные проводов и контактных соединений электрических элементов, оборудования и участков цепей в электрических схемах. - М.: Стандартинформ, 2007. - 8 с.
6. ГОСТ 2.710-81 ЕСКД.. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. - М.: Стандартинформ, 2007. - 10 с.
7. ГОСТ 2.417-91 ЕСКД. Платы печатные. Правила выполнения чертежей. - М.: Стандартинформ, 2011. - 6 с.
8. Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды+SMD. Справочник. — Изд. 4-е, перераб. и доп.. Vol 1 (A.R). — СПб.: Наука и Техника, 2008. — 813 с.
9. Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды+SMD. Справочник. — Изд. 4-е, перераб. и доп. Наука и Техника ed. Vol 2 (R.Z). — СПб., 2008. — 816 с.
10. Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды+SMD. Справочник. Изд. 4-е, перераб. и доп.. Vol 3 (O.9). — СПб.: Наука и Техника, 2008. — 672 с.
11. Уваров А.С. P-CAD. Проектирование и конструирование электронных устройств. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004. - 760 с.
12. Уваров А.С. Проектирование печатных плат. 8 лучших программ. - М.: ДМК Пресс, 2009. - 288 с.
13. Сабунин А.Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. - 432 с.

14. Суходольский В.Ю.. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах в САПР Altium Designer 6.: Учебное пособие. Часть 1. - СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2008. - 152 с.
15. Суходольский В.Ю. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах в САПР Altium Designer 6.: Учебное пособие. Часть 2. - СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2009. - 108 с.
16. Сергеев А., "OrCAD PCB Designer Standard - лучший редактор печатных плат для профессионалов," *Современная электроника*, Aug 2014. pp. 1-4.
17. // PCB SOFT. Партнер и официальный дистрибьютор фирмы CADENCE Design Systems : [сайт]. [2016]. URL: <http://www.pcbsoft.ru/>
18. С.Лузин, Г.Петросян, О.Полубасов, "ТороR – современная САПР печатных плат," *Печатный монтаж*, No. 1 , 2009. pp. 10-13.
19. Акимов Н.Н., Ващуков Е.П., Прохоренко В.А., Ходоренок Ю.П. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник. - Мн.: Беларусь, 1994. - 591 с.
20. Аксенов А.И., Нефедов А.В.. Резисторы, конденсаторы, провода, припои, флюсы. Справочное пособие. Серия "Ремонт", выпуск 39. – М.: СОЛОН - Р, 2000. – 239 с.
21. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы / 6-е изд., доп. и испр. - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. — 592 с.
22. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Иванова Н.Ю., Шилкин Д.А. Соединители и коммутационные устройства. Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. - 151 с.
23. В.Л. Аронов, А.В. Баяков, А.А. Зайцев и др. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник/ Под общ. ред. Н. Н. Горюнова. - 2-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 904 с.
24. Все отечественные микросхемы. — 2-е изд., переработанное дополненное. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI, 2004. — 400 с.
25. Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды+SMD. А.З. В 3 томах). Справочник. — Изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб.: Наука и Техника, 2008.
26. Игнатов А.Н. Оптоэлектронные приборы и устройства: Учеб. пособие. - М.: Эко-Трендз, 2006. - 272 с.
27. Леухин В.Н. Компоненты для монтажа на поверхность: справочное пособие / В.Н. Леухин. - Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2006. - 300 с.
28. Хрулев А.К., Черепанов В.П. Диоды и их зарубежные аналоги. Справочник. В 3 томах. — М.: ИП РадиоСофт, 1999.— 640 с.
29. // Справочники по отечественным электронным компонентам с Datasheets: [сайт]. URL: <http://trzrus.narod.ru/>

