

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра проектирования информационно-компьютерных систем

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для специальностей 1-39 02 01 «Моделирование
и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств»,
1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»,
1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы»*

Минск БГУИР 2019

УДК 621.396.69-026.11(076.6)+621.396.69-026.12(076.6)

ББК 32.844-04я73+32.853я73

Э45

Авторы:

В. В. Баранов, В. В. Хорошко, В. Ф. Гременок, А. И. Бересневич,
А. А. Фещенко

Рецензенты:

кафедра информационно-измерительной техники и технологий
Белорусского национального технического университета
(протокол №12 от 13.03.2018);

заведующий лабораторией радиационных воздействий государственного
научно-производственного объединения «Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» кандидат
физико-математических наук
С. Б. Ластовский

Электрические и электронные компоненты устройств и систем : учеб.-
Э45 метод. пособие / В. В. Баранов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. –136 с. : ил.
ISBN 978-985-543-445-1.

Учебно-методическое пособие направлено на формирование теоретических знаний и практических умений, необходимых для проектирования, обоснованного выбора и оценки эффективности использования электрических и электронных компонентов в различных радиоэлектронных устройствах и системах.

УДК 621.396.69-026.11(076.6)+621.396.69-026.12(076.6)
ББК 32.844-04я73+32.853я73

ISBN 978-985-543-445-1

© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Раздел 1	
Электрические и электронные компоненты	6
Тема 1.1 Классификация электрических и электронных компонентов, эволюция их развития.....	6
Тема 1.2 Общая характеристика электрических и электронных компонентов.....	11
Раздел 2	
Пассивные элементы радиоэлектронных устройств	16
Тема 2.1 Резисторы.....	16
Тема 2.2 Конденсаторы.....	32
Тема 2.3 Катушки индуктивности, дроссели и трансформаторы.....	49
Тема 2.4 Вспомогательные элементы.....	65
Раздел 3	
Активные элементы радиоэлектронных устройств	80
Тема 3.1 Диоды	80
Тема 3.2 Транзисторы	95
Тема 3.3 Микросхемы	104
Раздел 4	
Выбор электрорадиоэлементов, их монтаж на печатных платах, обозначение в технической документации.....	118
Тема 4.1 Основные принципы выбора электрорадиоэлементов	118
Тема 4.2 Особенности монтажа электрорадиоэлементов	120
Перечень сокращений	133
Список использованных источников	134

Введение

Радиоэлектронное устройство – это изделие, состоящее из отдельных электронных функциональных узлов, каждый из которых выполняет определенную операцию. Функциональный узел состоит из пассивных и активных элементов, соединение которых образует электрическую схему. Эффективность электронной аппаратуры обусловлена высоким быстродействием, точностью и чувствительностью входящих в нее элементов, важнейшими из которых являются электронные приборы.

Исторически в развитии технической электроники можно выделить три основных этапа: ламповая электроника, полупроводниковая электроника, микроэлектроника.

Ламповая электроника как раздел технической электроники берет начало с XIX века, когда русский электротехник Ладыгин создал первую лампочку накаливания, далее работы Эдиссона и Столетова послужили началом изучения электронных явлений (термоионная и фотоэлектронная эмиссия). Следующим этапом стало изобретение радиоприемника Поповым, лампового детектора Флемингом, введение в детектор управляющего электрода Де Форестом Ли. Совершенствование электронных ламп привело к появлению в настоящее время вакуумных интегральных схем и миниатюрных ламп различного назначения.

Наряду с этими электронными приборами разрабатывались и развивались другие: электронно-лучевые, ионные, фотоэлектронные, полупроводниковые.

Применение полупроводниковых приборов позволило в несколько раз уменьшить габаритные размеры многоэлементных установок, повысить надежность работы, снизить потребляемую мощность.

Современный этап развития электронной техники характеризуется значительным усложнением электронной аппаратуры. Габаритные размеры обычных дискретных приборов не удовлетворяют требованиям размеров и надежности современных электронных устройств. Все большее развитие получает микроэлектроника – отрасль электроники, охватывающая исследования и разработку интегральных микросхем и принципов их применения. Интегральная микросхема – это законченный функциональный узел, выполненный на единой несущей конструкции – подложке, в едином технологическом процессе и выполняющий определенную функцию преобразования информации.

Компоненты элементов электронной техники делятся на активные и пассивные: активные способны усиливать, обрабатывать и преобразовывать сигналы, пассивные – накапливать или расходовать энергию сигнала.

Элемент электрической схемы, имеющий определенное функциональное назначение и выводы для соединения с другими элементами, называется деталью радиоэлектронного устройства, или радиодеталью.

Основными компонентами электронной техники являются: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и дроссели, трансформаторы, коммута-

ционные устройства, электровакуумные приборы, приборы отображения информации, полупроводниковые приборы, акустические приборы, антенны, пьезоэлектрические приборы, линии задержки, источники тока, предохранители и разрядники, электродвигатели, лампы накаливания, элементы цифровой техники, элементы аналоговой техники, провода, кабели, волноводы.

С помощью этих приборов можно сравнительно просто и во многих случаях с высоким КПД преобразовать электрическую энергию по форме, величине и частоте тока или напряжения. Кроме того, с помощью электронных приборов удастся преобразовать неэлектрическую энергию в электрическую и наоборот (фотоэлементы, терморезисторы, пьезоэлементы и т. д.). Разнообразные электронные датчики и измерительные приборы позволяют с высокой точностью измерять, регистрировать и регулировать изменение всевозможных неэлектрических величин – температуры, давления, деформации, прозрачности и т. д.

Современные технические средства электроники широко используются во всех отраслях народного хозяйства, в том числе и в медицине. В связи с повышенным требованием к качеству изготовления, точности параметров, достоверности измерений этой аппаратуры выделяется отдельное направление – медицинская электроника.

Содержание дисциплины «Электрические и электронные компоненты устройств и систем» предусматривает подготовку студентов в области современных электрических и электронных компонентов, применяемых в различных устройствах и системах. Данная дисциплина является одной из основных, дающих базовые знания для проектирования современных электронных устройств и систем различного функционального назначения.

Цель учебной дисциплины – формирование теоретических знаний и практических умений, необходимых для проектирования, обоснованного выбора и оценки эффективности использования электрических и электронных компонентов в различных радиоэлектронных устройствах и системах.

Задачи изучения учебной дисциплины:

- рассмотрение разновидностей (номенклатуры) электрических и электронных компонентов, используемых в составе конструкций электронных устройств и систем;

- изучение эксплуатационно-технических характеристик и свойств электрических и электронных компонентов различных классов и групп и формирование умений их выбора для конструкций устройств систем конкретного функционального назначения;

- получение практических навыков сравнительной оценки параметров и эксплуатационно-технических характеристик электрических и электронных компонентов различных производителей (как отечественных, так и зарубежных).

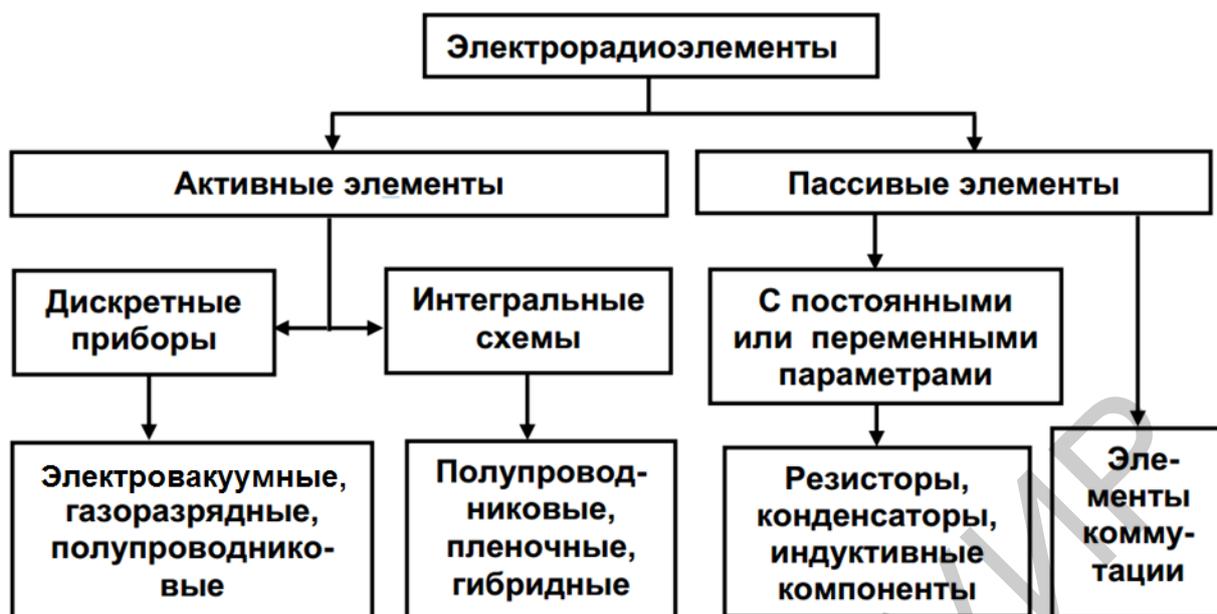


Рисунок 1.2 – Классификация электрорадиоэлементов

Активные элементы – это разнообразные электронные приборы, различающиеся принципами действия и назначением. Они называются активными потому, что их функционирование связано с потреблением энергии от внешних источников питания. Напряжение таких источников может быть постоянным и переменным. Постоянным напряжением обеспечивается питание анодных и сеточных цепей электровакуумных приборов, эмиттерных, коллекторных и других цепей транзисторов. Источники переменного напряжения применяются для подогрева катодов электровакуумных приборов.

Среди *дискретных элементов* РЭА выделяют: электровакуумные приборы (ЭВП) с высоким разрежением воздуха в баллоне (остаточное давление около 6–10 Па); газоразрядные приборы (ГРП) (чаще всего баллон заполнен инертным газом под низким давлением – от долей до тысяч паскалей в зависимости от назначения прибора); полупроводниковые приборы (ППП).

Особой группой активных приборов являются *интегральные схемы* (ИС) – микроэлектронные изделия, выполняющие определенную функцию преобразования и обработки сигналов и имеющие высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов. Схемное и конструктивное объединение большого количества элементов в одном кристалле, т. е. их интеграция, привело к появлению термина «интегральные схемы» (точнее и логичнее было бы назвать их «интегрированными цепями»). В одной ИС могут содержаться сотни и тысячи элементов. По конструктивно-технологическим признакам ИС делят на полупроводниковые и гибридные.

Пассивные элементы функционируют без внешних источников питания. Свойства этих элементов (в большинстве случаев) не зависят от полярности приложенного напряжения или направления протекающего тока. Номенклатура пассивных элементов весьма широка (хотя, возможно, и не столь широка, как

номенклатура активных). К ним относятся резисторы, конденсаторы, индуктивные компоненты и другие элементы [1].

Пассивные элементы могут иметь постоянные или переменные (регулируемые) параметры. С данным признаком связаны принципиальные различия в их конструкциях. Элементы с переменными параметрами, как правило, значительно дороже, имеют большие габариты и массу. К таким элементам относятся резисторы, конденсаторы и индуктивные компоненты.

Элементы коммутации – элементы электрической цепи, отвечающие за подачу электрического тока в цепь и ее запитывание. Элементы коммутации бывают контактного и бесконтактного типа. Контактные аппараты имеют подвижный механический элемент, благодаря которому производится размыкание контактов деталей, данные приборы обладают высокой надежностью. Бесконтактные приборы относятся к оборудованию нового поколения, отличающегося более высокими скоростями срабатывания. Коммутационное оборудование содержит различные виды выключателей, устройства защитного отключения (УЗО) и предохранителей, отвечающих за включение питания всей цепи и защиту на входе от перегрузок.

По способу монтажа электрорадиоэлементы делятся на элементы навесного, печатного либо поверхностного монтажа, кристаллы интегральных микросхем.

1. Элементы навесного (объемного) монтажа (рисунок 1.3).

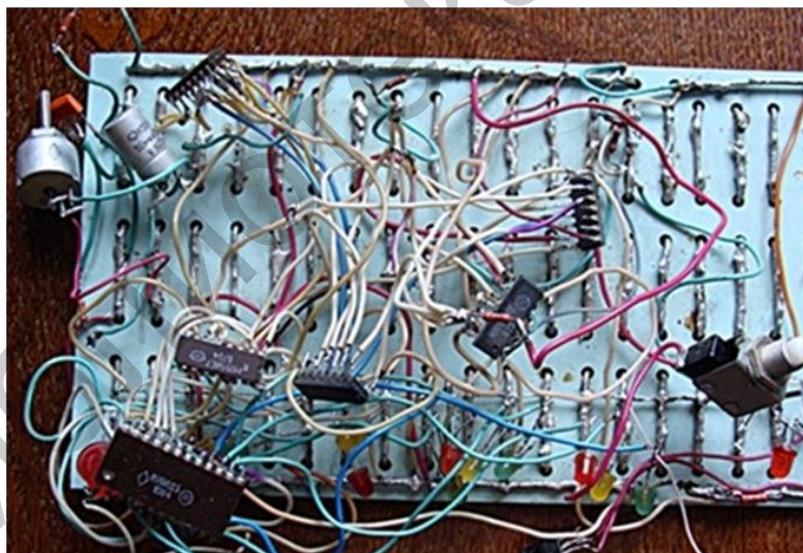


Рисунок 1.3 – Элементы навесного монтажа

Навесной монтаж – это способ монтажа отдельных электронных компонентов и схем, когда расположенные радиоэлектронные элементы соединяются друг с другом проводами или непосредственно выводами. Данный тип монтажа характерен для бытовой, особенно ламповой, техники старого образца, где ламповая панель являлась одним из элементов соединительной цепи, и весь немно-

гочисленный электронный монтаж помещался на изолированном шасси, без применения печатной платы.

2. Элементы печатного монтажа (рисунок 1.4).

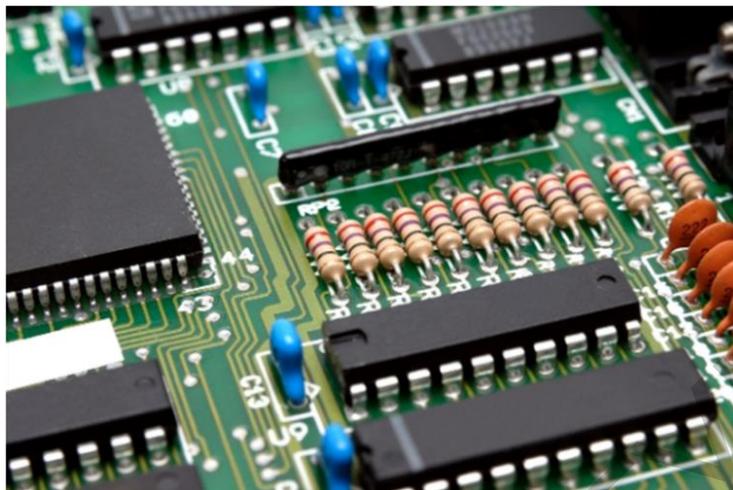


Рисунок 1.4 – Элементы печатного монтажа

Печатный монтаж – способ монтажа электронной аппаратуры, при котором соединения электрорадиоэлементов, в том числе экранирующих, выполняются посредством тонких электропроводящих дорожек с контактными площадками, расположенными на печатной плате. Печатный монтаж позволяет уменьшить габариты и массу аппаратуры, широко использовать механизированное и автоматизированное оборудование и высокопроизводительные технологические процессы при ее массовом выпуске.

3. Элементы поверхностного монтажа (рисунок 1.5).

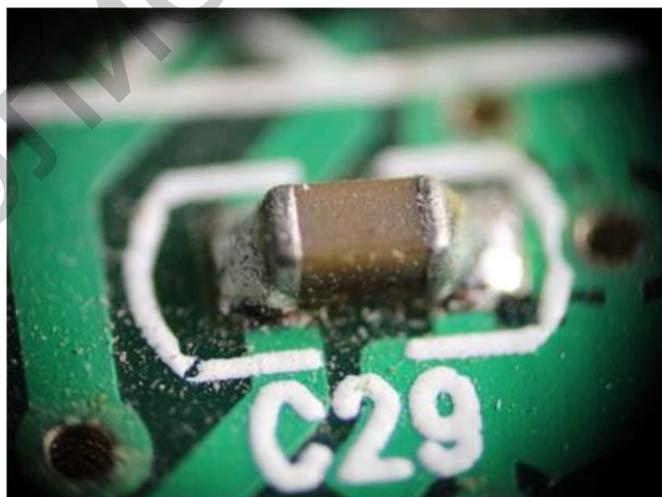


Рисунок 1.5 – Элементы поверхностного монтажа

Поверхностный монтаж – технология изготовления электронных изделий на печатных платах, а также связанные с данной технологией методы конструирования печатных узлов. Данная технология является наиболее распро-

страненным на сегодняшний день методом конструирования и сборки печатных узлов. Основным ее отличием от «традиционной» технологии монтажа в отверстия является то, что компоненты монтируются на поверхность печатной платы с использованием специализированных паяльных паст.

4. Кристаллы интегральных микросхем (рисунок 1.6).

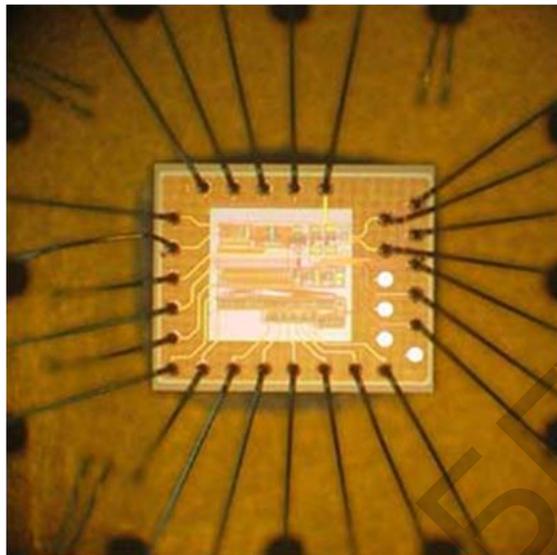


Рисунок 1.6 – Кристалл интегральной микросхемы

Кристалл интегральной микросхемы – часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы элементы полупроводниковой ИМС, межэлементные соединения и контактные площадки [2].

Эволюция развития радиоэлементов:

1. На первом этапе технология электроники опиралась на навесной радиотехнический монтаж: навесные детали, паяные соединения монтажным проводом, клеммники, разъемы. Этот этап длился около столетия – с середины XIX века по середину XX века.

2. В 1940-х годах появилась новая технология – печатные платы. Их изготавливали методом фотолитографии с последующим травлением фольгированных диэлектрических листов, печатных плат. Новая технология позволила сократить затраты ручного труда на пайку и монтаж. Появились автоматизированные монтажные линии, осуществлявшие автоматическую сборку деталей на печатных платах и пайку волной, т. е. кратковременным погружением в кювету с припоем. Электронные устройства стали более миниатюрными, модульными, легкими, устойчивыми к механическим воздействиям, более надежными благодаря замене навесных проводов печатными проводниками, плотно приклеенными к основанию платы.

3. В связи с изобретением точечного германиевого транзистора (1948 год, лаборатория Bell Telephone Laboratories) и созданием плоскостных кремниевых транзисторов (1953 год, фирма Texas Instrument Incorporation), которые в отличие от электронных ламп не рассеивали большое количества тепла, а также в

связи с налаживанием их группового производства в 1950-х годах появилась технология микромодульного монтажа, когда сложный интегральный модуль собирался в виде этажерки отдельных микромодулей – маленьких печатных плат стандартного размера. При этом достигалась высокая плотность упаковки электронных компонентов. Однако эта технология быстро изжила себя в связи с появлением следующего поколения монтажа, но затем возродилась в виде многослойных печатных плат.

4. В 1960-х годах появились первые микросхемы – гибридные интегральные схемы на основе тонкопленочной технологии, когда проводники изготавливались напылением металла на тонкие диэлектрические (обычно стеклянные) пластинки – подложки. На них пайкой монтировались бескорпусные электронные компоненты: транзисторы, диоды, емкости и резисторы. Последние часто изготавливались напылением резистивного слоя на стеклянную подложку.

5. После создания первой интегральной схемы на основе монокристаллической полупроводниковой технологии (1961 год, фирма Fairchild Semiconductor), представляющей собой триггер, состоящий из четырех биполярных транзисторов и двух резисторов, началось развитие настоящих полупроводниковых микросхем, которые вначале часто использовались как электронные компоненты гибридных микросхем. Таким образом, в 1970-х годах произошел поворот электронной промышленности к разработке все более сложных микросхем, использующих лишь единственный кристалл кремния («чип») [3].

Тема 1.2 Общая характеристика электрических и электронных компонентов

Электронный аппарат является совокупностью элементов, организованной в соответствии с назначением и принципом действия. Эффективность электронных систем, параметры радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в значительной степени определяются элементной базой, т. е. характеристиками используемых в них интегральных схем, электровакуумных и полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, контактных устройств и т. п.

Радиоинженер, приступая к разработке принципиальной схемы, решает, какие стандартизованные элементы, выпускаемые промышленностью, целесообразно использовать. В некоторых случаях он может ставить задачу разработки новых (вненоменклатурных) элементов с улучшенными или принципиально новыми свойствами.

Особенностью современной элементной базы является ее номенклатурная обширность, дублируемая различными производителями. Это приводит, с одной стороны, к разумной конкуренции, что можно считать положительным фактором, с другой стороны – к введению различных систем обозначений, маркировок, что затрудняет работу радиоинженера по выбору оптимальной элементной базы для конкретного изделия.

Разработку и промышленное производство электрорадиоэлементов осуществляют в основном предприятия электронной промышленности. Выбор компонентов часто неоднозначен, а следовательно, проектирование – творческий процесс. Что же помогает радиоинженеру решать эту непростую задачу, когда в его распоряжении – элементы весьма обширной номенклатуры, различных характеристик и принципов действия? В своей практике он постоянно обращается к справочникам и каталогам. Однако большое значение имеют эрудиция, опыт, интуиция разработчика. Все это помогает специалисту решить, каким должен быть требуемый компонент, а справочный материал помогает найти его описание и характеристики, необходимые для проведения расчетов. Все большую роль в практической деятельности радиоинженеров играют системы автоматизированного проектирования (САПР) на базе ЭВМ. В состав САПР могут входить банки различных данных, в том числе и элементная база. Поиск необходимых элементов в этом случае сводится к автоматизированному обращению к базам данных. Роль банков данных – хранителей информации – выполняют устройства внешней памяти ЭВМ на электронных, магнитных и оптических носителях. Нужную информацию также можно получить из сети Интернет непосредственно с сайтов производителей.

Выбор электрорадиоэлементов. Одной из важных задач в процессе разработки радиоэлектронной аппаратуры является правильный выбор элементной базы для проектируемого изделия. Применяемые в электронных средствах электрорадиоэлементы характеризуются номинальными значениями параметров, допуском на эти параметры, их зависимостью от температуры, уровнем шумов, предельными режимами (максимальной мощностью рассеяния, напряжением или током), конструктивным исполнением, предельными климатическими и механическими воздействиями, надежностью и др. Критерием выбора электрорадиоэлементов в любом радиоэлектронном устройстве является соответствие технологических и эксплуатационных характеристик ЭРЭ заданным условиям работы и эксплуатации. При выборе электронного компонента важно тщательно ознакомиться с его технической спецификацией (Datasheet) и правильно понять указанные в ней параметры [4]. Пример Datasheet представлен на рисунке 1.7.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Четыре а/ц входа могут быть независимо сконфигурированы как:
 - Бинарные входы (для релейных датчиков или кнопок).
 - Датчик температуры.
 - Датчик движения.
- Уменьшенный размер: 45x45x14мм.
- Не требуется внешнего источника питания кроме шины KNX.
- Монтаж в установочную, распределительную коробку.
- Встроенный KNX интерфейс BCU.
- Полное сохранение данных при сбое питания шины KNX.
- Соответствует директивам CE.

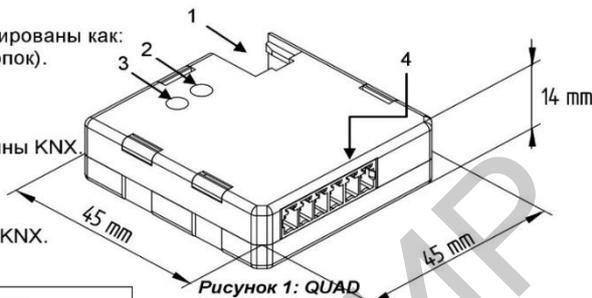


Рисунок 1: QUAD

- | | | |
|----------------------|--------|----------------------------|
| 1. Клеммник шины KNX | 2. LED | 3. Кнопка программирования |
| 4. Гнездо | | |

Кнопка программирования KNX: короткое нажатие кнопки переводит модуль в режим программирования. Если эту кнопку удерживать при подключении прибора к шине KNX, то прибор перейдет в безопасный режим.
LED: в режиме программирования горит непрерывно (красный). В безопасном режиме LED мигает красным цветом каждые 0.5 секунды.

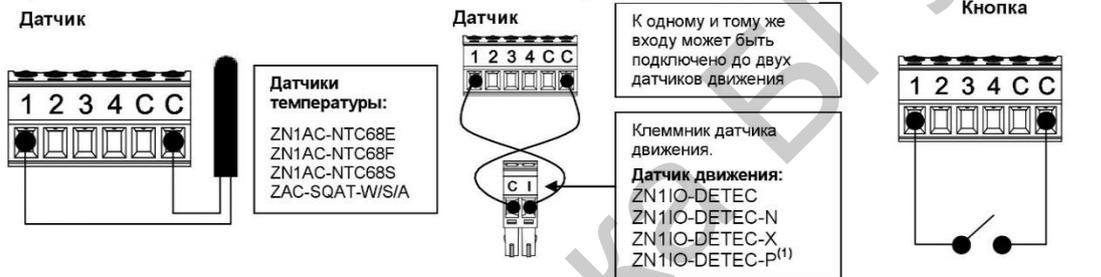
ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ХАРАКТЕРИСТИКА		ОПИСАНИЕ		
Назначение прибора		Автоматизация зданий и домашняя автоматизация		
Питание KNX	Рабочее напряжение (типичное)	29В=, безопасное (SELV)		
	Допустимое напряжение	21...31В=		
	Максимальное потребление	Номинальное напряжение	мА	мВт
		29В= (типичное)	8,3	240
24 В=	10	240		
Тип клеммника		Стандартный TP1, сечение 0.50 мм ²		
Дополнительное питание		Нет		
Температура окружающей среды		От -5°C до +45°C		
Температура хранения		От -20°C до +70°C		
Влажность (относительная)		От 5 до 95% RH (без конденсата)		
Влажность хранения (относительная)		От 5 до 95% RH (без конденсата)		
Дополнительные характеристики		Класс В		
Класс безопасности		III		
Режим работы		Непрерывно		
Тип действия устройства		Тип 1		
Время непрерывного включения питания		Продолжительный		
Класс защищенности		IP 20. В чистой среде		
Монтаж		Отдельное устройство может быть монтировано в установочную, распределительную коробку		
Реакция на отключение питания шины		Полное сохранение данных		
Индикация режимов работы		В режиме программирования красный LED горит непрерывно		
Вес		60 гр.		
PCB CТI индекс		175 В		
Корпус		PC FR V0, не содержит галогенов		

Рисунок 1.7 – Datasheet ИС DM54/DM7441A.141

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХОДОВ И СОЕДИНЕНИЙ	
ХАРАКТЕРИСТИКА	ОПИСАНИЕ
Число входов	4
Гальваническая развязка	Оптопары
Входное напряжение	+5В постоянного напряжения
Входной ток	3 мА при 4,75В постоянного напряжения (на каждом входе)
Входное сопротивление	Приблизительно 3.3 кОм
Тип подключаемого контакта	Беспотенциальный контакт между входными и общей клеммами
Тип клеммника	Съемная клеммная колодка с винтовыми зажимами
Длина кабеля датчика температуры (NTC)	1,5м. (возможно удлинение до 30 м)
Точность датчика NTC (при 25°C)	0.5°C
Точность измерения температуры	0.1°C
Макс. длина кабеля	30м.
Сечение проводов	От 0.15мм ² до 1мм ²
Время отклика	Максимум 10 мс

Допустимо подключение к входам любой комбинации из следующих аксессуаров:



(1) Для корректной работы прибора микровыключатель номер 2 в ZN1IO-DETEC-P должен быть в позиции Тип А.

УСТАНОВКА НА DIN-РЕЙКУ



Рисунок 2: Установка QUAD на DIN рейку:

ИНСТРУКЦИИ ПО БЕЗОПАСНОСТИ



- Не подключайте сетевое напряжение (230 В) или любые другие внешние источники напряжения к шине KNX.
- Воздействие внешнего напряжения может вывести систему KNX из строя.
- Доступ к установленному устройству должен быть ограничен.
- Для предотвращения несчастных случаев электрическое оборудование должно устанавливаться и обслуживаться только квалифицированным персоналом с соблюдением правил техники безопасности.
- Избегайте попадания воды. Если вода или любая другая жидкость попала на прибор, немедленно отключите его.



- Логотип WEEE означает, что данное устройство содержит электронные компоненты и должно быть утилизировано в соответствии с инструкциями <http://zennio.com/weee-regulation>.

Надежность электрорадиоэлементов. *Надежность* – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. В основном безотказность рассматривается применительно к использованию объекта по назначению, но во многих случаях необходима оценка безотказности при его хранении и транспортировании.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования. В процессе хранения и транспортирования объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например, колебаниям температуры, действию влажного воздуха, вибрациям и т. п. В результате после хранения и (или) транспортирования объект может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования.

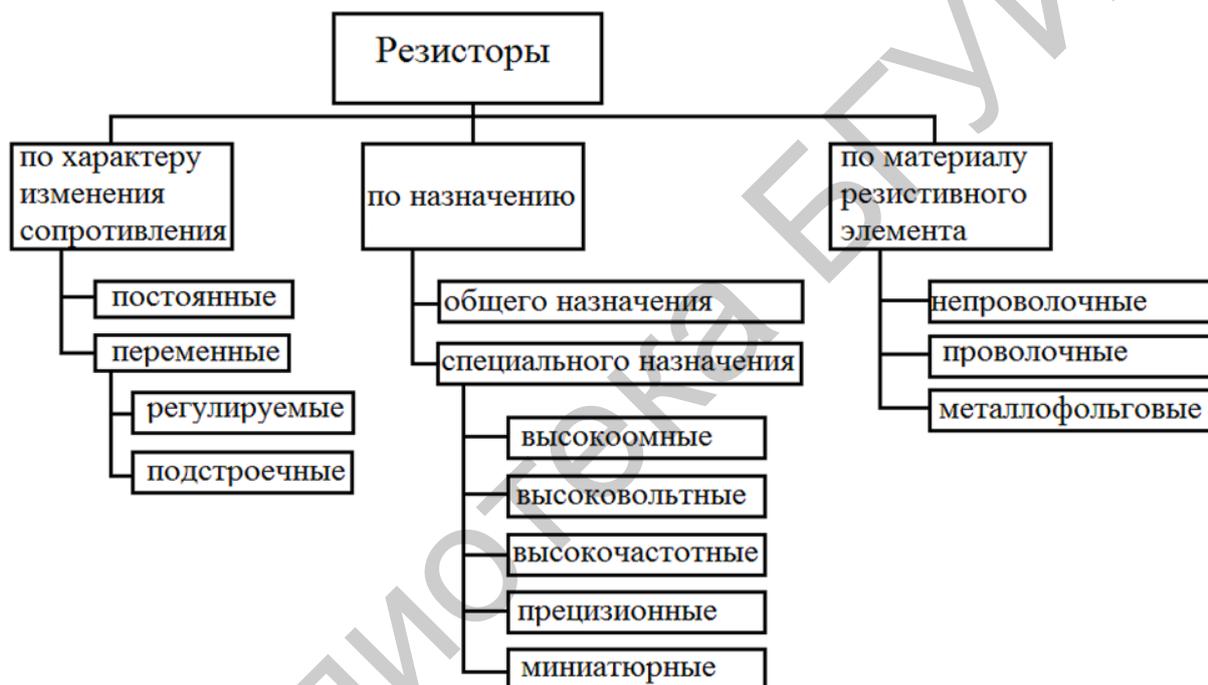
Раздел 2

Пассивные элементы радиоэлектронных устройств

Тема 2.1 Резисторы

Резистор – электрорадиоэлемент, предназначенный для поглощения электрической энергии и распределения ее между другими элементами. Резисторы составляют примерно 50 % от общего числа монтируемых элементов.

Промышленность выпускает различные типы резисторов с номинальным сопротивлением от сотых долей ом до 10 ТОм с допускаемыми отклонениями $\pm(0,001-30)$ %. Классификация резисторов производится по характеру изменения сопротивления, назначению и материалу резистивного элемента (рисунок 2.1).



Резисторы постоянного сопротивления (рисунок 2.2). Применяются в качестве нагрузок усилительных каскадов, делителей напряжения, в фильтрах цепей питания, добавочных сопротивлений и шунтов измерительных цепей и т. д. Они являются изделиями массового производства и стандартизованы.

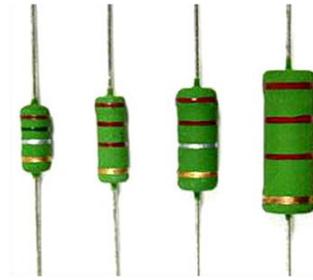


Рисунок 2.2 – Резисторы постоянного сопротивления

Регулируемые резисторы (рисунок 2.3). Применяются в качестве плавных регуляторов усиления, для точной и плавной установки напряжения (например, в регуляторах громкости).

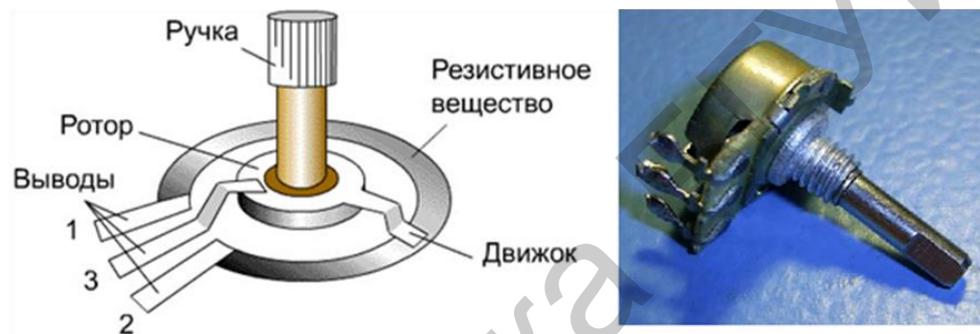


Рисунок 2.3 – Регулируемый резистор

Подстроечные резисторы (рисунок 2.4). Предназначены для точной установки сопротивления при разовой настройке и регулировке прибора при изготовлении и ремонте аппаратуры.

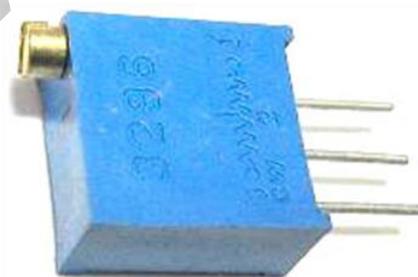


Рисунок 2.4 – Подстроечный резистор

Резисторы общего назначения. Используются в качестве нагрузок, поглочителей и делителей в цепях питания, элементов шунтов, регуляторов громкости и тембра, в цепях формирования импульсов, в измерительных приборах невысокой точности и т. д. В данную группу входят резисторы постоянного сопротивления, величина сопротивления которых фиксируется при изготовлении,

и резисторы переменного сопротивления, конструкции которых позволяют плавно менять данную величину. Диапазон величин сопротивлений резисторов общего назначения варьируется от 10 Ом до 10 МОм, номинальные мощности рассеяния – от 0,125 до 100 Вт.

Резисторы специального назначения. Обладают определенными специфическими свойствами и параметрами и могут быть разделены на следующие виды:

1. *Высокоомные резисторы (рисунок 2.5)* – преимущественно композиционного типа с сопротивлением до 10¹³ Ом. Применяются в устройствах для измерения очень малых токов, например, в дозиметрах различных излучений. Номинальная мощность обычно не указывается, а рабочие напряжения составляют 100–300 В. Типы: С5-23, КВМ.



Рисунок 2.5 – Высокоомные резисторы

2. *Высоковольтные резисторы (рисунок 2.6)* – с сопротивлением до 10¹¹ Ом, но большей мощности и более крупные по размерам, чем высокоомные резисторы. Применяются в делителях напряжения и поглотителях, для искрогашения, разряда конденсаторов фильтров и т. д. Рабочие напряжения 10–60 кВ. Типы: КЭВ-1, КЛВ, СЗ-5, СЗ-6 и др.



Рисунок 2.6 – Высоковольтные резисторы

3. *Высокочастотные резисторы (рисунок 2.7)* – преимущественно поверхностного типа. Предназначены для аппаратуры, работающей на частотах выше 10 МГц, кабелях, волноводах. Высокочастотные резисторы используются при конструировании высоко- и сверхвысокочастотных трактов аппаратуры в качестве согласующих нагрузок, аттенюаторов, эквивалентов антенн,

элементов волноводов. Отличаются малой собственной емкостью и индуктивностью из-за отсутствия нарезки и выводов, а также защитной эмали. Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ некоторых резисторов доходит до 5, 20 и 50 кВт, поэтому требуется охлаждение. Сопротивление таких резисторов не превышает 300 Ом. Типы: МУН, МОУ, УНУ, С2-20, С6-2–С6-9 и др.



Рисунок 2.7 – Высокочастотные резисторы

4. *Прецизионные и полупрецизионные резисторы (рисунок 2.8)* – применяются в точных измерительных устройствах, релейных системах, магазинах сопротивлений. Отличаются высокой точностью изготовления, повышенной стабильностью основных параметров, часто выполняются герметизированными. Величины сопротивлений 0,1 Ом–1 МОм, $P_{\text{ном}}$ не более 10 Вт. Типы: БЛП, С2-10, С2-13 и др.



Рисунок 2.8 – Прецизионный резистор

5. *Миниатюрные резисторы (рисунок 2.9)* – предназначены для малогабаритной аппаратуры. Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ составляет 0,01–0,125 Вт, сопротивление до 5 МОм. Типы: УЛМ, КИМ и др. Частным случаем миниатюрных резисторов являются SMD (Surface Mounted Device) резисторы (рисунок 2.10).

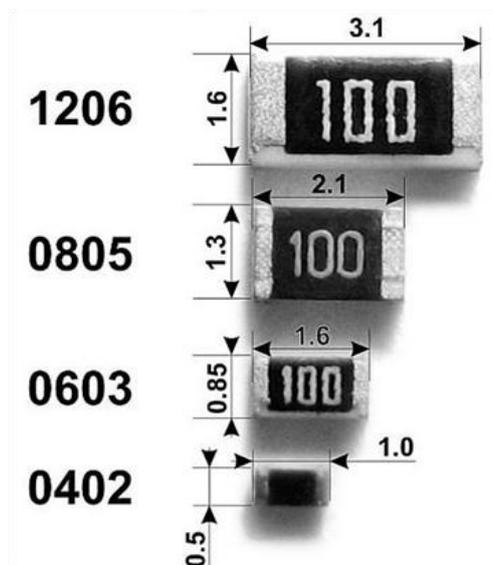


Рисунок 2.9 – Миниатюрные резисторы



Рисунок 2.10 – SMD-резисторы

По конструктивному оформлению резисторы можно разделить следующим образом:

- а) резисторы с проводящим элементом, представляющим собой пленку, осажденную на поверхность изоляционного основания;
- б) резисторы с объемным проводящим элементом;
- в) резисторы с проводящим элементом из проволоки и микропроволоки.

Основная классификация отечественных резисторов осуществляется по типу проводящего элемента. В соответствии с новой действующей системой (ГОСТ 28883–90 (МЭК 62–74) «Коды для маркировки резисторов и конденсаторов») существует сокращенное обозначение резисторов, состоящее из трех элементов [5].

Основные параметры и свойства резисторов. Свойства резисторов характеризуются следующими основными параметрами:

- номинальным сопротивлением;
- допустимым отклонением;

- номинальной мощностью;
- электрической прочностью;
- стабильностью;
- уровнем собственных шумов;
- надежностью, размерами, массой, стоимостью.

Величина сопротивления ($R_{\text{ном}}$) является основным параметром и определяется размерами проводящего элемента и свойствами его материалов. Для резисторов цилиндрической формы с проводящим элементом, нанесенным на изоляционную поверхность, когда толщина проводящей пленки мала по сравнению с диаметром основания (рисунок 2.11, а), величина сопротивления определяется по формуле (2.1):

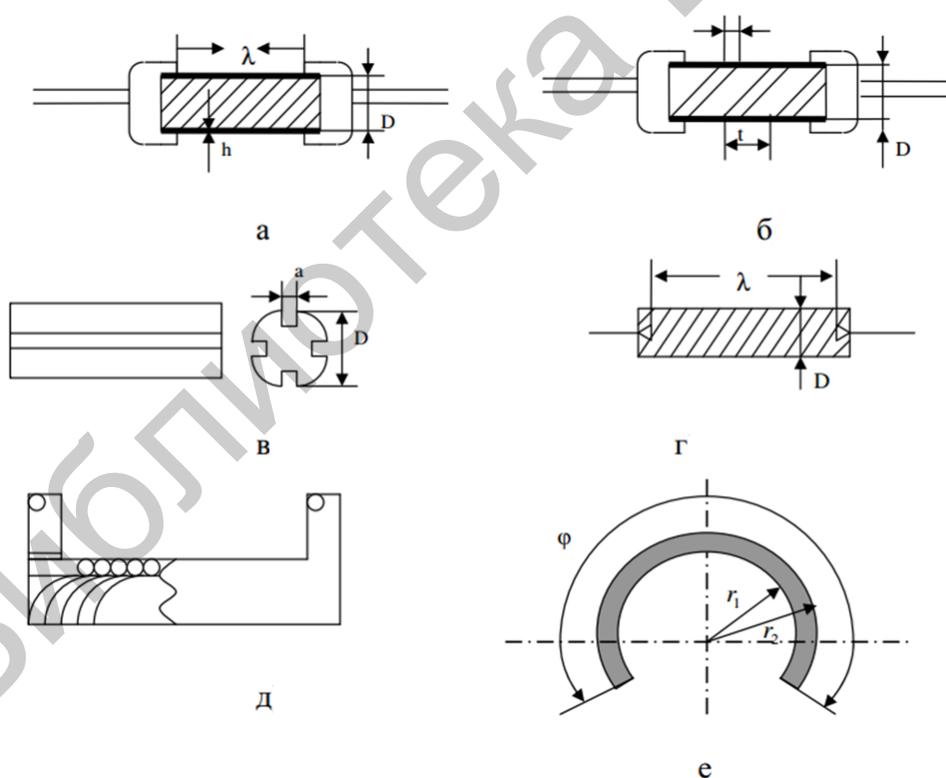
$$R = \rho \frac{L}{\pi D h}, \quad (2.1)$$

где ρ – удельное сопротивление пленки, Ом;

h – толщина пленки, м;

L – длина пленки, м;

D – диаметр основания, м.



а – резистор цилиндрической формы с проводящим элементом, нанесенным на изоляционную поверхность; б – резистор цилиндрической формы со спиральной нарезкой проводящего элемента; в – резистор цилиндрической формы с прорезанными изолирующими канавками; г – резистор объемной конструкции; д – проволочный резистор; е – резисторы с подковообразным проводящим элементом

Рисунок 2.11 – Основные конструкции резисторов

Для *объемной конструкции* (рисунок 2.11, г) величина сопротивления определяется формулой (2.2):

$$R = \rho \frac{4L}{\pi D^2}, \quad (2.2)$$

где D – диаметр проводящего элемента, м.

Сопротивление проволочных резисторов зависит от длины проволоки, удельного сопротивления и площади поперечного сечения (рисунок 2.11, д) и определяется по формуле (2.3):

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (2.3)$$

где S – площадь сечения проводника, м^2 .

Номинальные сопротивления резисторов стандартизованы. Для постоянных резисторов установлено шесть рядов: E6, E12, E24, E48, E96, E192, а для переменных резисторов установлен ряд E6. Кроме этого, допускается использовать ряд E3.

Цифра после буквы E указывает число номинальных значений в каждом десятичном интервале. Номиналы сопротивлений соответствуют числам в приведенных ниже таблицах или числам, полученным умножением или делением этих чисел на 10^n (n – целое положительное или отрицательное число). Для примера приведена таблица рядов E3, E6, E12, E24 (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Номинальные сопротивления по ряду E3, E6, E12, E24

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,1				2,4				5,1
		1,2	1,2			2,7	2,7			5,6	5,6
			1,3				3,0				6,2
	1,5	1,5	1,5		3,3	3,3	3,3		6,8	6,8	6,8
			1,6				3,6				7,5
		1,8	1,8			3,9	3,9			8,2	8,2
			2,0				4,3				9,1

Допустимое отклонение, или допуск, указывается либо на ЭРЭ, либо в паспорте на ЭРЭ, в зависимости от типа маркировки. Согласно ГОСТ 9664–74 установлен ряд допусков: $\pm 0,001$; $\pm 0,002$; $\pm 0,005$; $\pm 0,01$; $\pm 0,02$; $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; ± 1 ; ± 2 ; ± 5 ; ± 10 ; ± 20 ; ± 30 %. Каждому отклонению соответствует

свой класс точности, обозначаемый соответствующей буквой латинского алфавита. На ЭРЭ маркируется либо отклонение, либо класс точности.

Номинальная мощность ($P_{\text{ном}}$) – наибольшая мощность, которую резистор может рассеивать при заданных условиях в течение гарантированного срока службы при сохранении параметров в условленных пределах при непрерывной электрической нагрузке и определенной температуре окружающей среды. Величина $P_{\text{ном}}$ определяется конструкцией, физическими свойствами материалов проводящего элемента и защитного слоя. С повышением температуры окружающей среды $P_{\text{ном}}$ снижается. С целью увеличения срока службы необходим запас по $P_{\text{ном}}$, что позволяет уменьшить изменение сопротивления в течение длительного периода времени и снизить влияние температуры. Конкретные значения $P_{\text{ном}}$ в ваттах устанавливаются согласно ГОСТ 24013–80 и ГОСТ 10318–80 и выбираются из ряда: 0,01; 0,025; 0,05; 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 250; 500.

Удельная мощность рассеяния P_0 (Вт/см²) определяется по формуле (2.4):

$$P_0 = \frac{P}{S}, \quad (2.4)$$

где P – мощность, Вт.

Каждая конструкция резистора характеризуется предельным рабочим напряжением $U_{\text{пред}}$, которое может быть приложено к резистору, не вызывая нарушения его работоспособности. Величина $U_{\text{пред}}$ зависит от условий эксплуатации и рассчитывается по формуле (2.5):

$$U_{\text{пред}} \leq P_{\text{ном}} R_{\text{ном}}. \quad (2.5)$$

Предельное напряжение при нормальном атмосферном давлении в большинстве случаев ограничивается тепловыми процессами в проводящем элементе. При понижении давления $U_{\text{пред}}$ снижается.

Стабильность параметров резистора обычно характеризуется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), которое определяется как относительное изменение величины сопротивления при изменении температуры на 1°. Сопротивление резистора может изменяться под влиянием температуры, влажности, процессов старения, напряжения и т. д.

Собственные шумы – важный параметр, представляющий помехи для полезного сигнала и накладывающий ограничения на чувствительность различных схем. Собственные шумы представляют собой переменное напряжение, характеризующееся непрерывным широким спектром и одинаковой интенсивностью всех составляющих.

Надежность. Экспериментально установлено, что 50 % отказов резисторов происходит из-за нарушения контактного соединения выводов с резистивным элементом и его обрыва, до 40 % – из-за перегорания резистивного элемента, и 10 % – из-за недопустимого изменения сопротивления.

Для повышения надежности и увеличения периода работы резисторы используют в облегченных (по мощности и напряжению) режимах в условиях хорошего охлаждения.

Наибольшей надежностью обладают непроволочные объемные резисторы постоянного сопротивления, а также высокостабильные углеродистые и металлопленочные термостойкие. Проволочные резисторы отличаются невысокой надежностью [6].

Маркировка резисторов. На резисторы наносится буквенно-цифровая маркировка. Систем маркировки достаточно много и у каждого производителя она практически своя. С другой стороны, с уменьшением размеров резисторов громоздкие системы маркировки постепенно были вытеснены более компактными. В результате на резисторах в настоящее время маркируется только отклонение и номинал. Проследим историю маркировок, от старых, которые еще могут встретиться, до современных.

1. Буквенно-цифровая маркировка содержит номинальную мощность, номинальное сопротивление, допуск или класс точности и дату изготовления. Нередко на резисторе уместается и логотип завода изготовителя. Номинальное сопротивление обозначается цифрами с указанием единицы измерения следующим образом: Ом обозначается буквой R, или E, или вообще без буквы; кОм обозначается буквой K, МОм – буквой M, ГОм – буквой G, или G, ТОм – буквой T (тераомы). Например, надпись 220E, или 220, или 220R, или 220Ω обозначает номинал 220 Ом, 68K – 68 кОм, 3,3M или 3M3 – 3,3 МОм, 4Г7 – 4,7 ГОм, 1Т или 1ТО – 1 ТОм и т. д. (рисунок 2.12).