30. // Интернет-магазин электронных компонентов и приборов: [сайт]. URL: <http://www.platan.ru/shop/>
31. // Интернет-магазин электронных компонентов и сопутствующих товаров: [сайт]. URL: <http://www.chipdip.ru/>
32. // Part Electronix. Каталог товаров интернет-магазина: [сайт]. URL: <http://www.dart.ru/cataloguenew/catalogue.shtml>
33. Шмаков С.Б. Энциклопедия радиолюбителя. Современная элементная база. - СПб.: Наука и Техника, 2012. — 384 с.
34. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. - 560с.
35. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств. - М.: Техносфера, 2007. - 256 с.
36. Об установлении запрета и ограничений на допуск товаров, происходящих из иностранных государств, работ (услуг), выполняемых (оказываемых) иностранными лицами, для целей осуществления закупок товаров, работ (услуг) для нужд обороны страны и безопасности // Интернет-портал "Российская газета". 2014. URL: <http://www.rg.ru/2013/12/26/zapret-site-dok.html>
37. Российские микропроцессоры // Русский эксперт. 2016. URL: http://ruxpert.ru/index.php?title=Российские_микропроцессоры&oldid=147458
38. Шунков В. Российская микроэлектроника для космоса: кто и что производит // Сделано у нас. URL: <http://sdelanounas.ru/blogs/48549/>
39. Бедная А.И. Исследование стратегии импортозамещения элементной базы в производстве электронно-вычислительной аппаратуры // Openbooks - Репозиторий Университета ИТМО. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/978/978.pdf>
40. Новая элементная база увеличила срок жизни российских спутников в 2-3 раза // РИА новости. URL: <https://ria.ru/science/20161126/1482249340.html>
41. МОР 44 001.01 - 21. Перечень электрорадиоизделий, разрешенных к применению при разработке (модернизации), производстве и эксплуатации аппаратуры, приборов, устройств и оборудования военного назначения. (в 21 книгах). 2014.
42. Р. Пахолков, В. Мозолевский, "Современная система на кристалле – основа успешного продукта," *СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА*, 2007. pp. 8 - 11.
43. Поляков. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. - М.: СОЛОН-Пресс, 2003. - 320 с.
44. Перунов Ю.М., Мацукевич В.В., Васильев А.А.. Зарубежные радиоэлектронные средства / Под ред. Ю.М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 4: Элементная база. - М.: Радиотехника, 2010. - 400 с.
45. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. - Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. - 617 с.

46. Хайнеман Р. PSPICE. Моделирование работы электронных схем. Серия «Проектирование».. – М.: ДМК Пресс, 2005. - 327 с.
47. Дж. К. OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей (+DVD). — М: : ДМК Пресс, 2008. — 640 с.
48. ГОСТ 27.002-2015 ЕСКД. Надежность в технике. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2016. - 24 с.
49. ГОСТ Р 27.002-2009 ЕСКД. Надёжность в технике. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2011. - 28 с.
50. С. М. Боровиков. И. Н. Цырельчук. Ф. Д. Троян. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод, пособие / под ред. С. М. Боровикова. - Минск: БГУИР, 2010. - 68 с.
51. Сускин В.В. Основы технологии поверхностного монтажа. - Рязань: Изд-во Узорожье, 2001. - 160 с.
52. Монтаж печатных плат [Электронный ресурс] // Всё о производстве печатных плат: [сайт]. URL: <http://платы.рф/?pcb-mounting,15>
53. // DipTrace - САПР по разработке схем и электронных печатных плат: [сайт]. [2016]. URL: <http://diptrace.com/rus/diptrace-software/>
54. Лярский В.Ф., Мурадян О.Б. Электрические соединители: Справочник. - М.: Радио и связь, 1988. - 272 с.
55. Отечественные низкочастотные сигнальные и силовые разъёмы (частота до 3 МГц). Справочник. [Электронный ресурс] // Справочники по отечественным электронным компонентам с Datasheets: [сайт]. URL: <http://www.trzrus.narod.ru/conn.htm>
56. ГОСТ 2.755-87 Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. - М.: Изательство стандартов, 2004. - 11 с.
57. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. Оптроны и их применение. - М.: Радио и связь, 1981. - 280 с.
58. Кашкаров А.П. Популярный справочник радиолюбителя. - М.: ИП РадиоСофт, 2008. - 416 с.
59. ГОСТ 28884-90 ЕСКД. Ряды предпочтительных значений для резисторов и конденсаторов. – М.: Стандартиформ, 2010. – 12 с.
60. Маркировка электронных компонентов для поверхностного монтажа // ООО «Микросан» - электронные компоненты. URL: <http://microsun.ru/wp-content/uploads/2015/04/spravochnik-sayt.pdf>
61. Леухин В.Н. Компоненты для монтажа на поверхность: справочное пособие /В. Н. Леухин. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2006. - 300 с.
62. Кашкаров А.П. Маркировка радиоэлементов: Справочник. 2-е изд., доп. — М.: МП РадиоСофт, 2012. - 208 с.

63. Петухов В.М. Взаимозаменяемые транзисторы. Справочник. 2-е изд.. - М.: ИП РадиоСофт, 2011.— 384 с.
64. Нефедов А.В. Взаимозаменяемые интегральные схемы. Справочник. - 2-е изд. - М.: ИП РадиоСофт, 2012. - 352 с.
65. ГОСТ Р 54844-2011 Микросхемы интегральные. Основные размеры. - М.: Стандартиформ, 2014. – 82 с.
66. Макетные отладочные платы NanoBoard // Группа компаний CSoft. URL: <http://www.csoft.ru/catalog/hard/nanoboard-3000/nanoboard-3000xn.html>