	220 Ом
	10 кОм
	18 кОм
	220 кОм

Рисунок 2.12 – Примеры обозначения параметров на корпусах резисторов

2. Затем появилась система маркировки с помощью линейчатого набора полосок различного цвета, с помощью которых кодировалось отклонение

и сопротивление, а также ТКС. Расшифровка параметров в этом случае производится так, как указано на рисунке 2.13. Сразу появилась кодировка из трех, четырех, пяти и шести колец. Это сильно затруднило расшифровку нанесенного спектра полосок без специальных средств (каталога или специального электронного расшифровщика). К тому же система обладает еще рядом недостатков. Во-первых, необходимо сильно напрягать зрение, чтобы отличать полоски, например, серого от белого цвета, или голубого от серого, особенно у резистора, установленного на плате внутри корпуса, или при искусственном освещении. Цвета со временем изменяются (выцветают), что может внести ошибку при определении параметров ЭРЭ. Во-вторых, при потере цвета хотя бы одной полоски, например, стирание или перегорание краски, информация о резисторе теряется безвозвратно. В-третьих, у некоторых резисторов (отечественных с допуском $\pm 20\%$) пятиполосной системы пятая полоса, обозначающая допуск, не ставится; аналогично при четырехполосной системе с таким же допуском последняя полоса отсутствует. В результате система, соответственно, становится в первом случае четырехполосной, а во втором – трехполосной. Если во втором случае путаницы не происходит, так как зарубежной трехполосной кодировки не существует, то получившаяся четырехполосная кодировка может дать ошибочное значение номинала резистора. В-четвертых, выигрыш по размеру у такой системы – небольшой. В цветовую кодировку некоторые производители включают и тип резисторов и ТКС, но такие системы еще более сложны для расшифровки. По перечисленным причинам такая система маркировки резисторов очень неудобна, но она используется некоторыми производителями [7].

Цветовая маркировка резисторов

	Значение цифры	Множитель	Допуск [%]	ТКС [%/°C]
Черный	0	1		
Коричневый	1	10	±1	100
Красный	2	100	±2	50
Оранжевый	3	1000		15
Желтый	4	10 ⁴		25
Зеленый	5	10 ⁵	±0,5	
Синий	6	10 ⁶	±0,25	10
Фиолетовый	7	10 ⁷	±0,1	5
Серый	8	10 ⁸	±0,05	
Белый	9	10 ⁹		1
Золотистый		10 ⁻¹	±5	
Серебристый		10 ⁻²	±10	

Примеры дешифровки:

6 колец
или точек → 2,7 кОм,
0,5%,
15%/°C

5 колец
или точек → 430 кОм,
5%

4 кольца
или точки → 10 кОм,
0,1%

Рисунок 2.13 – Маркировка параметров резисторов с помощью цветных полосок

3. Современные резисторы для поверхностного монтажа (SMD-резисторы) (бескорпусные и безвыводные) потребовали другой системы маркировки. При размерах корпуса в несколько миллиметров имеется возможность разместить всего несколько знаков. Поэтому производители чип-компонентов используют преимущественно числовую кодировку и только номинала резисторов. Для этого используется или трехпозиционный, или четырехпозиционный код, включающий основание, показатель степени и положение запятой. Резисторы с близким к нулю сопротивлением (перемычки) обозначаются, как показано на рисунке 2.14.

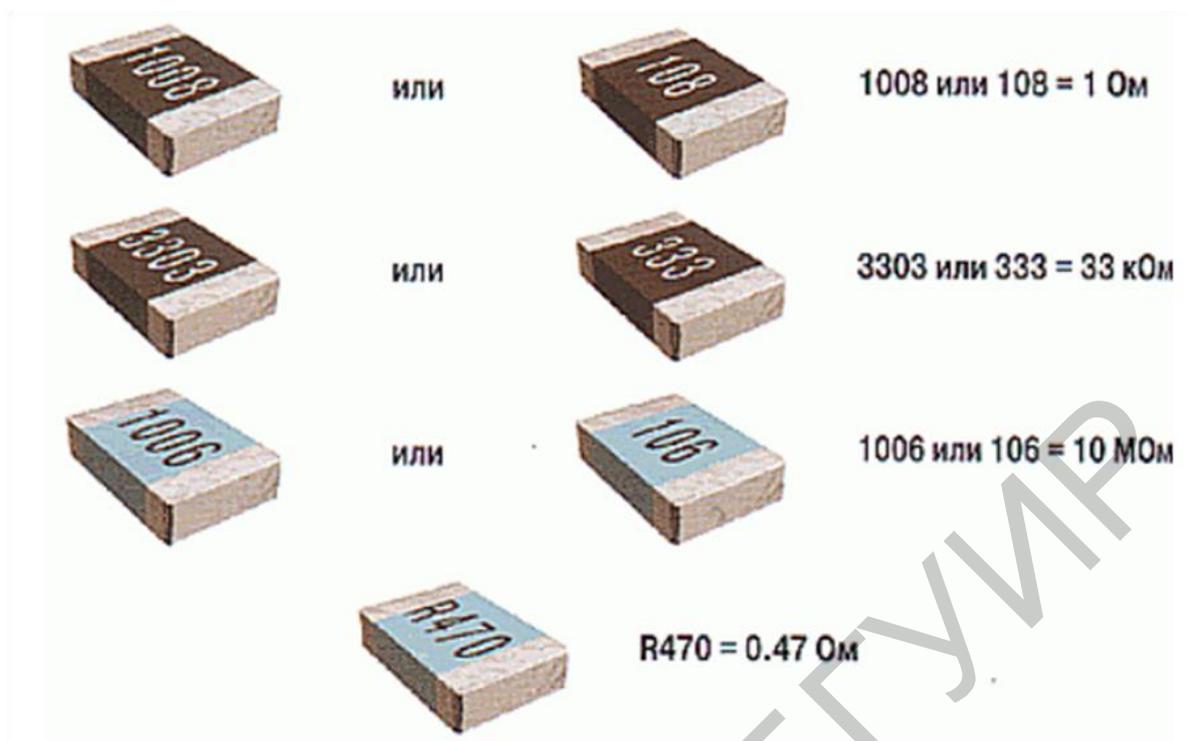


Рисунок 2.14 – Варианты кодировки номиналов резисторов для поверхностного монтажа

Обозначение резисторов на схемах электрических. Чаще всего на схемах резисторы обозначают одинаково – в виде прямоугольника с линиями электрической связи, символизирующими выводы резистора (рисунок 2.15). Это условное графическое обозначение (УГО) – основа, на которой строятся УГО всех разновидностей резисторов. Указанные на рисунке размеры УГО резисторов установлены ГОСТ 2.728–74 и их следует соблюдать при вычерчивании схем.

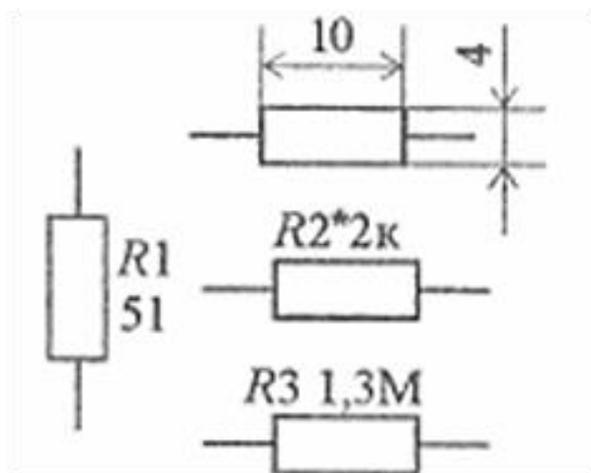


Рисунок 2.15 – УГО резистора

На схемах рядом с УГО резистора (по возможности сверху или справа) указывают его условное буквенно-цифровое позиционное обозначение и номинальное сопротивление. Позиционное обозначение состоит из латинской буквы R и порядкового номера резистора по схеме. Значения сопротивлений указываются в перечне элементов. Сопротивление от 0 до 999 Ом указывают числом без обозначения единицы измерения, от 1 до 999 кОм – числом со строчной буквой, от 1 до 999 МОм – числом с прописной буквой М.

Если же позиционное обозначение резистора помечено звездочкой (резистор R2*), то это означает, что сопротивление указано ориентировочно и при налаживании устройства его необходимо подобрать по определенной методике.

Номинальную рассеиваемую мощность указывают специальными значками внутри условного графического обозначения (рисунок 2.16).

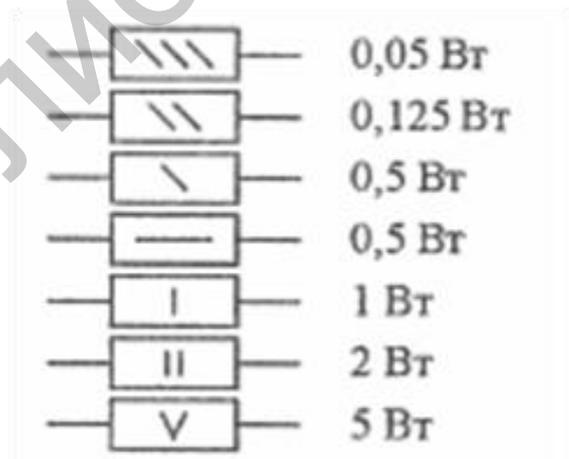


Рисунок 2.16 – Обозначение мощности резистора на УГО

Постоянные резисторы могут иметь отводы от резистивного элемента причем, если необходимо, то символ резистора вытягивают в длину (рисунок 2.17).

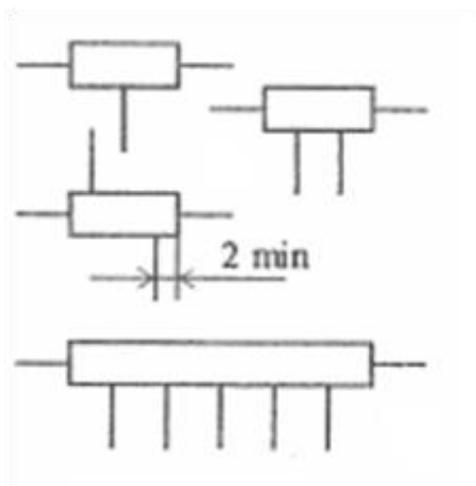


Рисунок 2.17 – УГО резистора с отводами

Переменные резисторы имеют как минимум три вывода: два – от резистивного элемента, определяющего номинальное (а практически – максимальное) сопротивление, один – от перемещающегося по нему токоъемника – движка. Последний изображают в виде стрелки, перпендикулярной стороне основного условного графического изображения (рисунок 2.18, а). Для переменных резисторов в реостатном включении допускается использовать условное графическое изображение, приведенное на рисунке 2.18, б. Переменные резисторы с дополнительными отводами обозначаются так, как показано на рисунке 2.18, в. Отводы у переменных резисторов показывают так же, как и у постоянных.

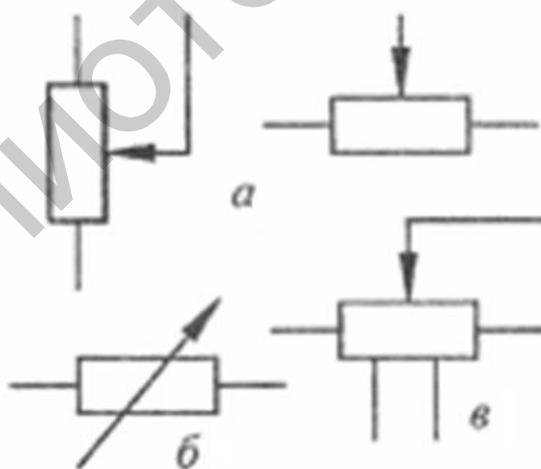


Рисунок 2.18 – УГО переменного резистора

Для регулирования громкости, тембра, уровня в стереофонической аппаратуре, частоты в измерительных генераторах сигналов применяют сдвоенные переменные резисторы. На схемах условных графических изображений входящие в них резисторы стараются расположить возможно ближе друг к другу, а механическую связь показывают либо двумя сплошными линиями, либо одной

штриховой (рисунок 2.19, а). Если же сделать это не удастся, т. е. символы резисторов оказываются на удалении один от другого, то механическую связь изображают отрезками штриховой линии (рисунок 2.19, б). Принадлежность резисторов к двоянному блоку указывают в позиционном обозначении (R2.1 – первый резистор двоянного переменного резистора R2; R2.2 – второй).

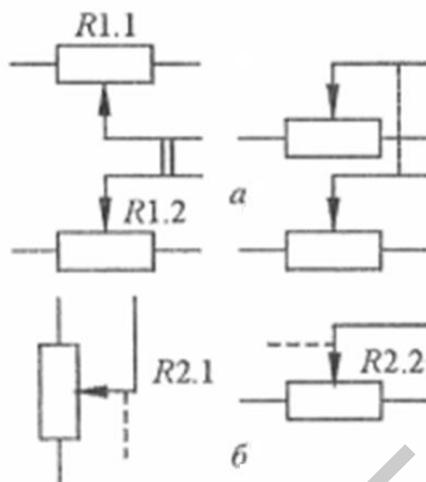


Рисунок 2.19 – УГО двоянных переменных резисторов

В бытовой аппаратуре часто применяют переменные резисторы, объединенные с одним или двумя выключателями. Символы их контактов размещают на схемах рядом с условным графическим изображением переменного резистора и соединяют штриховой линией с жирной точкой, которую изображают с той стороны УГО, при перемещении к которой движок воздействует на выключатель (рисунок 2.20, а). При этом имеется в виду, что контакты замыкаются при движении от точки, а размыкаются при движении к ней. В случае если УГО резистора и выключателя на схеме удалены один от другого, механическую связь показывают отрезками штриховых линий (рисунок 2.20, б).

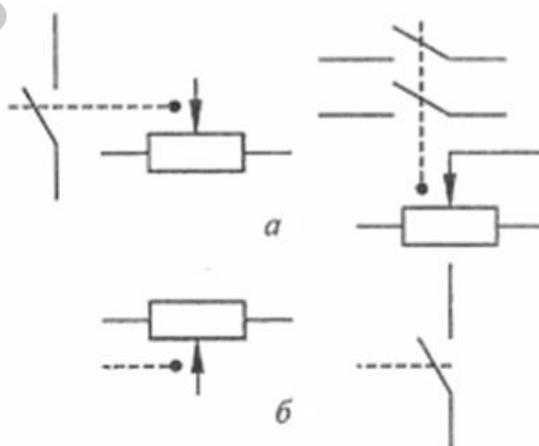


Рисунок 2.20 – УГО переменных резисторов, объединенных с выключателем

Подстроечные резисторы – это разновидность переменных. Узел перемещения движка таких резисторов чаще всего приспособлен для управления отверткой и не рассчитан на частые регулировки. УГО подстроечного резистора наглядно отражает его назначение: практически это постоянный резистор с отводом, положение которого можно изменять.

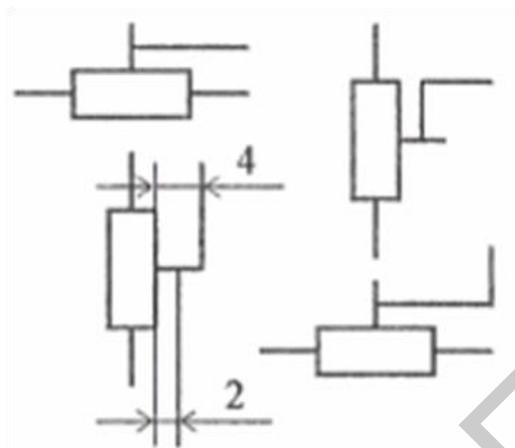


Рисунок 2.21 – УГО подстроечного резистора

Из резисторов, изменяющих свое сопротивление под действием внешних факторов, наиболее часто используют терморезисторы (обозначение RK) и варисторы (RU). Общим для условного графического изображения резисторов этой группы является знак нелинейного саморегулирования в виде наклонной линии с изломом внизу.

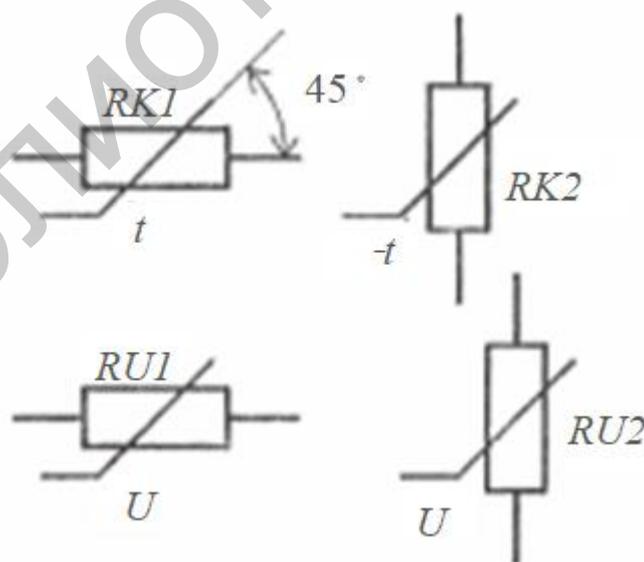


Рисунок 2.22 – УГО терморезистора и варистора

Для указания внешних факторов воздействия используют их общепринятые буквенные обозначения: t (температура), U (напряжение) и т. д. Знак тем-

пературного коэффициента сопротивления терморезисторов указывают только в том случае, если он отрицательный (резистор RK2).

Тема 2.2 Конденсаторы

Конденсатор – это система из двух и более электродов (обычно в форме пластин, называемых обкладками), разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок конденсатора (рисунок 2.23). Такая система обладает взаимной емкостью и способна сохранять электрический заряд. Конденсатор является пассивным электронным компонентом.

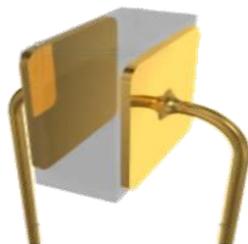


Рисунок 2.23 – Конденсатор

Конденсаторы широко применяют в системах энергоснабжения промышленных предприятий и электрифицированных железных дорог для улучшения использования электрической энергии при переменном токе.

На тепловозах конденсаторы используют для сглаживания пульсирующего тока, получаемого от выпрямителей и импульсных прерывателей, борьбы с искрением контактов электрических аппаратов и радиопомехами, в системах управления полупроводниковыми преобразователями, а также для создания симметричного трехфазного напряжения, требуемого для питания электродвигателей вспомогательных машин [8].

В радиотехнике конденсаторы служат для создания высокочастотных электромагнитных колебаний, разделения электрических цепей постоянного и переменного тока и др.

Конструкции конденсаторов и их разновидности:

1. *По назначению* конденсаторы делятся на конденсаторы:
 - общего назначения (низкочастотные и высокочастотные);
 - специального назначения (высоковольтные, помехоподавляющие, импульсные, дозиметрические, конденсаторы с электрически управляемой емкостью (варикапы, вариконды) и др.);
 - контурные;
 - разделительные;
 - блокировочные;
 - фильтровые.
2. *По характеру изменения емкости* конденсаторы бывают:
 - постоянные;
 - переменные;

– полупеременные (подстрочные);

3. По материалу диэлектрика различают три вида конденсаторов:

– с твердым диэлектриком (керамические, стеклянные, стеклокерамические, стеклоэмалевые, слюдяные, бумажные, электролитические, полистирольные, фторопластовые и др.);

– газообразным диэлектриком;

– жидким диэлектриком.

4. По способу крепления различают конденсаторы:

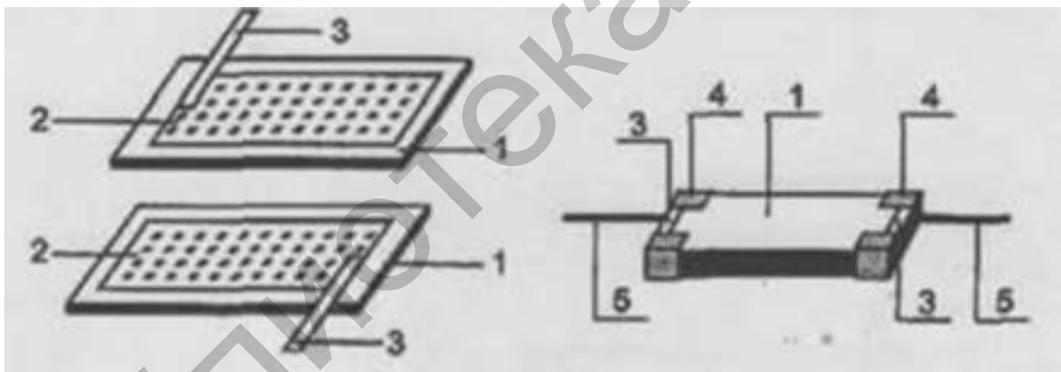
– для навесного монтажа;

– печатного монтажа;

– микромодулей и микросхем.

Различают следующие конструкции конденсаторов: пакетная, трубчатая, дисковая, литая секционированная, рулонная.

Пакетная конструкция представляет собой пакет чередующихся металлических и диэлектрических пластин или тонких пленок. На рисунке 2.24 показана конструкция слюдяного конденсатора. На пластины слюды 1 толщиной около 0,04 мм напыляют металлические обкладки 2, которые соединяются в общий контакт полосками фольги 3. Собранный пакет опрессовывается обжимами 4, к которым присоединяются гибкие выводы 5, и покрывается влагозащитной эмалью. Количество пластин в пакете достигает 100.



1 – пластины слюды; 2 – металлические обкладки; 3 – полоски фольги;
4 – обжимы; 5 – гибкие выводы

Рисунок 2.24 – Конструкция слюдяного конденсатора

Емкость такого конденсатора зависит от числа пластин в пакете и измеряется в пикофарадах:

$$C = \frac{\epsilon S}{3,6\pi d}(n-1) = 0,0885 \frac{\epsilon S}{d}(n-1), \quad (2.6)$$

где n – число пластин в пакете;

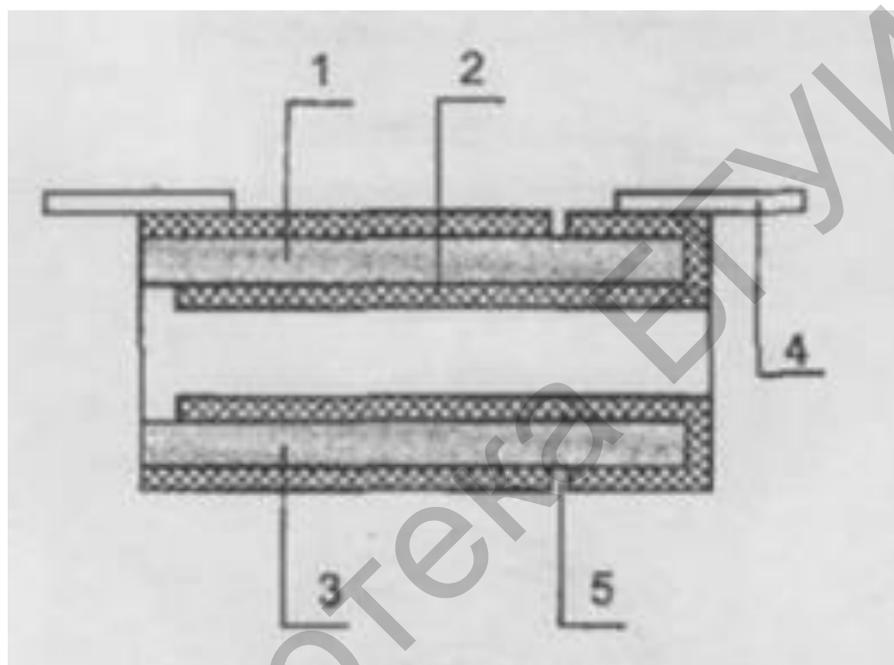
ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S – площадь обкладки, м^2 ;

d – толщина диэлектрика, м.

Такая конструкция применяется в слюдяных, стеклоэмалевых, стеклокерамических и некоторых типах керамических конденсаторов.

Трубчатая конструкция (рисунок 2.25) характерна для высокочастотных трубчатых конденсаторов и представляет собой керамическую трубку 1 с толщиной стенок около 0,25 мм, на внутреннюю и внешнюю поверхность которой нанесены серебряные обкладки 2 и 3. Для присоединения гибких проволочных выводов 4 внутреннюю обкладку выводят на внешнюю поверхность трубки и создают между ними изолирующий поясок 5. Снаружи на трубку наносят защитную пленку из изолирующего материала.



1 – керамическая трубка; 2, 3 – серебряные обкладки; 4 – гибкие проволочные выводы; 5 – изолирующий поясок

Рисунок 2.25 – Трубчатая конструкция конденсатора

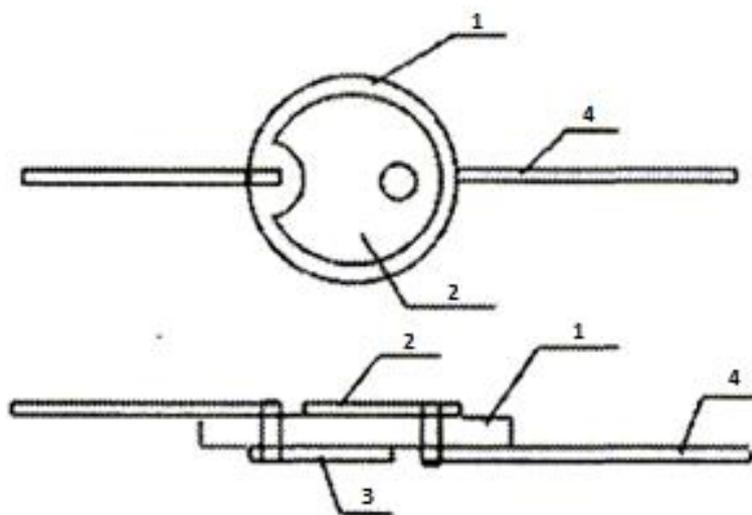
Емкость такого конденсатора определяется по формуле (2.7):

$$C=0,241 \frac{\varepsilon l}{\lg \frac{D_2}{D_1}} \quad (2.7)$$

где l – длина перекрывающейся части обкладок, см;

D_1 и D_2 – наружный и внешний диаметры трубки, м.

Дисковая конструкция характерна для высокочастотных керамических конденсаторов: на керамический диск 1 с двух сторон вжигаются серебряные обкладки 2 и 3, к которым присоединяются гибкие выводы 4 (рисунок 2.26).



1 – керамический диск; 2, 3 – серебряные обкладки; 4 – гибкие выводы

Рисунок 2.26 – Дисконная конструкция конденсаторов

Емкость такого конденсатора определяется площадью обкладок и рассчитывается по формуле

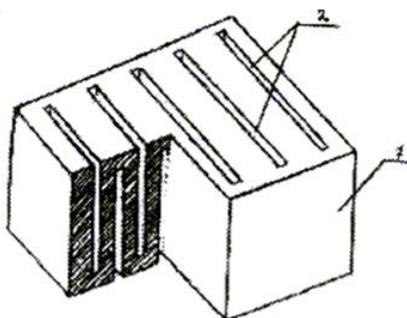
$$C=0,885\frac{\varepsilon S}{d}, \quad (2.8)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика ($\varepsilon > 1$);

S – площадь обкладок конденсатора, см²;

d – расстояние между обкладками.

Литая секционированная конструкция характерна для монолитных многослойных керамических конденсаторов (рисунок 2.27), получивших в последние годы широкое распространение, в том числе в аппаратуре с ИМС.



1 – керамическая заготовка; 2 – прорези (пазы)

Рисунок 2.27 – Конструкция монолитных многослойных керамических конденсаторов

Такие конденсаторы изготавливают путем литья горячей керамики, в результате чего получают керамическую заготовку 1 с толщиной стенок около

100 мкм и прорезями (пазами) 2 между ними, толщина которых порядка 130–150 мкм. Затем эта заготовка окунается в серебряную пасту, которая заполняет пазы, после чего осуществляют вжигание серебра в керамику.

В результате образуются две подгруппы серебряных пластин, расположенных в пазах керамической заготовки, к которым припаиваются гибкие выводы. Снаружи вся структура покрывается защитной пленкой. В конденсаторах, предназначенных для установки в гибридных интегральных микросхемах (ИМС), гибкие выводы отсутствуют, они содержат торцевые контактные поверхности, которые присоединяются к контактными площадкам гибридно-интегральных схем (ГИС).

Рулонная конструкция характерна для бумажных пленочных низкочастотных конденсаторов, обладающих большой емкостью (рисунок 2.28). Бумажный конденсатор образуется путем свертывания в рулон бумажной ленты 1 толщиной около 5–6 мкм и ленты из металлической фольги 2 толщиной около 10–20 мкм. В металlobумажных конденсаторах вместо фольги применяется тонкая металлическая пленка толщиной менее 1 мкм, нанесенная на бумажную ленту.

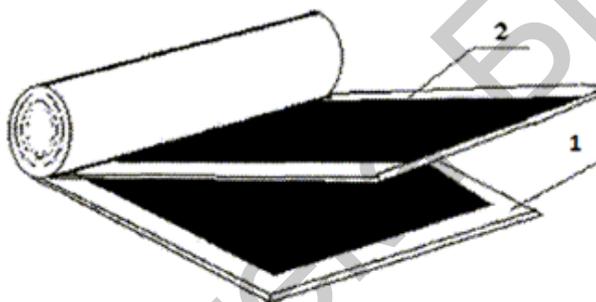


Рисунок 2.28 – Рулонная конструкция

Рулон из чередующихся слоев металла и бумаги не обладает механической жесткостью и прочностью, поэтому он размещается в металлическом корпусе, являющемся механической основой конструкции.

Емкость бумажных конденсаторов достигает 10 мкФ, а металlobумажных – 30 мкФ.

$$C=0,1768\frac{\epsilon bl}{d}, \quad (2.9)$$

где b – ширина ленты, м;
 l – длина ленты, м;
 d – толщина бумаги, м;

Керамические конденсаторы, или керамические дисковые конденсаторы, сделаны из маленького керамического диска, покрытого с двух сторон проводником (обычно серебром) (рисунок 2.29).

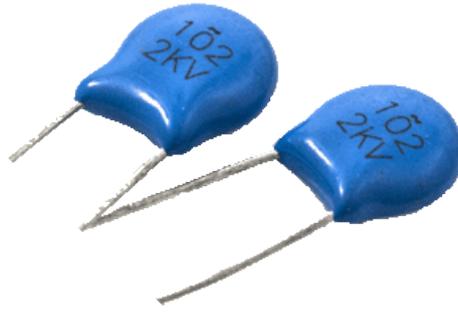


Рисунок 2.29 – Керамические конденсаторы

Благодаря довольно высокой относительной диэлектрической проницаемости (от 6 до 12) керамические конденсаторы могут вместить достаточно большую емкость при относительно малом физическом размере. Диапазон емкости этого типа конденсаторов от нескольких пикофарад (пФ или pF) до нескольких микрофарад (мФ или μF). Однако их номинальное напряжение, как правило, невысокое.

Маркировка керамических конденсаторов обычно представляет собой трехзначный числовой код, обозначающий значение емкости в пикофарадах (рисунок 2.30). Первые две цифры указывают значение емкости, третья цифра – количество нулей, которые нужно добавить.



Рисунок 2.30 – Маркировка керамических конденсаторов

Например, маркировка 103 на керамическом конденсаторе означает 10 000 пФ или 10 нФ. Соответственно, маркировка 104 будет означать 100 000 пФ или 100 нФ и т. д. Иногда к этому коду добавляют буквы, обозначающие допуск. Например, J = 5 %, K = 10 %, M = 20 %.

Пленочные конденсаторы. Емкость конденсатора зависит от площади обкладок. Для того чтобы компактно вместить большую площадь, используют пленочные конденсаторы. Здесь применяют принцип «многослойности», т. е. создают много слоев диэлектрика, чередующегося слоями обкладок. Однако с точки зрения электричества это такие же два проводника, разделенные диэлектриком, как и у плоского керамического конденсатора.

В качестве диэлектрика пленочных конденсаторов обычно используют тефлон, металлизированную бумагу, майлар, поликарбонат, полипропилен, полиэстер. Диапазон емкости этого типа конденсаторов составляет примерно от 5 пФ до 100 мФ. Диапазон номинального напряжения пленочных конденсаторов достаточно широк. Некоторые высоковольтные конденсаторы этого типа достигают более 2000 В.

Различают два вида пленочных конденсаторов по способу размещения слоев диэлектрика и обкладок – *радиальные* и *аксиальные* (рисунок 2.31).

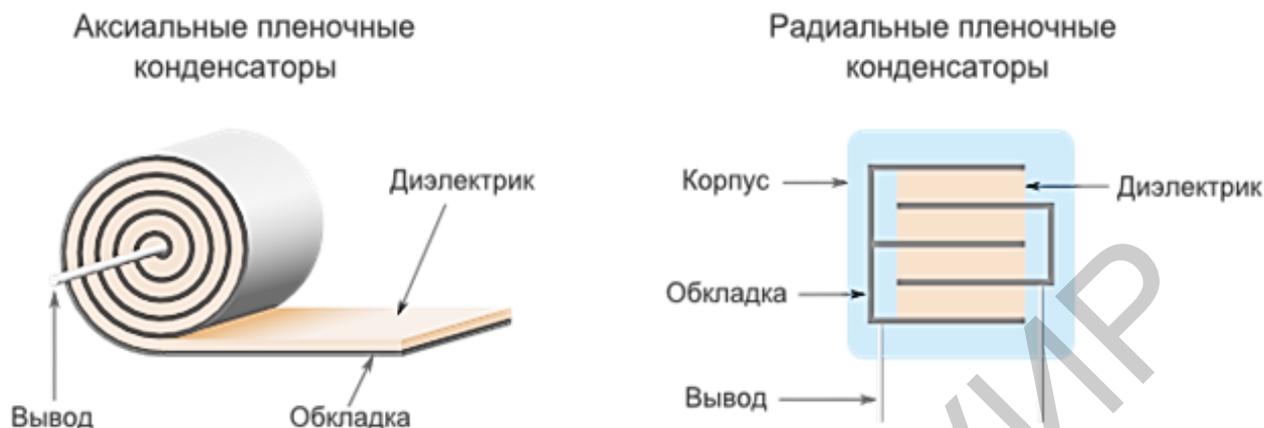


Рисунок 2.31 – Радиальный и аксиальный тип пленочных конденсаторов

Маркировка емкости пленочных конденсаторов происходит по тому же принципу, что и керамических. Это трехзначный числовой код, обозначающий значение емкости в пикофарадах. Первые две цифры указывают значение емкости, третья цифра – количество нулей, которые нужно добавить. Иногда к этому коду добавляют буквы, обозначающие допуск. Например, J = 5 %, K = 10 %, M = 20 %. Например, 103J означает 10 000 пФ ± 5 % или 10 нФ ± 5 %.

Однако довольно часто разные производители кроме значения емкости и точности добавляют символы номинального напряжения, температуры, серии, класса, корпуса и других особых характеристик. Данные символы могут отличаться и быть размещены в разном порядке, в зависимости от производителя.

Электролитические конденсаторы обычно используются, когда требуется большая емкость. Конструкция этого типа конденсаторов похожа на конструкцию пленочных, только здесь вместо диэлектрика используется специальная бумага, пропитанная электролитом (рисунок 2.32). Обкладки конденсатора создаются из алюминия или тантала.

Обратим внимание электролит хорошо проводит электрический ток. Это полностью противоречит принципу устройства конденсатора, где два проводника должны быть разделены диэлектриком.

В данном случае слой диэлектрика создается уже после изготовления конструкции компонента. Через конденсатор пропускают ток, и в результате электролитического окисления на одной из обкладок появляется тонкий слой оксида алюминия или оксида тантала. Этот слой представляет собой очень тонкий и эффективный диэлектрик, позволяющий электролитическим конденсаторам превосходить по емкости в сотни раз пленочные конденсаторы.

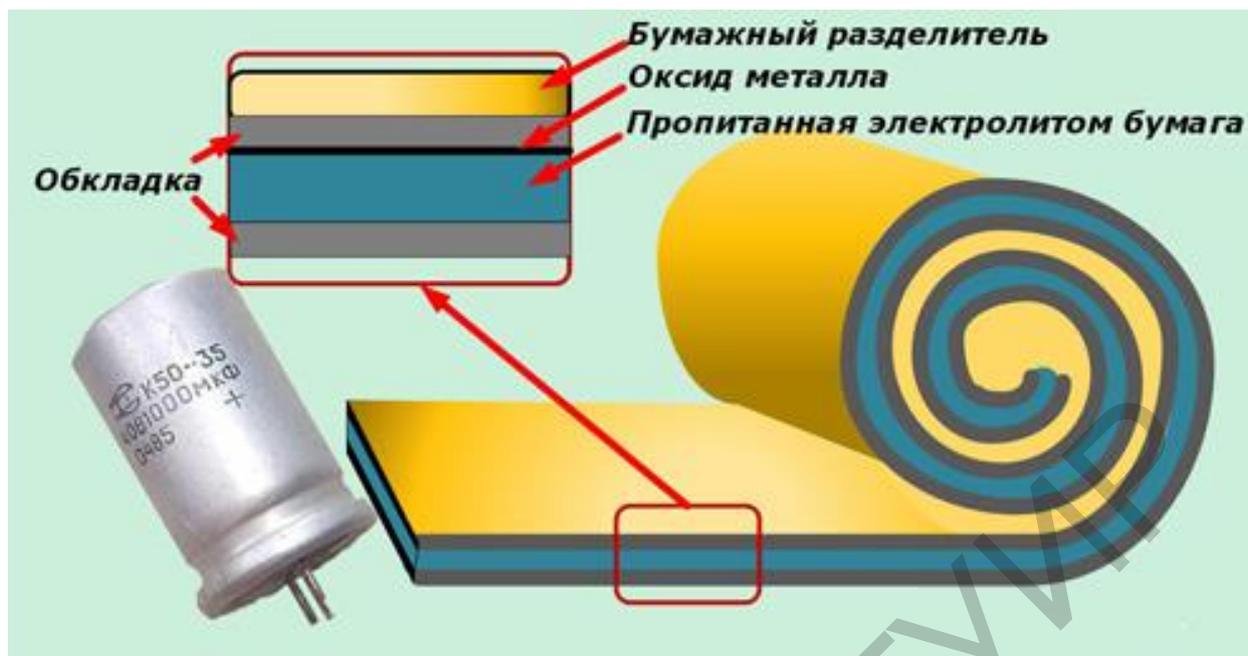


Рисунок 2.32 – Электролитические конденсаторы

Недостатком описанного процесса окисления является полярность конденсатора. Оксидный слой обладает свойствами односторонней проводимости. При неправильном подключении напряжения оксидный слой разрушается, и через конденсатор может пойти большой ток. Это приведет к быстрому нагреву и расширению электролита, в результате чего может произойти взрыв конденсатора! Поэтому необходимо всегда соблюдать полярность при подключении электролитического конденсатора. В связи с этим на корпусе компонента производители указывают, куда подключать «минус».

По причине своей полярности электролитические конденсаторы не могут быть использованы в цепях с переменным током. Но иногда можно встретить компоненты, состоящие из двух конденсаторов, соединенных «минус к минусу» и формирующих «неполярные» конденсаторы. Их можно использовать в цепях с переменным током малого напряжения.

Емкость алюминиевых электролитических конденсаторов колеблется в основном от 1 до 47 000 мкФ, номинальное напряжение – от 5 до 500 В. Допуск обычно довольно большой – 20 %.

Танталовые конденсаторы физически меньше алюминиевых аналогов (рисунок 2.33). К тому же электролитические свойства оксида тантала лучше, чем оксида алюминия: у танталовых конденсаторов значительно меньше утечка тока и выше стабильность емкости, диапазон типичных емкостей – от 47 нФ до 1500 мкФ.

Танталовые электролитические конденсаторы также являются полярными, однако лучше переносят неправильное подключение полярности, чем их алюминиевые аналоги. Вместе с тем диапазон типичных напряжений танталовых компонентов значительно ниже – от 1 до 125 В.

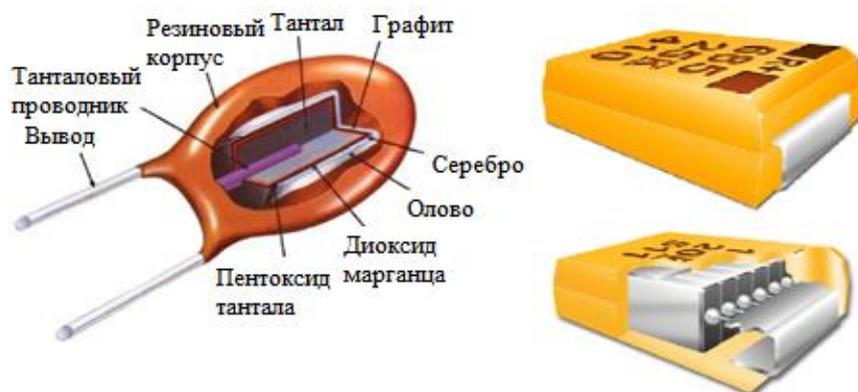


Рисунок 2.33 – Танталовые конденсаторы

Переменные конденсаторы широко используются в устройствах, где часто требуется настройка во время работы, – приемниках, передатчиках, измерительных приборах, генераторах сигналов, аудио- и видеоаппаратуре (рисунок 2.34). Изменение емкости конденсатора позволяет влиять на характеристики проходящего через него сигнала (форму, частоту, амплитуду и т. д.).

Емкость может меняться механическим способом, электрическим напряжением (вариконды) и с помощью температуры (термоконденсаторы). В последнее время во многих областях вариконды вытесняются варикапами (диодами с переменной емкостью).

Под названием «переменные конденсаторы» обычно имеют в виду компоненты с механическим изменением емкости. Управление емкостью здесь достигается путем изменения площади обкладок. Обкладки в переменных конденсаторах состоят из множества пластин с воздушным пространством между ними в качестве диэлектрика.



Рисунок 2.34 – Переменный конденсатор

Подстроечные конденсаторы используются при разовом или периодическом регулировании емкости, в отличие от стандартных переменных конденсаторов, где емкость меняется в «режиме реального времени». Такая настройка предназначена для самих производителей аппаратуры, а не для ее пользователей, и выполняется специальной настроечной отверткой. Обычная стальная отвертка не подходит, так как может повлиять на емкость кон-

денсатора (рисунок 2.35). Емкость подстроечных конденсаторов, как правило, невелика – до 500 пФ.

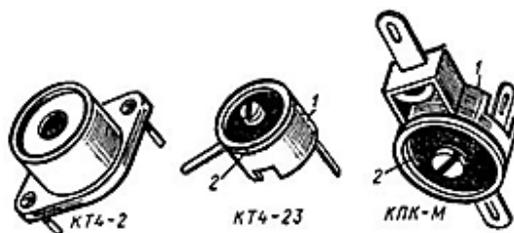


Рисунок 2.35 – Подстроечные конденсаторы

Чип-конденсаторы (SMD). Керамические чип-конденсаторы предназначены для автоматизированного поверхностного монтажа на печатные платы с последующей пайкой оплавлением, горячим воздухом или в инфракрасных печах.

Многослойный керамический конденсатор состоит из сплошного блока керамического диэлектрика и металлизированных электродов. В качестве диэлектрика используют титанаты кальция (CaTiO_3) и бария (BaTiO_3). Высокое значение емкости достигается благодаря увеличению числа электродов и уменьшению толщины диэлектрика.

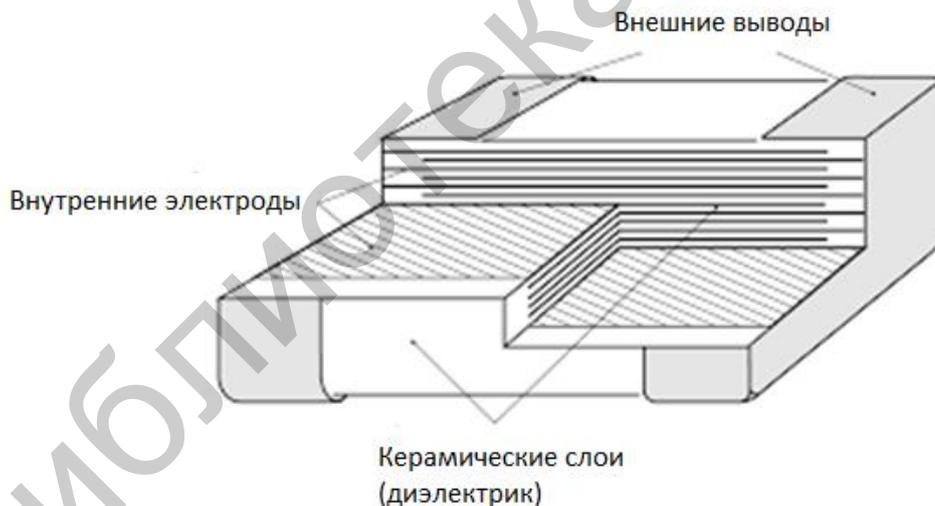


Рисунок 2.36 – Структура керамического чип-конденсатора

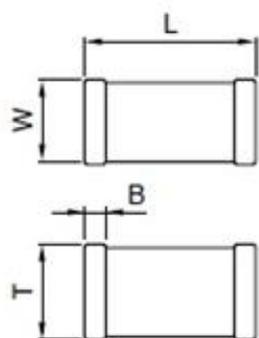
Монолитная структура обеспечивает прочность и надежность. Благодаря высокой точности размеров конденсаторов возможно применение автоматизированной системы установки компонентов на плату.

Технические характеристики чип-конденсаторов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики чип-конденсаторов

Типоразмер	От 0402 до 2220
Диапазон номинальных значений емкости	От 0,5 до 10 мкФ
Допустимые отклонения от номинальных	1, 5, 10, 20
Тип диэлектрика	NPO, X7R, Z5U
Температурный диапазон	-55, +125 °С
Рабочее напряжение	16, 25, 50 В
Сопротивление изоляции	>10 ГОм
Отечественные аналоги	К10-17В, К10-42, К10-43В, К10-47В, К10-50В, К10-56

По коду керамического конденсатора легко узнать его размеры (рисунок 2.37).



Обозначение размера в коде	Длина L, мм	Ширина W, мм	Ширина контактной области B, мм
0402	0,4±0,02	0,2±0,02	0,07
0603	0,6±0,03	0,3±0,03	0,1
1005	1,0±0,05	0,5±0,05	0,1
1608	1,6±0,1	0,8±0,1	0,2
2012	2,0±0,2	1,25±0,2	0,2
3216	3,2±0,2	1,6±0,2	0,2
3225	3,2±0,4	2,5±0,3	0,2
4532	4,5±0,4	3,2±0,4	0,2
5750	5,7±0,4	5,0±0,4	0,2

Рисунок 2.37 – Размеры конденсаторов в соответствии с кодом

Массовое применение чип-конденсаторов обеспечивается их следующими факторами:

- малые габариты;
- стандартизованные размеры;
- большой диапазон емкостей и заданного температурного коэффициента емкости (ТКЕ);
- простота технологии изготовления и, как следствие, дешевизна;
- высокая механическая прочность;
- выдерживание высоких механических нагрузок, возникающих при изготовлении и эксплуатации;
- трехслойные контактные поверхности с барьерным слоем никеля;
- высококачественные диэлектрические материалы;
- стойкость ко всем видам пайки.

Условные обозначения конденсаторов. На электрических схемах конденсаторы постоянной емкости обозначаются двумя параллельными отрезками, символизирующими обкладки конденсаторов, с выводами от их середин. Рядом указывают условное буквенное обозначение конденсатора – букву С.

После буквы С ставится порядковый номер конденсатора в данной схеме. Число, обозначающее номинальное значение емкости, указывается в перечне элементов, на схеме приводится только его позиционное обозначение. На рисунке 2.38 представлено УГО конденсаторов постоянной емкости, оксидных полярных и неполярных, подстроечных конденсаторов и конденсаторов переменной емкости.

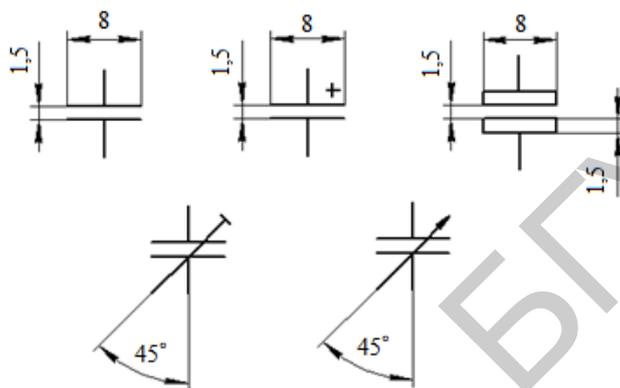


Рисунок 2.38 – УГО конденсаторов

Емкость конденсаторов от 0 до 999 пФ указывают без обозначения единицы измерения (С1, С2), от 10^4 до $9999 \cdot 10^6$ пФ – в микрофарадах с обозначением единицы строчными буквами – мк (С3, С4). Если необходимо отметить, что емкость конденсатора указана на схеме ориентировочно и уточняется в процессе настройки, то порядковый номер (позиционное назначение) такого конденсатора помечают звездочкой (С2*).

Номинальное напряжение конденсаторов (кроме оксидных) указывается только при их работе в цепях с высоким напряжением. Напряжение в таком случае приводится после обозначения номинальной емкости (С5).

Большинство оксидных конденсаторов являются полярными и требуют обязательного соблюдения полярности при их включении в электрическую цепь. На схемах положительная обкладка (анод) такого конденсатора помечается знаком «+» (С6) либо изображается в виде узкого прямоугольника (С7). У неполярных оксидных конденсаторов такими прямоугольниками обозначают все обкладки (С8).

В одном корпусе могут находиться два оксидных конденсатора, у которых обычно имеется три вывода, один вывод общий (С9).

Внутреннюю обкладку проходных конденсаторов обозначают длинным отрезком, а наружную – короткой дугой (С10), одним (С11) или двумя (С12) короткими отрезками.

У опорных конденсаторов обкладку, соединяемую с шасси, отмечают тремя наклонными линиями, символизирующими «заземление» (С13).

Конденсаторы переменной емкости (КПЕ) обозначают двумя параллельными отрезками, пересекаемыми наклонной стрелкой (рисунок 2.39).

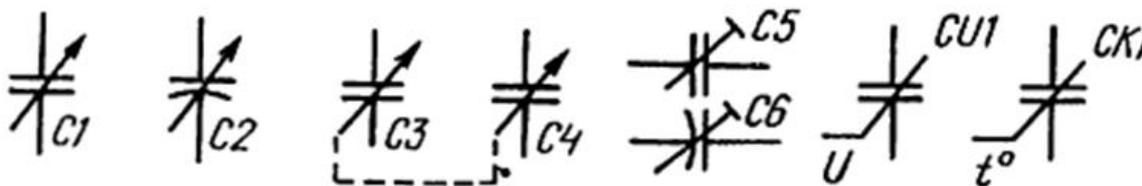


Рисунок 2.39 – УГО конденсаторов переменной емкости

Если необходимо отметить, что к данной точке схемы должны подключаться именно роторные (подвижные) пластины, то на схеме их изображают короткой дугой (C2). Рядом указывают минимальное и максимальное значения емкости. Конденсаторы переменной емкости, входящие в блок КЕ, объединяют штриховой линией, соединяющей знаки регулирования (C3 и C4).

В обозначениях подстроечных конденсаторов вместо наклонной стрелки используется наклонная линия со штрихом на конце (C5). При необходимости ротор подстроечного конденсатора обозначают короткой дугой (C6).

Варикоды имеют буквенный код СУ, который пишется рядом с УГО типового символа конденсатора, перечеркнутого знаком нелинейного саморегулирования с латинской буквой U (CU1). В обозначении термоконденсаторов у знака нелинейного регулирования ставится символ t° , а их буквенным кодом являются буква С (СК1) [9].

Основные электрические параметры конденсаторов. К основным электрическим параметрам конденсаторов относятся:

- 1) электрическая емкость;
- 2) удельная емкость;
- 3) номинальное напряжение;
- 4) полярность;
- 5) температурный коэффициент емкости.

Электрическая емкость (точнее номинальная емкость) конденсатора, определяет его заряд в зависимости от напряжения на обкладках ($q=CU$). Типичные значения емкости конденсаторов составляют от единиц пикофард до сотен микрофард. Однако существуют конденсаторы с емкостью до десятков фард.

Емкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга, в системе СИ выражается формулой

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}, \quad (2.10)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами (эта формула справедлива, лишь когда d много меньше линейных размеров пластин);

ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

d – расстояние между обкладками, м;

S – площадь одной обкладки, м.

Удельная емкость – отношение емкости к объему (или массе) диэлектрика. Максимальное значение удельной емкости достигается при минимальной толщине диэлектрика, однако при этом уменьшается его напряжение пробоя.

$$C_{уд} = \frac{c}{V}, \text{Ф/м}^3, \quad (2.11)$$

где V – объем диэлектрика, м³.

$$C_{уд} = \frac{c}{m}, \text{Ф/м}^3, \quad (2.12)$$

где m – масса конденсатора, кг.

Номинальное напряжение – значение напряжения, обозначенное на конденсаторе, при котором он может работать в заданных условиях в течение срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах. Номинальное напряжение зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. При эксплуатации напряжение на конденсаторе не должно превышать номинальное. Для многих типов конденсаторов с увеличением температуры допустимое напряжение снижается.

Полярность конденсаторов. Многие конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические) функционируют только при корректной полярности напряжения из-за химических особенностей взаимодействия электролита с диэлектриком.

При обратной полярности напряжения электролитические конденсаторы обычно выходят из строя из-за химического разрушения диэлектрика с последующим увеличением тока, вскипанием электролита внутри и, как следствие, с вероятностью взрыва корпуса.

Взрывы электролитических конденсаторов – довольно распространенное явление. Основной причиной взрывов является перегрев конденсатора, вызываемый в большинстве случаев утечкой или повышением эквивалентного последовательного сопротивления вследствие старения (актуально для импульсных устройств). Для уменьшения повреждений других деталей и травматизма персонала в современных конденсаторах большой емкости устанавливают клапан или выполняют насечку на корпусе (часто можно заметить ее в форме букв X, K или T на торце). При повышении внутреннего давления открывается клапан или корпус разрушается по насечке, испарившийся электролит выходит в виде едкого газа, и давление спадает без взрыва и осколков.

Температурный коэффициент емкости – величина, применяемая для характеристики конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры и равная относительному изменению емкости при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия.

По значению ТКЕ керамические и некоторые другие конденсаторы разделяются на группы. Для конденсаторов с нелинейной зависимостью емкости от температуры, а также с большими уходами емкости от температуры обычно приводится относительное изменение емкости в рабочем интервале температур.

Эксплуатационно-технические характеристики. К эксплуатационно-техническим характеристикам конденсаторов относятся:

- 1) рабочее напряжение;
- 2) номинальная емкость;
- 3) рабочая температура;
- 4) тангенс угла потерь;
- 5) ток утечки;
- 6) диаметр корпуса;
- 7) длина корпуса;
- 8) температурный коэффициент емкости;
- 9) добротность.

Сокращения, используемые в зарубежном и отечественном производстве. Систем маркировки конденсаторов достаточно много и у каждого производителя она практически своя.

Одни из самых используемых конденсаторов отечественного производителя – это конденсаторы постоянной емкости К73-17, К73-44, К78-2, керамические КМ-5, КМ-6 и им подобные.

В радиоэлектронной аппаратуре импортного производства используются аналоги этих конденсаторов. Их маркировка отличается от маркировки отечественных производителей.

Буквенно-числовая маркировка конденсаторов. На корпусе конденсаторов отечественного производства К73-17 маркировка наносится буквенно-числовым индексом, например 100nJ, 330nK, 220nM, 39nJ, 2n2M (рисунок 2.40).

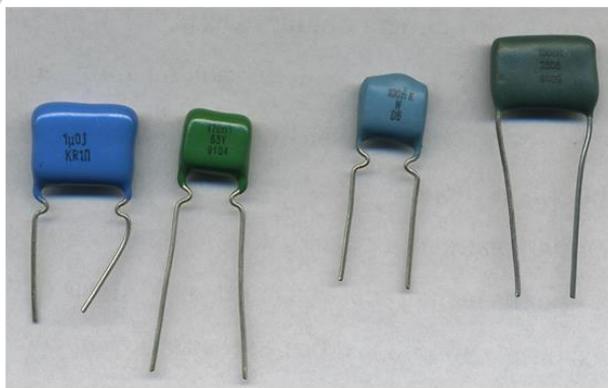


Рисунок 2.40 – Конденсаторы типа К73-17

Маркировка номинальной емкости конденсаторов. Емкости от 100 пФ и до 0,1 мкФ маркируют в нанофарадах, указывая букву Н или н.

Обозначение 100n – это значение номинальной емкости конденсатора, соответствующее 100 нФ или 0,1 мкФ.

Можно встретить маркировку вида 47НС. Данная маркировка емкости соответствует маркировке 47nК и составляет 47 нФ или 0,047 мкФ.

Также в маркировке конденсаторов К73 встречаются такие обозначения, как М47С, М10С. Здесь буква М условно означает микрофарад. Значение 47 стоит после М, т. е. номинальная емкость конденсатора является дольной частью микрофарада, т. е. 0,47 мкФ. Для М10С – 0,1 мкФ.

Получается, что емкость конденсатора с маркировкой М10С равна емкости конденсатора с маркировкой 100nJ. Только условная маркировка чуть отличается.

Таким образом, емкость от 0,1 мкФ и выше указывается с буквой М или m вместо десятичной запятой, незначащий нуль опускается.

Номинальную емкость отечественных конденсаторов до 100 пФ обозначают буквой П после числа. Если емкость менее 10 пФ, то ставится буква R и две цифры. Например, 1R5 = 1,5 пФ.

На керамических конденсаторах (типа КМ5, КМ6), которые имеют малые размеры, обычно указывается только числовой код емкости (рисунок 2.41).



Рисунок 2.41 – Керамические конденсаторы с нанесенной маркировкой емкости числовым кодом

Например, числовая маркировка 224 соответствует значению 220 000 пФ, или 220 нФ, или 0,22 мкФ. В данном случае 22 – это числовое значение величины номинала. Цифра 4 указывает на количество нулей. Получившееся число является значением емкости в пикофарадах. При маркировке 221 емкость равна 220 пФ, при 220 – 22 пФ. Если же в маркировке конденсатора используется код из четырех цифр, то первые три цифры – числовое значение величины номинала, четвертая – количество нулей. Так, при обозначении 4722 емкость равна 47 200 пФ или 47,2 нФ.

Допускаемое отклонение емкости маркируется либо числом в процентах (± 5 , ± 10 , ± 20 %), либо латинской буквой. Иногда можно встретить старое обозначение допуска, закодированного русской буквой.

Буквенный код отклонения емкости конденсатора (допуск). Так, если у конденсатора маркировка М47С, то его емкость 0,047 мкФ, а допуск составляет ± 10 % (по старой маркировке русской буквой). Встретить конденсатор с допус-

ком $\pm 0,25\%$ (по маркировке латинской буквой) в бытовой аппаратуре довольно сложно, поэтому и выбрано значение с большей погрешностью. В основном в бытовой аппаратуре широко применяются конденсаторы с допуском Н, М, J, K. Буква, обозначающая допуск, указывается после значения номинальной емкости конденсатора: 22nK, 220nM, 470nJ.

Маркировка допустимого рабочего напряжения конденсатора. Обычно значение допустимого рабочего напряжения конденсатора указывается после номинальной емкости и допуска. Обозначается в вольтах буквой В (старая маркировка) или V (новая маркировка), например: 250 В, 400 В, 1600 V, 200 V. В некоторых случаях буква V опускается.

Иногда применяется кодирование латинской буквой. Для расшифровки следует пользоваться таблицей буквенного кодирования рабочего напряжения конденсаторов.

Цветовая маркировка конденсаторов используется уже много лет. В настоящее время она считается устаревшей, но все еще используется. Первые две цифры – емкость, третья – количество нулей, четвертая – допуск, пятая – номинальное напряжение (рисунок 2.42) [10]. Например; сочетание коричневого, черного, оранжевого цветов означает $10\ 000\ \text{пФ} = 10\ \text{нФ} = 0,01\ \text{мкФ}$.

Цвет	Значение
Чёрный	0
Коричневый	1
Красный	2
Оранжевый	3
Жёлтый	4
Зелёный	5
Голубой	6
Фиолетовый	7
Серый	8
Белый	9

Рисунок 2.42 – Цветовая маркировка

Между полосами нет никаких промежутков, поэтому два одинаковых соседних цвета фактически образуют широкую полосу. Например, широкий красный, желтый означают $220\ \text{нФ} = 0,22\ \text{мкФ}$ (рисунок 2.43).

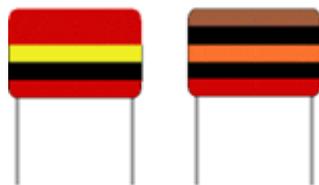


Рисунок 2.43 – Маркировка конденсаторов

Тема 2.3 Катушки индуктивности, дроссели и трансформаторы

Катушки индуктивности

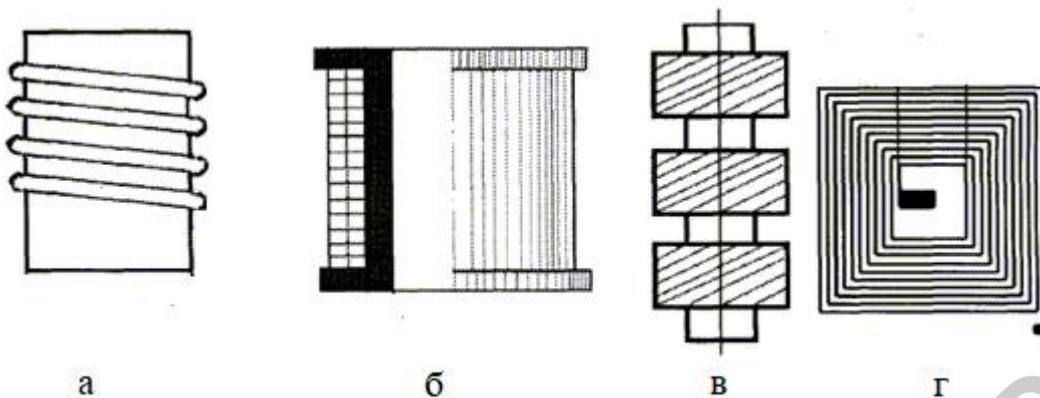
Катушки индуктивности – элемент электрической цепи, предназначенный для накопления энергии магнитного поля.

Катушки индуктивности применяются в качестве фильтров питания, колебательных контуров приемопередающих устройств, импульсных стабилизаторов напряжения, накопительных дросселей, преобразователей уровня напряжения (рисунок 2.44). Конструктивно катушки индуктивности подразделяются на выводные и SMD, для поверхностного монтажа. Две основные характеристики данного компонента определяются номиналом индуктивности и допустимым рабочим током [11].



Рисунок 2.44 – Разновидности катушек индуктивности

Конструкции и их разновидности. Конструкционной основой катушки индуктивности является диэлектрический каркас, на который наматывается провод в виде спирали. Обмотка может быть как однослойной (рисунок 2.45, а), так и многослойной (рисунок 2.45, б). В некоторых случаях многослойная обмотка делается секционированной (рисунок 2.45, в). В интегральных схемах применяются плоские спиральные катушки индуктивности (рисунок 2.45, г).



а – однослойная обмотка; б – многослойная обмотка; в – секционированная многослойная обмотка; г – плоские спиральные катушки индуктивности

Рисунок 2.45 – Конструкции катушек индуктивности

Для увеличения индуктивности применяют магнитные сердечники. Помещенный внутрь катушки сердечник концентрирует магнитное поле и тем самым увеличивает ее индуктивность. Перемещением сердечника внутри каркаса можно изменять индуктивность.

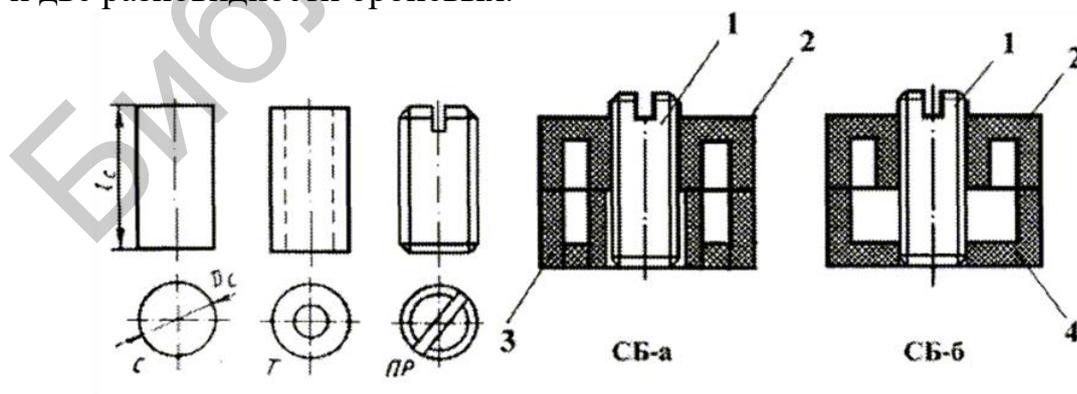
Сердечники катушек индуктивности бывают:

- 1) цилиндрические;
- 2) броневые;
- 3) тороидальные (кольцевые);
- 4) подстроечные цилиндрические;

Цилиндрические сердечники могут быть:

- 1) стержневыми;
- 2) трубчатыми;
- 3) подстроечными резьбовыми;

На рисунке 2.46 представлены разновидности цилиндрических сердечников и две разновидности броневых.



С – стержневой; Т – трубчатый; ПР – подстроечный резьбовой;
СБ-а и СБ-б – броневые

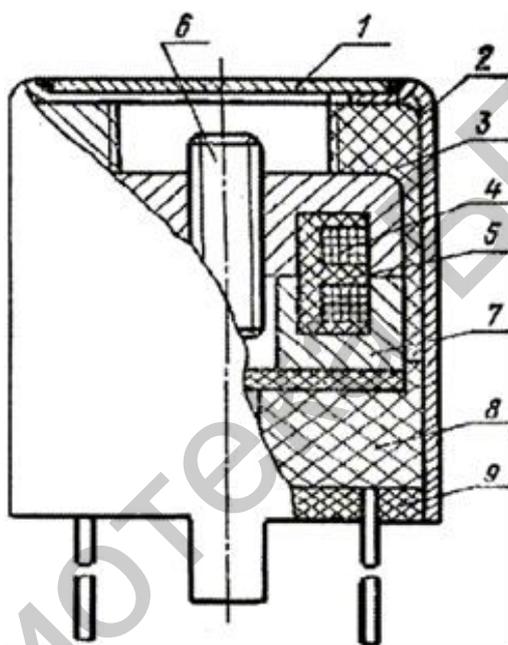
Рисунок 2.46 – Разновидности цилиндрических сердечников

Броневые сердечники состоят из двух чашек 2, изготовленных из карбонильного железа или ферритов. Они могут иметь либо замкнутый магнитопровод (тип СБ-а), либо разомкнутый (тип СБ-б). Для изменения индуктивности служит подстроечный цилиндрический сердечник 1.

Помимо цилиндрических и броневых применяют торроидальные (кольцевые) сердечники.

На высоких частотах (десятки-сотни мегагерцев) применяют подстроечные цилиндрические сердечники из диамагнетиков (латунь, медь). При введении этих сердечников внутрь катушки индуктивность уменьшается.

Для уменьшения влияния электромагнитного поля катушки на другие элементы схемы, а также для уменьшения влияния внешних полей на катушку индуктивности, ее располагают внутри металлического экрана, как это показано на рисунке 2.47.



1 – заглушка; 2 – экран; 3 – корпус; 4 – обмотка; 5 – каркас; 6 – подстроечный стержень; 7 – чашка сердечника; 8 – основание; 9 – заливка

Рисунок 2.47 – Металлический экран

Контурные катушки индуктивности (рисунок 2.48) используются совместно с конденсаторами для получения резонансных контуров. Они должны иметь высокую стабильность, точность и добротность. В диапазоне длинных и средних волн эти катушки многослойные, как правило, с намоткой типа «универсаль». Для повышения добротности применяют многожильные провода типа «литцендрат». Для изменения индуктивности применяют цилиндрические сердечники из альсифера или карбонильного железа.

В диапазоне коротких и ультракоротких волн используются однослойные катушки с индуктивностью порядка единиц микрогенри и добротностью порядка 50–100. Число витков таких катушек не превышает одного-двух десятков, диаметр каркаса 10–20 мм. В качестве каркасов используют керамику, поли-

этилен и полистирол. Для уменьшения собственной емкости применяют ребристые каркасы. Обмотка выполняется одножильным медным проводом диаметром около 1 мм. На ультракороткие волны (УКВ) применяют бескаркасные катушки из неизолированного провода.



Рисунок 2.48 – Контурные катушки индуктивности

Катушки связи (рисунок 2.49) применяются для обеспечения индуктивной связи между отдельными цепями и каскадами. Такая связь позволяет разделить по постоянному току цепи базы и коллектора.

К таким катушкам не предъявляются жесткие требования на добротность и точность, поэтому они выполняются из тонкого провода в виде двух обмоток небольших габаритов. Основными параметрами этих катушек являются индуктивность и коэффициент связи:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (2.13)$$

где L_1 и L_2 – индуктивность связанных катушек, Гн;

M – взаимная индуктивность между ними, Гн.

Величина коэффициента связи зависит от расстояния между катушками: чем оно меньше, тем больше k .

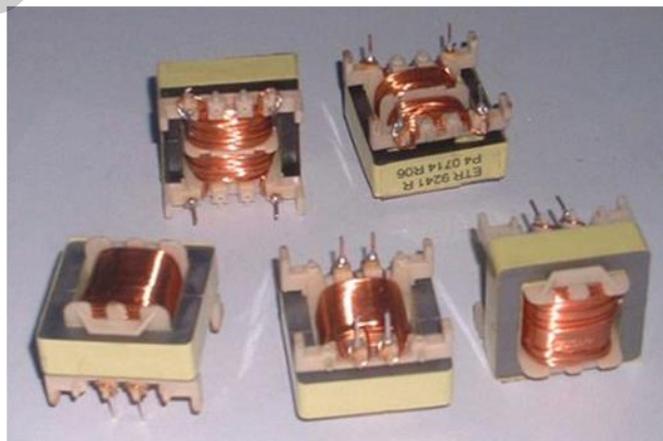


Рисунок 2.49 – Катушки связи

Вариометры – это катушки, индуктивность которых можно изменять в процессе эксплуатации для перестройки колебательных контуров (рисунок 2.50). Они состоят из двух катушек, соединенных последовательно: одна из катушек неподвижная (статор), другая располагается внутри первой и вращается (ротор). При изменении положения ротора относительно статора изменяется величина взаимной индукции, а следовательно, индуктивность вариометра. Такая система позволяет изменять индуктивность в 4–5 раз. В ферровариометрах индуктивность изменяется перемещением ферромагнитного сердечника.



Рисунок 2.50 – Вариометр

Катушки индуктивности для ГИС (гибридных ИМС). На частотах порядка 10–100 МГц находят применение тонкопленочные спиральные катушки. На площади в 1 см^2 располагается не более 10 витков. Добротность таких катушек не превышает 20–30. Поэтому они находят ограниченное применение. В ГИС предпочтительны миниатюрные торроидальные катушки на ферритовых сердечниках, индуктивность которых достигает десятков тысяч микрогенри (рисунок 2.51).



Рисунок 2.51 – Торроидальные катушки

Основные электрические параметры катушек индуктивности. К основным электрическим параметрам катушек индуктивности относятся:

- 1) номинальная индуктивность катушки;
- 2) допускаемое отклонение индуктивности катушки;

- 3) номинальная добротность катушки;
- 4) температурный коэффициент индуктивности катушки;
- 5) собственная емкость катушки индуктивности.

Номинальная индуктивность катушки – значение индуктивности, являющееся исходным для отсчета отклонений.

Допускаемое отклонение индуктивности катушки – разность между предельным и номинальным значениями индуктивности.

Номинальная добротность катушки индуктивности – значение добротности при номинальном значении индуктивности.

Добротность характеризует относительные потери мощности в катушке и определяет качество катушки индуктивности, используемой в колебательном контуре:

$$Q = \frac{X_L}{R}, \quad (2.14)$$

где R – активное сопротивление катушки индуктивности, Ом;

X_L – индуктивное сопротивление, Ом.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL. \quad (2.15)$$

Значение добротности зависит от частоты. При отсутствии ферромагнитного магнитопровода и малой емкости C добротность зависит от соотношения между индуктивностью L и активным сопротивлением провода $R_{пр}$. Для снижения активного сопротивления провода обмотки катушек наматывают достаточно толстым проводом, применяя специальный многожильный провод, а для работы на высоких частотах покрывают его серебром.

Дроссели

Дроссель (от нем. – сокращать) является разновидностью катушки индуктивности. Свойства такой катушки зависят от того, какой частоты электрический ток нужно «сокращать» или «задерживать». Дроссель включают в электрическую цепь для подавления переменной составляющей тока в цепи либо для разделения или ограничения сигналов различных частот.

В зависимости от назначения дроссели делятся на высокочастотные и низкочастотные.

Это различие относится и к конструктивному их исполнению. Дроссели высокой частоты изготавливают в виде однослойных или многослойных катушек без сердечников или с сердечниками. Для дросселей длинных и средних волн применяют секционную намотку. Дроссели на коротких и метровых волнах имеют однослойную намотку, сплошную или с принудительным шагом.

Для уменьшения габаритов дросселей применяют магнитные сердечники. Дроссели высокой частоты с сердечниками из магнитодиэлектриков и ферритов имеют меньшую собственную емкость и могут работать в более широком диа-

пазоне частот. Низкочастотный дроссель подобен электрическому трансформатору с одной обмоткой.

Дроссели применяются в цепях питания радиотехнических устройств в качестве фильтрующего элемента. Для сетей питания с частотами 50–60 Гц дроссели выполняются на сердечниках из трансформаторной стали. На более высоких частотах также применяются сердечники из пермаллоя или феррита. Особая разновидность дросселей – помехоподавляющие ферритовые бочонки (бусины) на проводах (рисунок 2.52).



Рисунок 2.52 – Виды силовых дросселей

Сдвоенные дроссели (рисунок 2.53) – две намотанные встречно катушки индуктивности – используются в фильтрах питания. За счет встречной намотки и взаимной индукции они более эффективны для фильтрации синфазных помех при тех же габаритах. Сдвоенные дроссели получили широкое распространение в качестве входных фильтров блоков питания в дифференциальных сигнальных фильтрах цифровых линий, а также в звуковой технике, т. е. предназначены как для защиты источников питания от попадания в них наведенных высокочастотных сигналов, так и для избежания засорения питающей сети электромагнитными помехами. На низких частотах данные дроссели используются в фильтрах цепей питания и обычно имеют ферромагнитный (из трансформаторной стали) или ферритовый сердечник.

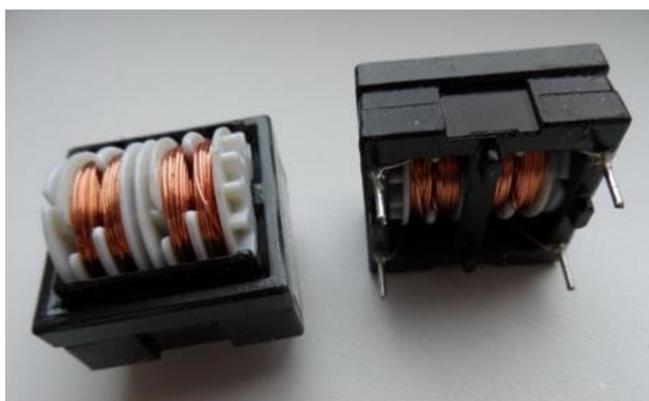


Рисунок 2.53 – Сдвоенные дроссели

Трансформаторы

Трансформатор (от лат. transformo – преобразовывать) – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки на каком-либо магнитопроводе и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем (напряжений) переменного тока в одну или несколько других систем (напряжений) без изменения частоты.

Трансформатор осуществляет преобразование переменного напряжения и/или гальваническую развязку в различных областях применения – электроэнергетике, электронике и радиотехнике.

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного магнито-мягкого материала (рисунок 2.54).



Рисунок 2.54 – Силовой однофазный трансформатор

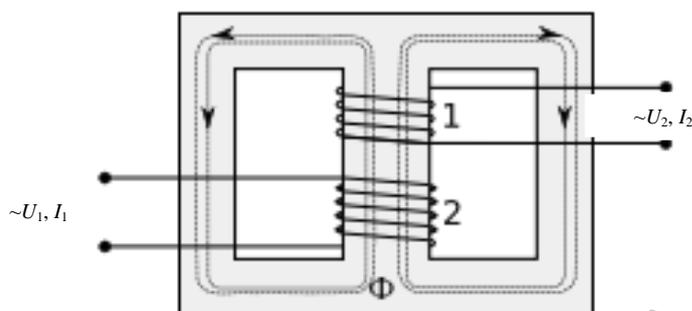
Базовые принципы действия трансформатора. Работа трансформатора основана на двух базовых принципах:

- 1) Изменяющийся во времени электрический ток создает изменяющееся во времени магнитное поле (электромагнетизм).
- 2) Изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создает электродвижущую силу (ЭДС) в этой обмотке (электромагнитная индукция).

Согласно второму принципу (рисунок 2.55) на одну из обмоток, называемую первичной, подается напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток намагничивания создает переменный магнитный поток в магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции переменный магнитный поток в магнитопроводе создает во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции, пропорциональную производной магнитного потока, сдвинутой при синусоидальном токе на 90° в обратную сторону по отношению к магнитному потоку.

В некоторых трансформаторах, работающих на высоких или сверхвысоких частотах, магнитопровод может отсутствовать.

Форма напряжения во вторичной обмотке связана с формой напряжения в первичной обмотке довольно сложным образом. Благодаря этой сложности удалось создать целый ряд специальных трансформаторов, которые могут выполнять роль усилителей тока, умножителей частоты, генераторов сигналов и т. д.



1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка

Рисунок 2.55 – Схематическое устройство трансформатора

Условные обозначения катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов

Независимо от конструкции катушки индуктивности и дроссели изображают на схемах так, как показано на рисунке 2.56. Число полуокружностей в условных обозначениях (УО) обычно берут равным четырем. Если катушка имеет отводы, то их показывают линиями, проведенными к местам соединения полуокружностей или к их серединам. Рядом с УГО катушки или дросселя ставят прописную латинскую букву L. Если в схеме несколько катушек или дросселей, то после буквы L пишут еще и цифру, указывающую на порядковый номер (позицию) катушки в схеме (L1, L2).

Сердечник, или магнитопровод, катушки или дросселя из феррита или ферромагнитного материала обозначают на схеме сплошной линией с наружной стороны полуокружностей (L3). Если сердечник выполнен из немагнитных материалов (медь, алюминий и др.), то рядом с отрезком прямой линии указывают химический символ этого элемента (L4). Сердечники из магнетодиэлектрических материалов (альсифер, карбонильное железо) изображают пунктиром (L5).

Для увеличения магнитного сопротивления ферромагнитного магнитопровода в нем делают зазор, который может быть заполнен специальным изоляционным лаком, плотной бумагой или картоном. В таких случаях сплошную линию в УГО разрывают посередине (L6).

Возможность подстройки индуктивности обозначают знаком подстроечного регулирования – прямой линией со «шляпкой» (L7), пересекающей УГО катушки и магнитопровода под углом 45°, либо прямой стрелкой (L8, L9).

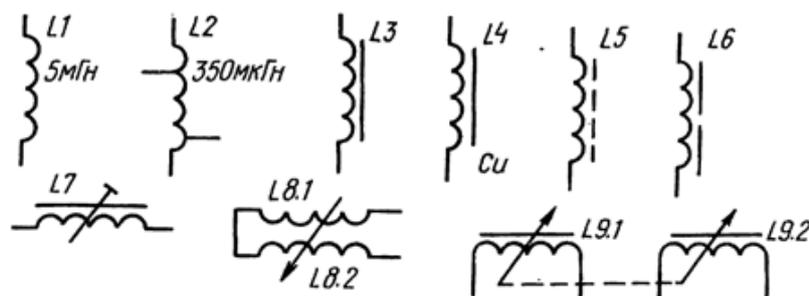


Рисунок 2.56 – УГО катушек индуктивности и дросселей

Низкочастотные трансформаторы на схемах обозначаются буквой Т, а их обмотки – римскими цифрами (рисунок 2.57). Вместо римских цифр для обозначения обмоток иногда используют условную нумерацию их выводов. Экран между первичной и вторичной обмотками на схемах изображают штриховой линией.

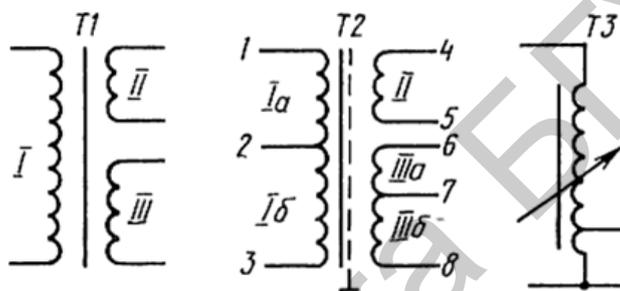


Рисунок 2.57 – УГО низкочастотных трансформаторов

Высокочастотные трансформаторы могут быть с сердечником и без него. Если магнитопровод является общим для всех обмоток, то его на схемах изображают прерывистой линией между катушками (рисунок 2.58, а). Если же каждая из катушек имеет свой магнитопровод, то его изображают над катушками (рисунок 2.58, б). Возможность подстройки индуктивности катушек изменением положения магнитопровода отображают знаком подстроечного регулирования, который пересекает символы обмоток (рисунок 2.58, в), или УГО магнитопроводов (рисунок 2.58, б). Чтобы показать индуктивную регулируемую связь между катушками, их символы пересекают знаком регулирования (рисунок 2.58, г, д). На электрических схемах начало обмоток обозначают точками, которые ставят у соответствующего вывода (например, как на рисунке 2.58, а).

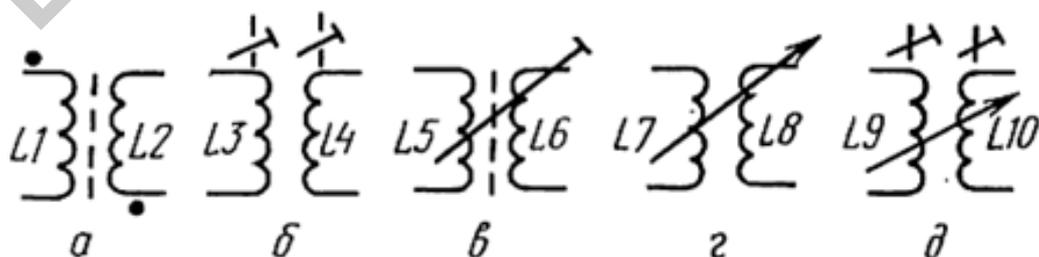


Рисунок 2.58 – УГО высокочастотных трансформаторов

Температурный коэффициент индуктивности катушки (TKL) – относительное изменение индуктивности катушки при изменении температуры

$$\alpha_L = \text{TKL} = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}, \quad (2.16)$$

где L_0 – начальное значение индуктивности катушки, Гн;

ΔL – изменение индуктивности, Гн;

ΔT – изменение температуры катушки, °С.

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

Наряду с индуктивностью L реальные катушки индуктивности включают сопротивление провода $R_{\text{пр}}$, потери в магнитопроводе $R_{\text{пот}}$ и емкость C . Для проведения электротехнических расчетов используют одну из эквивалентных схем (рисунок 2.59). Следует отметить, что L и L' , $R_{\text{пот}}$ и $[R']_{\text{пот}}$ не равны друг другу и должны быть приведены к определенной схеме.

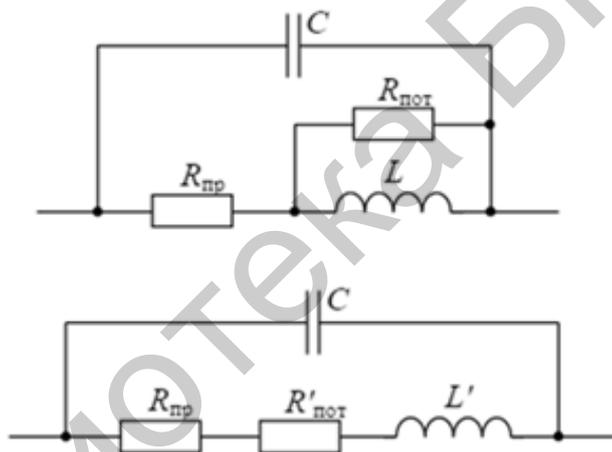


Рисунок 2.59 – Эквивалентные схемы реальных катушек индуктивности

Основные электрические параметры трансформаторов питания:

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

Эксплуатационно-технические характеристики катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов

К эксплуатационно-техническим характеристикам катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов относятся:

- 1) исполнение;
- 2) номинальный ток;
- 3) номинальное напряжение;
- 4) индуктивность обмотки;
- 5) активное сопротивление;
- 6) размеры корпуса;
- 7) конструктивное исполнение;
- 8) номинальная индуктивность;
- 9) допуск номинальной индуктивности;
- 10) максимальный постоянный ток;
- 11) добротность;
- 12) рабочая температура;
- 13) температурный коэффициент индуктивности катушки;
- 14) способ монтажа.

Правила применения в устройствах

Индуктивность применяется в различных приборах в радиотехнике, электротехнике, технике связи, электронике, автоматике и многих других областях. Это трансформаторы, различные электрические фильтры, электромагнитные реле, преобразователи электрической энергии и т. д.

Самое простое применение катушки с проводом – электромагнит (рисунок 2.60).

При прохождении электрического тока по проводу вокруг него образуется постоянное магнитное поле. Чем больше витков в катушке и чем больше электрический ток, проходящий через нее, тем больше магнитный поток, пронизывающий витки катушки.

Для увеличения силы притяжения электромагнита в катушку вводят ферромагнитный (стальной) сердечник.

Свойство катушки с проводом образовывать магнитное поле используется в мощных электромагнитах, во всевозможных электромеханических реле, электрических двигателях и генераторах и т. д.



Рисунок 2.60 – Электромагнит

Катушка индуктивности – фильтр, имеющий минимальное сопротивление для прохождения постоянного электрического тока и большое сопротивление для переменного тока. Это свойство индуктивности используется для разделения цепей переменного и постоянного токов. В технике электро-связи и радиосвязи используется множество различных фильтров нижних и верхних частот, схем дистанционного питания и т. д.

Катушка с ферромагнитным стальным сердечником используется в фильтрах блоков питания сетевых выпрямителей для сглаживания пульсаций переменного тока.

Катушка с проводом – источник ЭДС. При воздействии на катушку переменного магнитного поля в ней образуется переменный электрический ток. Это свойство катушки индуктивности используется в электрических генераторах постоянного и переменного тока (рисунок 2.61). В них идет преобразование механической энергии в электрическую.

Дизель-генераторные электростанции используют энергию сгорания дизельного топлива, тепловые электростанции (ТЭЦ) – энергию газа, угля и др., гидроэлектростанции (ГЭС) – энергию падающей воды, атомные электростанции (АЭС) – энергию деления атомного ядра.

Во всех циклах преобразования энергии конечным элементом является электрический генератор одно- или трехфазного переменного тока.

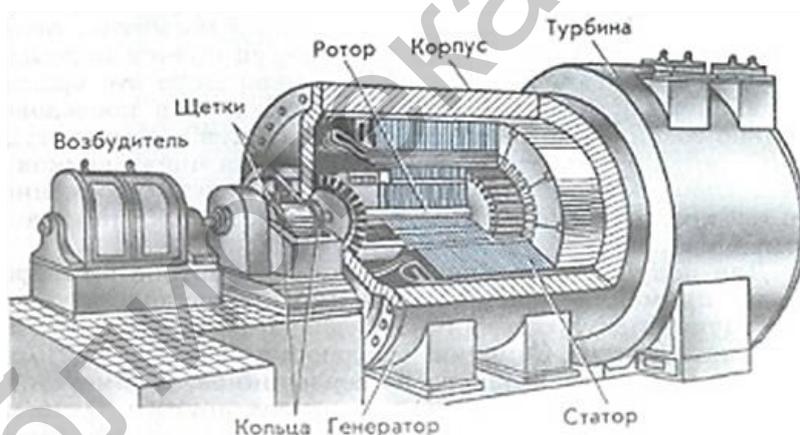


Рисунок 2.61 – Генератор переменного тока

Катушка индуктивности – трансформатор тока (рисунок 2.62). При протекании переменного тока через катушку вокруг нее образуется переменное магнитное поле, которое в свою очередь воздействует на соседнюю катушку (обмотку) и создает в ней переменный электрический ток.

В трансформаторах тока напряжения используются для преобразования переменного электрического напряжения и тока одной величины в напряжение и ток другой величины.

Трансформаторы служат также для согласования сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением источника (генератора) электрической энергии.

Трансформаторы используются во всех областях электротехники, радиотехники, электросвязи, автоматики и т. д.



Рисунок 2.62 – Трансформаторы тока

Катушка индуктивности – элемент колебательного контура (рисунок 2.63). Если объединить свойства конденсатора и индуктивности, то можно создать электромагнитный контур для получения синусоидальных колебаний переменного тока. В этом контуре заряд, накопленный в конденсаторе, передается в катушку и преобразуется в магнитное поле. Магнитное поле в свою очередь наводит ЭДС самоиндукции в катушке, которая и заряжает конденсатор. Процесс этот повторяется многократно, постепенно затухая из-за потерь в контуре.

Колебательные контуры бывают двух видов – параллельный и последовательный.

Колебательные контуры используются для получения незатухающих колебаний синусоидальной формы низкой (НЧ), высокой (ВЧ) и сверхвысокой (СВЧ) частот.

Электросвязь, радиотехника, автоматика, космическая связь – перечень применения колебательного контура в технике безграничен.

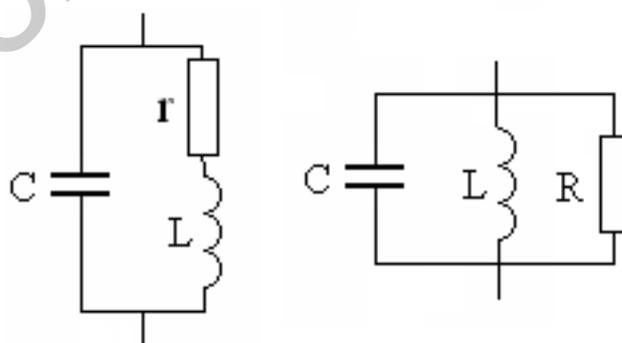


Рисунок 2.63 – Колебательный контур

Сокращения, используемые в зарубежном и отечественном производстве. Систем маркировки катушек индуктивности достаточно много и у каждого производителя она практически своя.

Маркировка катушек индуктивности осуществляется путем нанесения на их корпус основных параметров – значения индуктивности и допустимого отклонения индуктивности от номинального значения (рисунок 2.64).

Кодовая маркировка. При кодовой маркировке на корпус катушки индуктивности наносится цифровая или буквенно-цифровая маркировка. Номинальное значение индуктивности кодируется цифрами, после которых может приводиться или отсутствует буква, обозначающая величину допуска.



Рисунок 2.64 – Маркировка катушек индуктивности

При определении величины индуктивности следует знать:

- цифры обозначают значение индуктивности в микрогенри;
- если индуктивность обозначается в наногенри, то после цифр наносится буква N ($2N2 = 2,2 \text{ нГн}$);
- если величина индуктивности менее 1 мкГн или выражается дробным числом, измеряемым в микрогенри, то применяется разделительная буква R ($R_{47} = 0,47 \text{ мкГн}$; $1R_5 = 1,5 \text{ мкГн}$);
- при маркировке значений индуктивности от 10 мкГн после двухзначного числа проставляется множитель, указывающий на количество нулей ($150 = 15 \text{ мкГн}$; $151 = 150 \text{ мкГн}$; $122 = 1200 \text{ мкГн} = 1,2 \text{ мГн}$);
- способ кодовой маркировки применяется и для SMD-катушек индуктивности (дросселей);
- в отдельных случаях применяется другое обозначение индуктивности: индуктивность в микрогенри просто обозначается одно-, двух- или трехзначным числом без множителя или дробным числом ($560 = 560 \text{ мкГн}$; $3,3 = 3,3 \text{ мкГн}$).

Допуск катушек индуктивности обозначается одной из четырех букв: D – для допуска $\pm 0,3 \text{ нГн}$; J – $\pm 5 \%$; K – $\pm 10 \%$; M – $\pm 20 \%$ (или не наносится никакой буквы, что соответствует допуску $\pm 20 \%$).

Цветовая маркировка. В соответствии со стандартами IEC 82 для индуктивностей кодируется номинальное значение индуктивности и допуск, т. е.

допускаемое отклонение от указанного номинала. Наиболее часто применяется кодировка тремя или четырьмя цветными кольцами или точками. Первые две метки указывают на значение номинальной индуктивности в микрогенри (мкГн), третья метка – множитель, четвертая – допуск. В случае кодирования тремя метками подразумевается допуск 20 %. Цветное кольцо, обозначающее первую цифру номинала, может быть шире, чем все остальные. Рисунок 2.65 иллюстрирует цветовую маркировку индуктивностей.

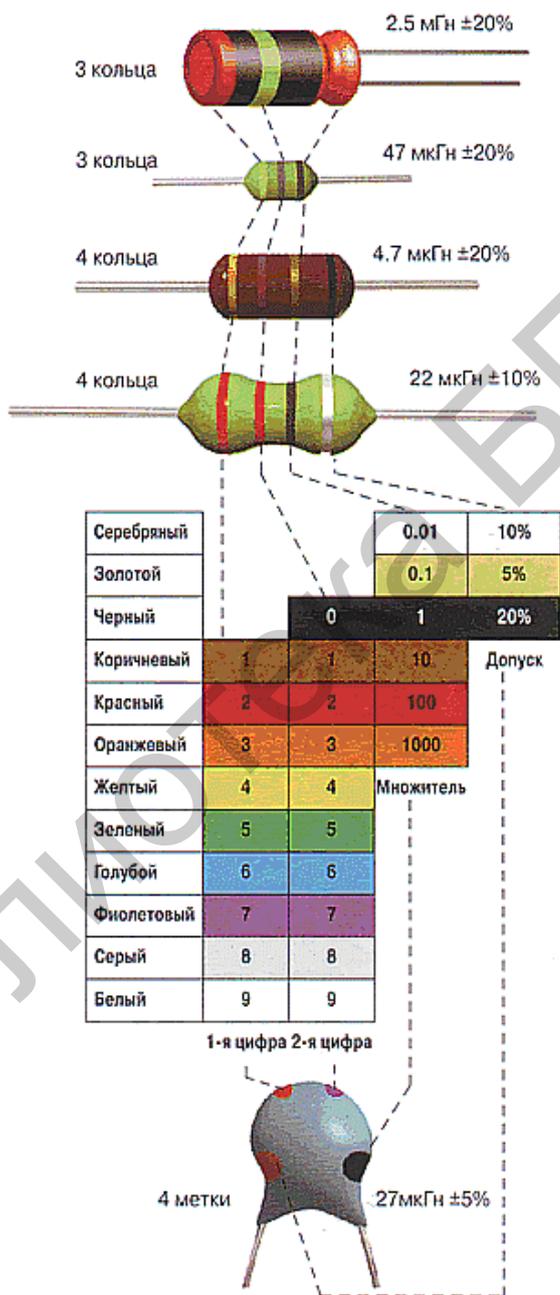


Рисунок 2.65 – Цветовая маркировка индуктивностей

Тема 2.4 Вспомогательные элементы

Электрический кабель – кабельное изделие, содержащее одну или более изолированных жил (проводников), заключенных в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься соответствующий защитный покров, в который может входить броня, и пригодное, в частности, для прокладки в земле и под водой (рисунок 2.66).



Рисунок 2.66 – Электрические кабели

Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии. Кабели выпускаются с медными и алюминиевыми токопроводящими жилами с изоляцией из бумажных лент, пропитанных маслом или специальными составами, а также изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, полиэтилена, сшитого полиэтилена, резины. Диапазон переменного напряжения, в котором используются силовые кабели, от 660 В до 500 кВ. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые или пластмассовые оболочки. На рисунке 2.67 представлен силовой кабель.



Рисунок 2.67 – Силовой кабель

Кабели связи (рисунок 2.68) предназначены для передачи сигналов связи и информации. Кабели имеют медные жилы и бумажную или пластмассовую изоляцию. В качестве пластмасс используются полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, полистирол. Изоляция может быть комбинированной: воздуш-

но-бумажной или воздушно-полиэтиленовой. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые, стальные, пластмассовые или металлопластмассовые оболочки.

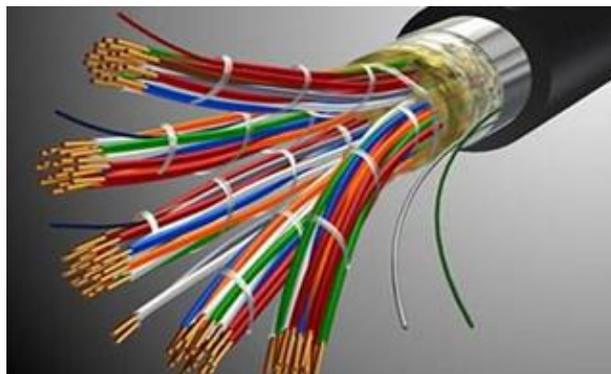


Рисунок 2.68 – Кабель связи

Кабели связи делятся на высокочастотные и низкочастотные. Высокочастотные кабели – это кабели дальней связи, низкочастотные – кабели местной связи (городские телефонные, внутрирайонные и т. п.).

Контрольные кабели предназначены для питания приборов, аппаратов и других электротехнических устройств и используются в цепях контроля. Контрольные кабели имеют токопроводящие жилы из меди, биметалла алюминий-медь, алюминия.

Изоляция в основном из полиэтилена и поливинилхлоридного пластика. Используется также резиновая изоляция. Число токопроводящих жил – от 4 до 37, диаметр сечения – от 0,75 до 10 мм².

Кабели управления предназначены для дистанционного управления и имеют медные жилы. В качестве изоляции используются полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, фторопласт, резина. Число токоведущих жил от 3 до 108. Все или отдельные токопроводящие жилы могут быть экранированными. Оболочки кабелей – пластмассовые. Поверх оболочки может накладываться панцирная броня из стальных проволок. Кабели управления могут иметь круглую или плоскую форму [12].

Кабели для передачи информации

Помимо электроэнергии кабели передают информационные сигналы. В последнее время появилось множество новых видов проводников информации. Большинство из них слишком специализировано и представляет интерес лишь для узкопрофильных специалистов. Для домашнего мастера достаточно знать и уметь пользоваться лишь несколькими видами, которые рассмотрены далее.

Антенные кабели. На сегодняшний день чаще всего используются RG-6, RG-59, RG-58 или российские аналоги серии РК75.

Кабели марок RG имеют множество разновидностей и отличаются друг от друга по некоторым характеристикам, например сопротивлению проводника, устойчивости к температурным и ударным нагрузкам, времени затухания сигнала, разновидности экрана и т. д. (рисунок 2.69).



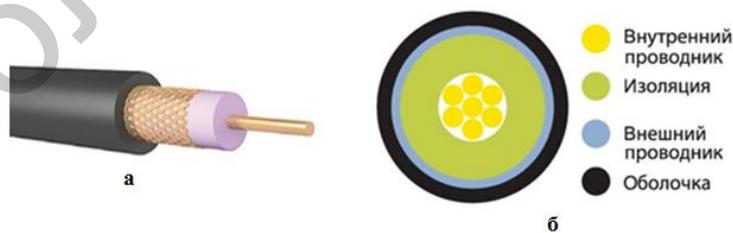
Рисунок 2.69 – Коаксиальный кабель с наконечником

RG-6 – коаксиальный кабель для передачи высокочастотных сигналов для электронной аппаратуры, телевидения или радио (рисунок 2.70). Состоит из центральной медной жилы сечением 1 мм², окружающей ее изоляции из вспененного полиэтилена, экрана из алюминиевой фольги, внешнего проводника из луженой медной оплетки и оболочки из ПВХ. Широко используется для передачи сигналов кабельного и спутникового телевидения. Имеет множество технических характеристик, касающихся частоты передающего сигнала, сопротивления, экранирования и т. д.



Рисунок 2.70 – Коаксиальный кабель RG-6

Число в названии кабеля РК75 (рисунок 2.71) означает, что сопротивление проводника – 75 Ом. Данная информация предназначена для специалистов. Вкратце можно сказать, что этот кабель идеально подходит для передачи видеосигнала от антенны или видеокамеры до приемника (телевизора) и разводки видеосигнала на несколько источников.



а – внешний вид; б – в разрезе

Рисунок 2.71 – Кабель РК75

Компьютерные кабели. Служат для построения компьютерных сетей. Кабель, при помощи которого компьютеры соединяются с Интернетом или друг с другом, – это известная всем специалистам *витая пара* (рисунок 2.72), состоящая из одной или нескольких пар проводов, перевитых попарно, что делается в целях улучшения приема или передачи сигнала.

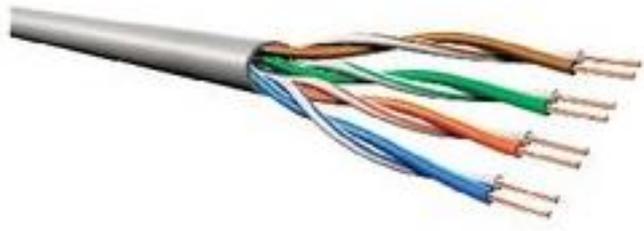


Рисунок 2.72 – Витая пара

Каждый проводник в данном кабеле заключен в изоляцию из ПВХ или пропилена. Внешняя оболочка также из ПВХ. Кабель может быть дополнительно оснащен влагонепроницаемой оболочкой из полипропилена.

В конструкции витой пары присутствует разрывная нить. При ее помощи с кабеля легко снимается внешняя оболочка, открывая доступ к токопроводящим жилам. В зависимости от вида кабеля возможны различные варианты защиты:

- UTP, или незащищенная, без общего экрана для пар проводов;
- FTP, или фольгированная, с экраном из алюминиевой фольги;
- STP, или защищенная, с общим экраном из медной сетки, к тому же каждая витая пара окружена отдельным экраном;
- S/FTP, или фольгированная, экранированная с общим экраном из фольги, каждая пара дополнительно заключена в экран (рисунок 2.73).



Рисунок 2.73 – Наконечник RJ-11 для подсоединения к компьютеру

Кроме того, витые пары разделяются на категории по количеству пар, объединенных в один кабель. Самый распространенный вид, применяемый для компьютерных сетей, – это категория CAT5e. Он состоит из четырех пар проводов различного цвета. Скорость передачи данных – до 1 Гб/с при использовании всех пар. Можно увидеть такой кабель, использующийся в качестве телефонного провода категории CAT1 или CAT2, т. е. состоящий из одной или двух пар проводов.

Провода

Электрический провод – кабельное изделие, содержащее одну или несколько скрученных проволок или одну или более изолированных жил, поверх которых в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься легкая неметаллическая оболочка, обмотка и (или) оплетка из волокнистых ма-

териалов или проволоки, и не предназначенное, как правило, для прокладки в земле (рисунок 2.74).



Рисунок 2.74 – Электрический провод

Монтажные провода используются для выполнения групповых соединений в различных схемах, т. е. для межблочного и внутриблочного монтажа аппаратуры.

Токопроводящие жилы – медные, в том числе с покрытиями из серебра, никеля и олова, изоляция – полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, фторопласты. Часть монтажных проводов выпускается с изоляцией на основе стекловолокна, волокон лавсана и капрона, наложенных методом обмотки, с поверхностным лаковым покрытием. Монтажные провода могут выполняться не только круглыми, но и плоскими.

Силовые (установочные) провода предназначены для распределения электрической энергии в силовых и осветительных сетях на открытом воздухе и внутри помещений, в том числе для скрытой прокладки под штукатуркой, для выводов электродвигателей и питания различной переносной аппаратуры и приборов (рисунок 2.75). Провода выпускаются одно- и многожильными (до 30 жил) и в основном рассчитаны на напряжения до 3 кВ.



Рисунок 2.75 – Силовой провод

Установочные провода изготавливаются с токопроводящими жилами из алюминия, меди и биметалла алюминий-медь. Изоляция – поливинилхлоридный пластикат, полиэтилен, резина, асбест, стекловолокно, резиностеклоткань. Диапазон сечений от 0,50 до 120 мм².

Обмоточные провода (рисунок 2.76) предназначаются для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Токопроводящие жилы изготавливаются из меди, алюминия, сплавов сопротивления (нихром, манганин,

константан). В качестве изоляции применяются эмалевые покрытия на основе синтетических лаков, пропитанное лаками волокно, натуральный шелк, синтетическая и хлопчатобумажная пряжа, пленки, бумага, пластмассы.



Рисунок 2.76 – Обмоточный провод

Маркировка проводов. Провода маркируют буквами, после которых цифрами записывают число и площадь сечения токопроводящих жил. При обозначении провода принята следующая структура. В центре ставится буква П, обозначающая провод, или ПП – плоский двух- или трехжильный провод. Перед буквами П или ПП может стоять буква А, обозначающая, что провод изготовлен из алюминиевых токопроводящих жил; если буквы А нет, то токопроводящие жилы изготовлены из меди.

Вслед за буквой П или ПП стоит буква, характеризующая материал, из которого выполнена изоляция провода: Р – резиновая, В – поливинилхлоридная и П – полиэтиленовая (АППР, ППВ и др.). Резиновая изоляция провода может быть защищена различными оболочками: В – из ПВХ пластиката, Н – негорючая хлорпреновая оболочка (найрит). Буквы В и Н ставят после букв материала изоляции провода – АПРН, ПРИ, ПРВД.

Если провод имеет оплетку из хлопчатобумажной пряжи, покрытой лаком, то это обозначается буквой Л, а если пряжа пропитана противогнилостным составом, то буква в марке провода опускается. Букву Л ставят на последнем месте в обозначении марки провода.

В проводах, имеющих гибких токоведущие жилы, в маркировке пишут букву Г, которая ставится после обозначения резиновой (Р) или перед обозначением поливинилхлоридной (В) изоляции (ПРГИ и др.). Одно- и многожильные провода, предназначенные для прокладки в стальных трубах и имеющие оплетку, пропитанную противогнилостным составом, имеют в конце марки буквы ГО (АПРГО, ПРГО).

Поливинилхлоридная оболочка проводов с резиновой изоляцией выполняется маслостойкой. Плоские провода в разделительном основании могут иметь перфорацию шириной отверстия до 4 мм и длиной до 20 мм. Расстояние между краями отверстий до 15 мм. Провода могут иметь метки, с помощью которых при монтаже легче различать жилы.

Для устройства тросовых проводок внутри и снаружи помещений, устройства ответвлений от воздушных линий в жилые дома и постройки выпускаются

специальные провода, имеющие несущий стальной трос, который расположен внутри провода, между его изолированными жилами. Тросовые провода выпускаются двух-, трех- и четырехжильными и имеют резиновую изоляцию или изоляцию из поливинилхлоридного пластика. Токпроводящие жилы провода имеют изоляцию черного, синего, коричневого и других цветов. Установочные провода предназначены для эксплуатации при температуре окружающей среды от -40 до $+50$ °С и относительной влажности (95 ± 3) % (при температуре $+20$ °С).

Элементы питания

Элемент питания – аккумулятор-гальванический элемент многоразового использования, в котором происходит накопление электрической энергии за счет превращения в химическую с целью дальнейшего использования после обратного преобразования из химической в электрическую (рисунок 2.77). Аккумуляторы состоят из положительного электрода – анода, отрицательного электрода – катода – и электролита.



Рисунок 2.77 – Элементы питания

Самый распространенный в наши дни свинцовый аккумулятор содержит две группы свинцовых пластин (два электрода), покрытых оксидом свинца, опущенных в электролит – разбавленную серную кислоту (рисунок 2.78). При подключении аккумулятора к источнику постоянного тока на электроде, присоединенном к аноду источника тока, из электролита выделяется кислород, который окисляет оксид свинца в пероксид свинца.



Рисунок 2.78 – Аккумулятор

На электроде, подключенном к катоду источника тока, выделяется водород, восстанавливающий оксид свинца в чистый свинец. Этот процесс называется зарядкой аккумулятора, на него расходуется электрическая энергия. Но она не исчезает бесследно, а переходит в химическую энергию, в результате между электродами образуется разность потенциалов. При разряде аккумулятора происходит обратный процесс: аккумулятор отдает запасенную электрическую энергию, а на пластинах электродах вновь образуется оксид свинца.

Пластины аккумулятора не обязательно делать из свинца. Широко применяются такие пары химически различных металлов, как кадмий и никель, железо и никель, серебро и цинк. Отличаются аккумуляторы и составом электролита, например, используется не кислота, а щелочь.

Аккумуляторы и аккумуляторные батареи применяют в качестве автономных источников электроэнергии на транспорте, в навигационных приборах, космических аппаратах, радиоэлектронной аппаратуре, бытовых и медицинских приборах и др.

Поскольку для питания приборов чаще всего требуется напряжение, большее того, что обеспечивает один элемент или аккумулятор, их соединяют в батарею. Буквенный код в этом случае – GB. Батарею обозначают упрощенно: изображают только крайние элементы, а наличие остальных показывают штриховой линией (GB1). ГОСТ допускает изображать батарею и совсем просто – символом одного элемента (GB2). Рядом с позиционным обозначением в любом случае указывают напряжение батареи (рисунок 2.79).

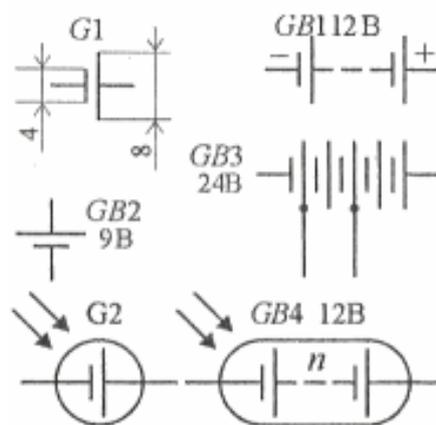


Рисунок 2.79 – Обозначение элементов питания

Отводы от части элементов показывают линиями электрической связи, продолжающимися черточками, которые обозначают их положительные полюсы (GB3). В местах присоединения линий-отводов к символам положительных полюсов ставят точки.

На основе символа электрохимического элемента строятся УГО так называемых солнечных фотоэлементов и батарей. Отличительные признаки УГО этих источников тока – корпус в виде кружка или овала и знак фотоэлектрического эффекта (G2, GB4). На месте буквы п в УГО солнечной батареи можно указывать число образующих ее элементов.

Пьезоэлектрические элементы

Пьезоэлектрический эффект (ПЭЭ) был открыт в 1880 году Жаком Джексом и Пьером Кюри. Они заметили, что в некоторых кристаллах при механическом воздействии на них появляется электрическая поляризация, причем степень ее пропорциональна величине воздействия. Позже Кюри открыл инверсионный пьезоэлектрический эффект деформирования материалов, помещенных в электрическое поле. Эти явления еще называют прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом (рисунок 2.80).

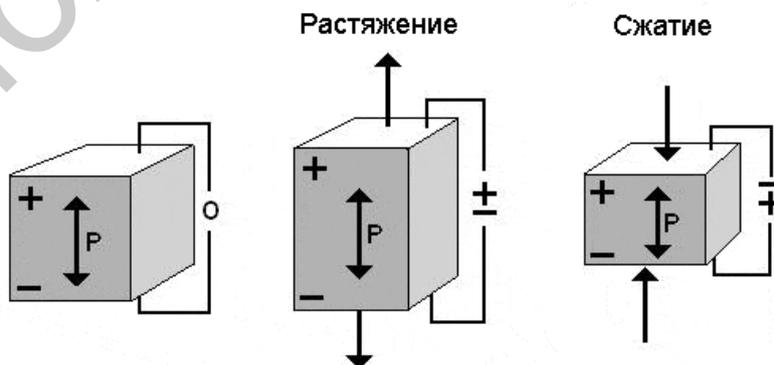


Рисунок 2.80 – Пьезоэлектрический эффект

Классификация пьезокерамических элементов (ПКЭ)

ПКЭ можно классифицировать по трем основным признакам:

- геометрическая форма;
- взаимная ориентация возбуждающего электрического поля и возникающего колебательного смещения;
- отношение резонансного размера ПКЭ к другим размерам.

Геометрическая форма и соотношение размеров выбирают из условия возникновения одномерных линейных колебаний.

По геометрической форме различают две основные группы ПКЭ:

- прямоугольные параллелепипеды;
- тела вращения.

Прочие ПКЭ относят к элементам специальной формы: трапецеидальные стержни, треугольные пластины и др.

Все изделия, изготовленные на базе пьезокерамики, подразделяют на следующие основные группы: генераторы, датчики (сенсоры), актюаторы (пьезоприводы), преобразователи и комбинированные системы [13].

Пьезокерамические генераторы. Преобразуют механическое воздействие в электрический потенциал, используя прямой пьезоэффект. Примерами могут служить искровые воспламенители нажимного и ударного типов, применяемые в разного рода зажигалках и поджигающих системах, а также твердотельные батареи на основе многослойной пьезокерамики, применяемые в современных электронных схемах.

Пьезокерамические датчики. Преобразуют механическую силу или движение в пропорциональный электрический сигнал, т. е. также основаны на прямом пьезоэффекте.

В условиях активного внедрения компьютерной техники датчики являются незаменимыми устройствами, позволяющими согласовывать механические системы с электронными системами контроля и управления.

Выделяются два основных типа пьезокерамических датчиков: осевые (механическая сила действует вдоль оси поляризации, мода d_{33}) и гибкие (сила действует перпендикулярно оси поляризации; мода d_{31}).

В осевых датчиках в качестве пьезоэлементов используют диски, кольца, цилиндры и пластины. В качестве примеров можно привести датчики ускорения (акселерометры), давления, детонации, разрушения и т. п.

Гибкие датчики строятся на основе последовательных (слои керамики имеют противоположную направленность поляризации) и параллельных (направленность поляризации слоев совпадает) пьезокерамических биморфов. Наиболее распространены датчики силы и ускорения.

Пьезокерамические актюаторы (пьезоприводы). Актюаторы строятся на принципе обратного пьезоэффекта и поэтому предназначены для преобразования электрических величин (напряжения или заряда) в механическое перемещение (сдвиг) рабочего тела.

Актюаторы подразделяются на три основные группы: осевые (мода d_{33}), поперечные (мода d_{31}) и гибкие (мода d_{31}). Осевые и поперечные актюаторы имеют

еще общее название – многослойные пакетные, так как набираются из нескольких пьезоэлементов (дисков, стержней, пластин или брусков) в пакет. Они могут развивать значительное усилие (блокирующую силу) до 10 кН при управляющем напряжении 1 кВ, но при очень малых отклонениях рабочей части (от единиц нанометров до сотен микрон). Такие актюаторы также называют мощными.

Гибкие актюаторы (биморфы) развивают незначительную блокирующую силу при малых (сотни микрон) отклонениях рабочей части. Однако американской компании APC International Inc. удалось создать новый тип пластинчатого биморфа – «ленточный актюатор» (зарегистрированная торговая марка – и выйти с ним на рынок. Ленточный актюатор может обеспечивать блокирующую силу 0,95 Н и величину отклонения 1,2 мм или отклонение до 3 мм и блокирующую силу 0,6 Н.

Гибкие актюаторы относятся к группе маломощных. К этой же группе будут относиться и перспективные осевые актюаторы, представляющие собой моноблок, изготовленный по технологии многослойной пьезокерамики.

Пакетные актюаторы могут производиться предприятиями, не связанными с производством пьезокерамики. Гибкие же и осевые актюаторы из многослойной керамики сами по себе являются пьезокерамическими элементами. Их могут производить только предприятия, владеющие технологиями и оборудованием для производства пьезокерамических элементов.

Пьезокерамические преобразователи. Предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Так же как и актюаторы, основываются на принципе обратного пьезоэффекта.

Преобразователи в зависимости от диапазона частот подразделяются на три вида: звуковые (ниже 20 кГц) – зуммеры, телефонные микрофоны, высокочастотные громкоговорители, сирены и т. п.; ультразвуковые – высокоинтенсивные излучатели для сварки и резки, мойки и очистки материалов, датчики уровня жидкостей, дисперсионные распылители, генераторы тумана, ингаляторы, увлажнители воздуха.

Комбинированные пьезокерамические системы. Такие системы преобразуют неэлектрические величины в электрические, при последовательном использовании обратного и прямого пьезоэффектов. В качестве примеров таких систем можно привести эхолоты, измерители потоков, пьезотрансформаторы, «искатель ключа».

Простейший пьезоэлемент представлен на рисунке 2.81.

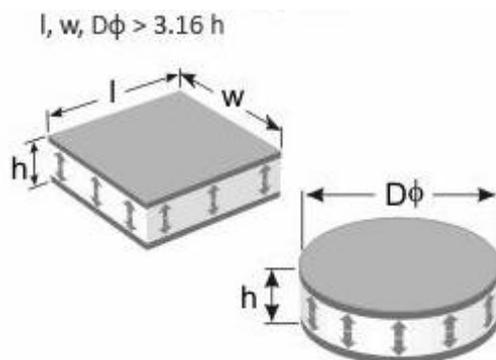
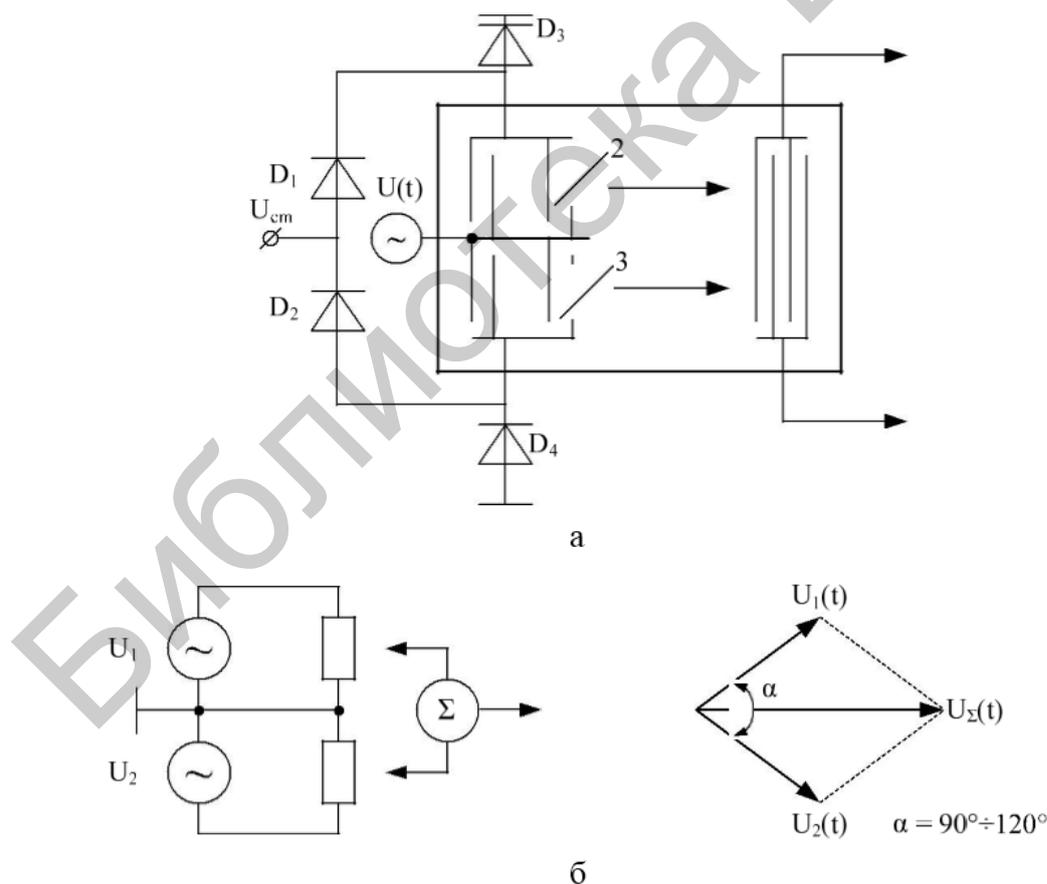


Рисунок 2.81 – Простейший пьезоэлемент

Линии задержки. Элементы на ПАВ

Устройства на поверхностно-активных веществах (ПАВ) нашли широкое применение в радиотехнике, особенно в радиолокации, технике связи, телевидении. Первыми элементами с использованием ПАВ были линии задержки (ЛЗ). Они оказались более технологичными, чем объемно-волновые ЛЗ. На основе многоотводных ЛЗ (МЛЗ) изготавливаются фильтры сжатия фазомодулированных (ФМ) сигналов с коэффициентом сжатия более 1000. С развитием конструктивных решений и новых материалов появились различные фильтры ПАВ: согласованные фильтры для приема ЧМ-сигналов, полосовые фильтры, дискриминаторы, селекторы каналов в связной аппаратуре, генераторы на ПАВ, работающие на частотах до тысячи мегагерцев (2 ГГц на подложке из алмаза), резонаторы, усилители, корреляторы, фазовращатели, всевозможные датчики, волноводы и т. д. Устройства на ПАВ в состоянии не только эффективно выполнять отдельные уникальные операции по обработке сигналов, но и служить основой для многофункциональных подсистем: согласованной фильтрации, обработки сигналов в реальном масштабе времени, Фурье-процессоров, конвольверов и т. д.

Фазовращатели на ПАВ. На рисунке 2.82 приведена схема фазовращателя на ПАВ.

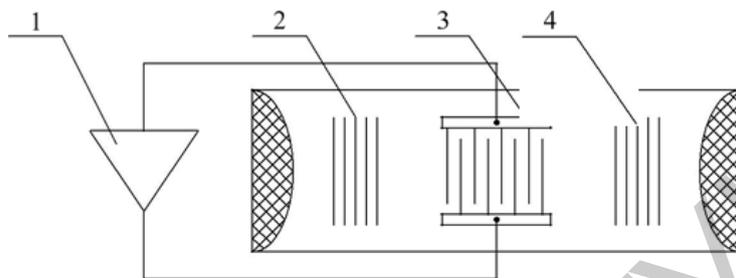


а – двухотводная ЛЗ: 2, 3 – входные встречно-штыревые преобразователи (ВШП);
б – векторная диаграмма напряжений

Рисунок 2.82 – Схема фазовращателя на ПАВ

Это двухпроводная ЛЗ. Входные ВШП 2, 3 состоят из двух секций со сдвигом на $1/4\lambda$. Диоды D1 и D2 играют роль управляемых сопротивлений, изменяющих (перераспределяющих) мощность волны ПАВ на ВШП 2, 3, что в конечном итоге приводит к повороту сигнала на выходном ВШП.

Генераторы на ПАВ. На рисунке 2.83 приведена схема генератора с ПАВ-резонатором.



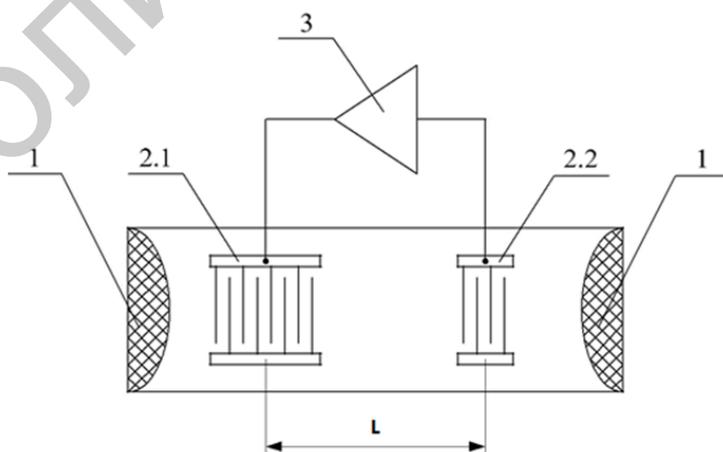
1 – усилитель; 2, 4 – отражательные структуры; 3 – ВШП ПАВ

Рисунок 2.83 – Генератор с ПАВ-резонатором

Усилитель 1 включен между разнополярными шинами ВШП 3. Одно-входовой ПАВ-резонатор является стабилизирующим элементом в цепи обратной связи усилителя.

Многочисленные переотражения акустической волны от структур 2 и 4 вызывают возрастание эффективной добротности ПАВ-резонатора (до $3 \cdot 10^4$), что приводит к повышению стабильности генератора с перекрытием по частям до $3 \cdot 10^3$ МГц.

Существуют варианты схем генераторов, в которых в качестве стабилизирующих элементов используют ЛЗ на ПАВ (рисунке 2.84).



1 – поглотители; 2.1, 2.2 – ВШП (входной и выходной соответственно);
3 – усилитель; 4 – звукопровод ЛЗ

Рисунок 2.84 – Схема генератора с ЛЗ на ПАВ

Электроустановочные изделия – это группа приспособлений для управления электрическими приборами. К ним относят выключатели, розетки, терморегуляторы, вилки, различные удлинители и датчики, а также глобальные системы управления и генераторы. Несмотря на то что электроустановочные изделия – прежде всего функциональные элементы, они жестко вписаны в интерьер, поэтому при выборе следует учитывать и их дизайн. Стоимость современных изделий для электроустановки может различаться в несколько раз в зависимости от производителя, материала и дизайна. Наиболее дешевыми моделями считаются отечественные и китайские изделия, к самым дорогим относятся европейские модели из высокотехнологичного пластика или алюминия с декоративной отделкой.

Электроустановочные изделия подразделяются в зависимости от конструкции на открытые и скрытые. Для установки скрытых предметов требуется наличие выемки, ниши или специального проводного канала в «теле» стены. Открытые элементы устанавливаются на поверхности и зачастую дополняются специальными коробами и чехлами. Также электроустановочные изделия различаются по назначению: модели для сухих помещений, для внешнего (уличного) использования и для влажных помещений.

Библиотека БГУИР

Раздел 3

Активные элементы радиоэлектронных устройств

Тема 3.1 Диоды

Диодами называют двухэлектродные элементы электрической цепи, обладающие односторонней проводимостью тока. В полупроводниковых диодах односторонняя проводимость обуславливается применением полупроводниковой структуры, сочетающей в себе два слоя, один из которых обладает дырочной (p), а другой – электронной (n) электропроводностью.

Полупроводниковый диод представляет собой прибор с двумя выводами и одним электронно-дырочным переходом [14].

Назначение и область применения. Назначение и применение полупроводниковых диодов в современной технике достаточно разнообразно и зависит от вида конкретного диода. Основные виды диодов: выпрямительные, высокочастотные, туннельные, варикапы, стабилитроны.

Выпрямительные диоды – полупроводниковые диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока. Основной характеристикой такого диода является коэффициент выпрямления, равный отношению прямого и обратного токов при одном и том же напряжении. Чем выше коэффициент выпрямления, тем меньше потери и выше КПД выпрямителя.

Высокочастотные диоды (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) – диоды, предназначенные для работы в устройствах высокой и сверхвысокой частоты. Они используются для модуляции и детектирования сверхвысокочастотных колебаний в диапазоне сотен мегагерцев. В качестве высокочастотных обычно применяют точечные диоды, емкость электронно-дырочного перехода в которых составляет сотые и десятые доли пикофарад.

Варикапы – это диоды, работа которых основана на изменении емкости электронно-дырочного перехода в зависимости от прикладываемого обратного напряжения. Эти диоды применяются в качестве конденсаторов с управляемой емкостью.

Стабилитроны – это диоды, применяемые для стабилизации напряжения. В этих диодах используется наличие у диода критического обратного напряжения, при котором наступает электрический пробой.

Туннельные диоды – диоды, в которых при больших концентрациях легирующих примесей заметно усиливается туннельный эффект p-n-перехода. При этом в ВАХ диода появляется участок с отрицательным сопротивлением, что позволяет использовать его в схемах генерации и усиления электрических колебаний.

Классификация и условные обозначения полупроводниковых диодов

Классификация диодов производится по следующим признакам:

1. По конструкции:
 - плоскостные;

- точечные;
 - микросплавные.
2. По мощности:
 - маломощные;
 - средней мощности;
 - мощные.
 3. По частоте:
 - низкочастотные;
 - высокочастотные;
 - СВЧ.
 4. По функциональному назначению:
 - выпрямительные;
 - импульсные;
 - стабилитроны;
 - варикапы;
 - светодиоды;
 - тоннельные.
 5. По условному обозначению:
 - с маркировкой (рисунок 3.1);
 - с условным графическим обозначением – обозначение на принципиальных электрических схемах (рисунок 3.2).

К	С	-156	А
Г	Д	-507	Б
I	II	III	IV

Рисунок 3.1 – Маркировка диодов

Обозначения маркировки:

I – *показывает материал полупроводника:*

Г (1) – германий; К (2) – кремний; А (3) – арсенид галлия; И (4) – соединения индия.

II – *тип полупроводникового диода:*

Д – выпрямительные, ВЧ и импульсные диоды;

А – диоды СВЧ;

С – стабилитроны;

В – варикапы;

И – туннельные диоды;

Ф – фотодиоды;

Л – светодиоды;

Ц – выпрямительные столбы и блоки.

III – *три цифры – группа диодов по своим электрическим параметрам.*

IV – *модификация диодов в данной (третьей) группе.*



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

Рисунок 3.2 – Условные графические обозначения

Общий принцип действия. В полупроводнике n-типа основными носителями свободного заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ($n_n \gg n_p$). В полупроводнике p-типа основными носителями являются дырки ($n_p \gg n_n$). При контакте двух полупроводников n- и p-типов начинается процесс диффузии: дырки из p-области переходят в n-область, а электроны, наоборот, из n-области в p-область. В результате в n-области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В p-области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу (рисунок 3.3). Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости (так называемый запирающий слой) обычно достигает толщины порядка десятков и сотен межатомных расстояний. Объемные заряды этого слоя создают между p- и n-областями запирающее напряжение U_z , приблизительно равное 0,35 В для германиевых n-p-переходов и 0,6 В для кремниевых.

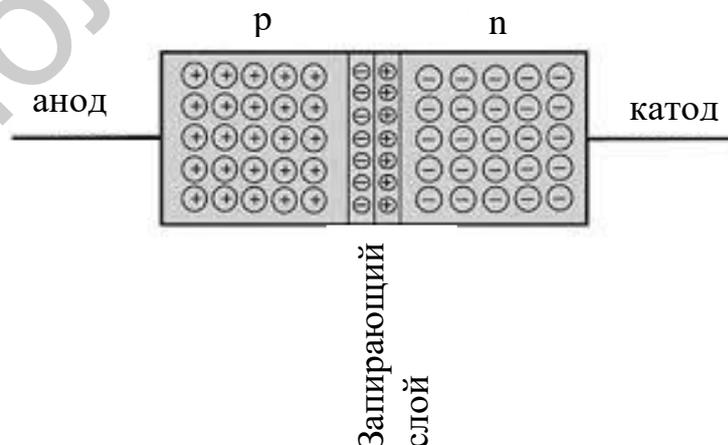


Рисунок 3.3 – Образование запирающего слоя при контакте полупроводников p- и n-типов

Типы корпусов. Диоды выпускаются в различных корпусах. Причем разновидностей корпусов настолько много, что нет никакой возможности полностью привести их в данном учебно-методическом пособии. Только стандартизованных отечественных корпусов диодов для навесного монтажа насчитывается более ста типов, но кроме них выпускаются еще диоды для поверхностного монтажа, а также специальные силовые диоды. То же можно сказать и о диодах зарубежных производителей. Поэтому здесь показаны лишь некоторые типы корпусов диодов для навесного (рисунок 3.4) и для поверхностного (SMD) монтажа (рисунок 3.5).

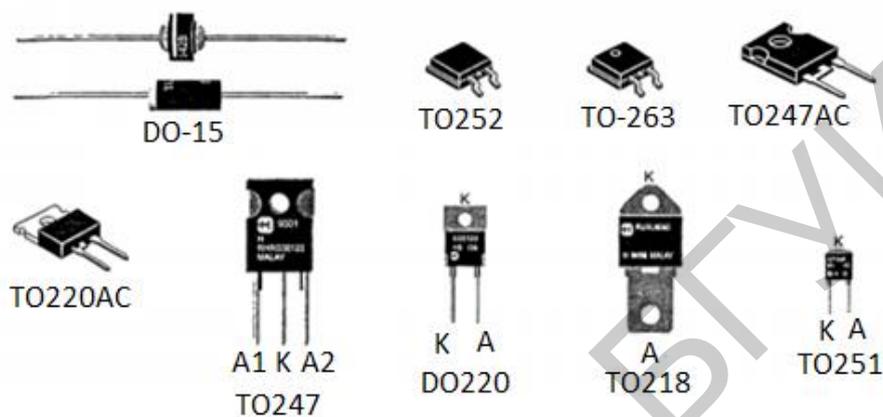


Рисунок 3.4 – Диоды навесного монтажа

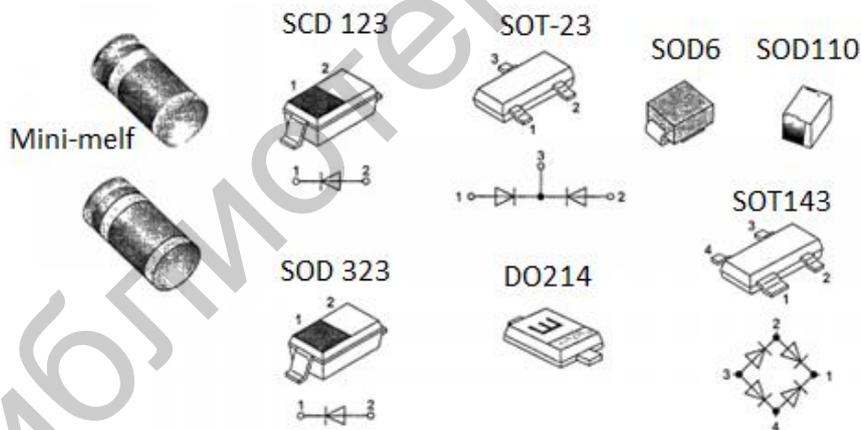


Рисунок 3.5 – Диоды поверхностного монтажа

Конструкция полупроводниковых диодов. Основой плоскостных и точечных диодов является кристалл полупроводника n-типа проводимости, который называется базой транзистора. База припаивается к металлической пластинке, которая называется кристаллодержателем (рисунок 3.6).

Для *плоскостного диода* на базу накладывается материал акцепторной примеси и в вакуумной печи при высокой температуре (порядка 500 °С) происходит диффузия акцепторной примеси в базу диода, в результате чего образуется область p-типа проводимости и p-n переход большой плоскости (отсюда

название). Вывод от p-области называется анодом, а вывод от n-области – катодом.

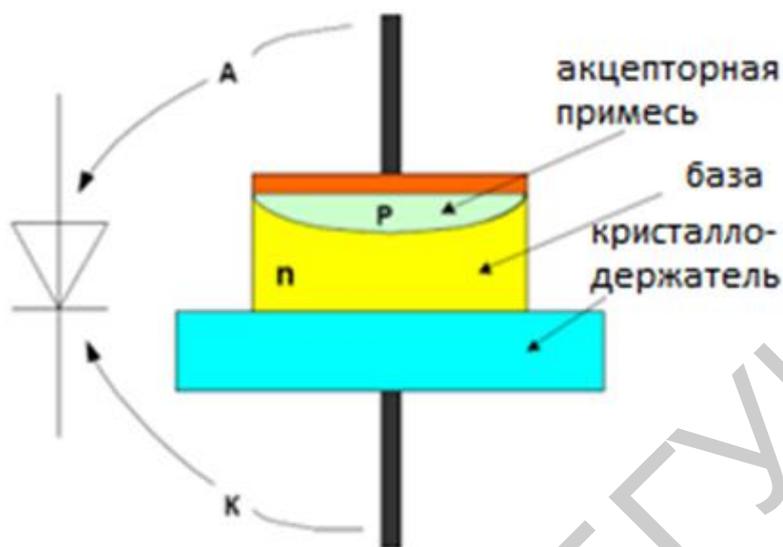


Рисунок 3.6 – Конструкция плоскостного диода

Большая плоскость p-n-перехода плоскостных диодов позволяет им работать при больших прямых токах, но за счет большой барьерной емкости они будут низкочастотными.

Точечные диоды. К базе точечного диода подводят вольфрамовую проволоку, легированную атомами акцепторной примеси, и через нее пропускают импульсы тока силой до 1 А. В точке разогрева атомы акцепторной примеси переходят в базу, образуя p-область (рисунки 3.7, 3.8). Получается p-n-переход очень малой площади. За счет этого точечные диоды будут высокочастотными, но могут работать лишь на малых прямых токах (десятки миллиампер).

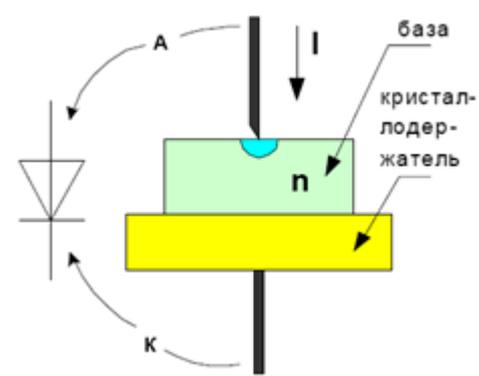


Рисунок 3.7 – Строение точечного диода

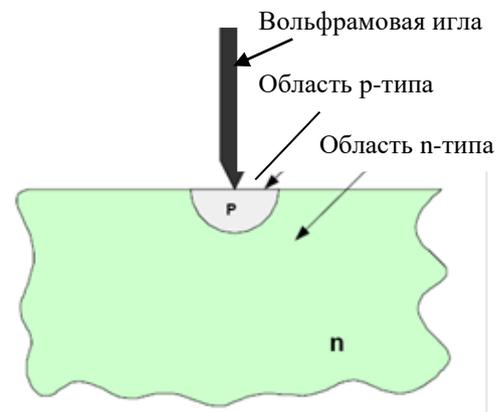


Рисунок 3.8 – Строение базы точечного диода

Микросплавные диоды. Их получают путем сплавления микрокристаллов полупроводников р- и n-типа проводимости. По своему характеру микросплавные диоды будут плоскостные, а по своим параметрам – точечные.

Изготовление диодов. В точечном диоде используется пластинка германия или кремния с электропроводностью n-типа, толщиной 0,1–0,6 мм и площадью 0,5–1,5 мм²; с пластинкой соприкасается заостренная проволочка (игла) с нанесенной на нее примесью. При этом из иглы в основной полупроводник диффундируют примеси, которые создают область с другим типом электропроводности. Таким образом, около иглы образуется миниатюрный р-n-переход полусферической формы.

Для изготовления германиевых точечных диодов к пластинке германия приваривают проволочку из вольфрама, покрытого индием. Индий является для германия акцептором. Полученная область германия р-типа является эмиттерной.

Для изготовления кремниевых точечных диодов используется кремний n-типа и проволочка, покрытая алюминием, который служит акцептором для кремния.

В плоскостных диодах р-n-переход образуется двумя полупроводниками с различными типами электропроводности, причем площадь перехода у различных типов диодов лежит в пределах от сотых долей квадратного миллиметра до нескольких десятков квадратных сантиметров (силовые диоды).

Плоскостные диоды изготавливаются методом сплавления (вплавления) или диффузии.

В пластинку германия n-типа вплавляют при температуре около 500 °С каплю индия, которая, сплавляясь с германием, образует слой германия р-типа. Область с электропроводностью р-типа имеет более высокую концентрацию примеси, чем основная пластинка, и поэтому является эмиттером. К основной пластинке германия и к индию припаивают выводные проволочки, обычно из никеля. Если за исходный материал взят германий р-типа, то в него вплавляют сурьму и тогда получается эмиттерная область n-типа.

Диффузионный метод изготовления р-n-перехода основан на том, что атомы примеси диффундируют в основной полупроводник. Для создания р-слоя исполь-

зуют диффузию акцепторного элемента (бора или алюминия для кремния, индия для германия) через поверхность исходного материала.

Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводниковых диодов. Вольт-амперная характеристика реального диода проходит ниже, чем у идеального р-п-перехода: сказывается влияние сопротивления базы (рисунок 3.9). После точки А вольт-амперная характеристика будет представлять собой прямую линию, так как при напряжении U_a потенциальный барьер полностью компенсируется внешним полем. Кривая обратного тока ВАХ имеет наклон, так как за счет возрастания обратного напряжения увеличивается генерация собственных носителей заряда (рисунок 3.10).

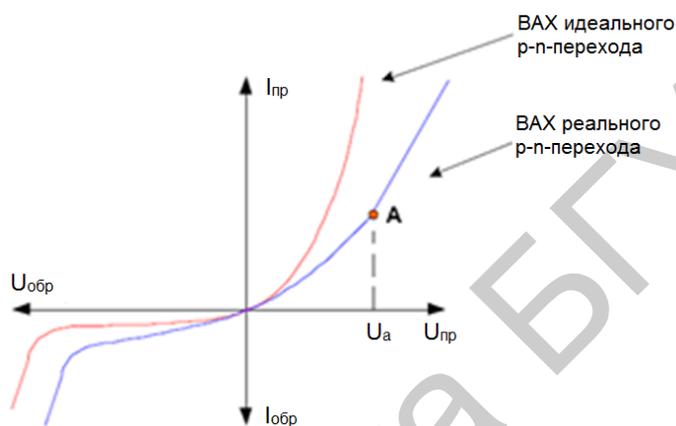


Рисунок 3.9 – Идеальная вольт-амперная характеристика

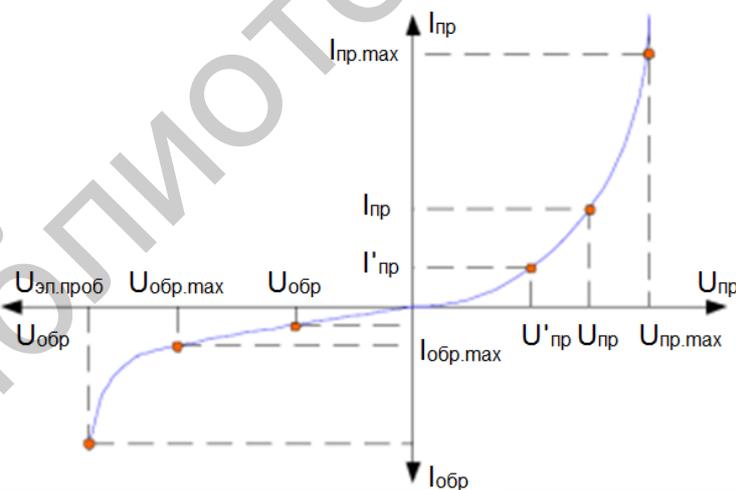


Рисунок 3.10 – Реальная вольт-амперная характеристика

Здесь $I_{пр.макс}$ – максимально допустимый прямой ток, А;

$U_{пр.макс}$ – прямое падение напряжения на диоде при максимальном прямом токе, В;

$U_{эл.проб}$ – максимально допустимое обратное напряжение, В;

$I_{обр.макс}$ – обратный ток при максимально допустимом обратном напряжении, А.

Прямое и обратное статическое сопротивление диода при заданных прямом и обратном напряжениях:

$$R_{ст.пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} \quad (3.1)$$

$$R_{ст.обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}} \quad (3.2)$$

Прямое и обратное динамическое сопротивление диода:

$$R_{инр} = \frac{\Delta U_{нр}}{\Delta I_{нр}} \quad (3.3)$$

$$R_{инр} = \frac{U_{нр} - U'_{нр}}{I_{нр} - I'_{нр}} ; R_{иобр} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}} ; R_{иобр} = \frac{U_{обр} - U'_{обр}}{I_{обр} - I'_{обр}} \quad (3.4)$$

Выпрямительные диоды. Выпрямительным диодом называется полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный в силовых цепях, т. е. в источниках питания. Выпрямительные диоды всегда плоскостные, они могут быть германиевые или кремниевые. Германиевые диоды лучше кремниевых тем, что имеют меньшее прямое падение напряжения. Кремниевые диоды превосходят германиевые по диапазону рабочих температур и максимально допустимому обратному напряжению, а также имеют меньший обратный ток.

Если выпрямленный ток больше максимально допустимого прямого тока диода, то в этом случае допускается параллельное включение диодов (рисунок 3.11).

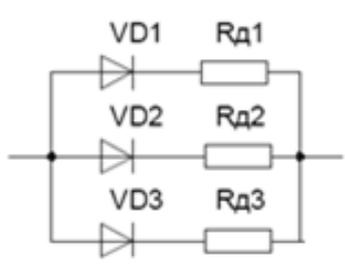


Рисунок 3.11 – Схема параллельного включения диодов

Добавочные сопротивления R_d величиной от единиц до 10 Ом включаются с целью выравнивания токов в каждой из ветвей.

Если напряжение в цепи превосходит максимально допустимое обратное напряжение диода, то в этом случае допускается последовательное включение диодов (рисунок 3.12).

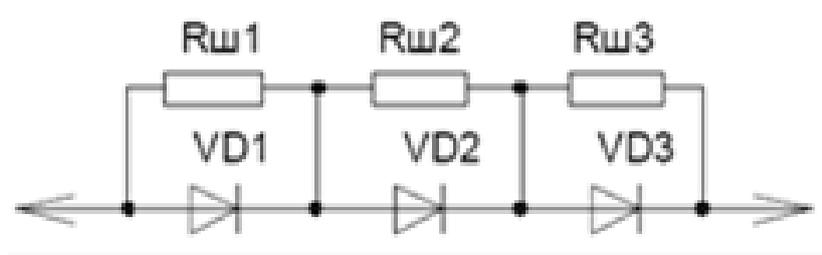


Рисунок 3.12 – Схема последовательного включения диодов

Шунтирующие сопротивления величиной несколько сот килоом включают для выравнивания падения напряжения на каждом из диодов.

Стабилитроны. Стабилитроном называется полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации уровня постоянного напряжения. Стабилизация – поддержание какого-то уровня неизменным. По конструкции стабилитроны всегда плоскостные и кремниевые. Принцип действия стабилитрона основан на том, что на его вольт-амперной характеристике имеется участок, на котором напряжение практически не зависит от величины протекающего тока (рисунок 3.13).

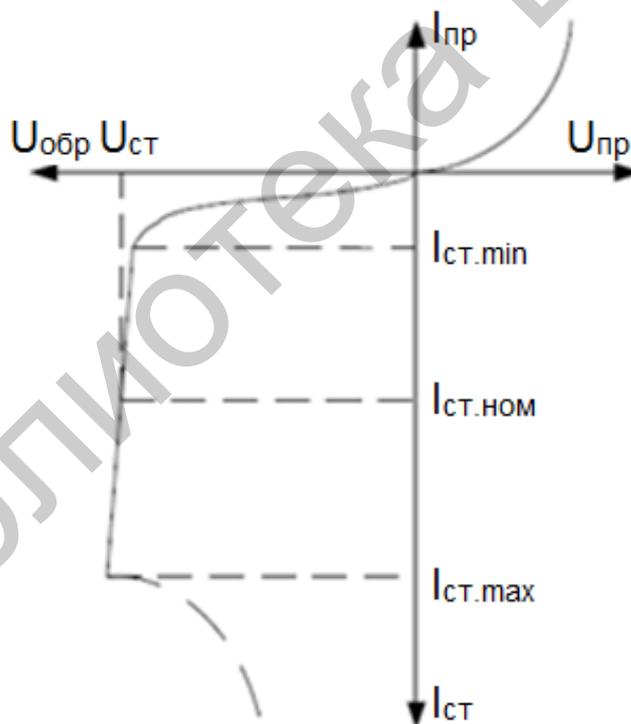


Рисунок 3.13 – Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Таким участком является участок электрического пробоя, а за счет легирующих добавок в полупроводник ток электрического пробоя может изменяться в широком диапазоне, не переходя в тепловой пробой.

Так как участок электрического пробоя – это обратное напряжение, то стабилитрон включается обратным включением (рисунок 3.14).

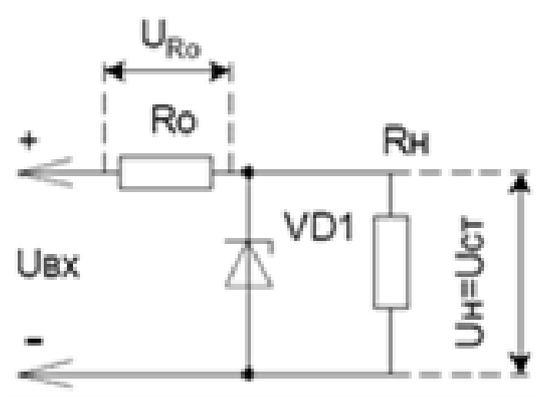


Рисунок 3.14 – Схема обратного включения диода

Резистор R_0 задает ток через стабилитрон таким образом, чтобы величина тока была близка к среднему значению между $I_{ст.мин}$ и $I_{ст.мах}$. Такое значение тока называется номинальным током стабилизации.

Принцип действия стабилитронов. При уменьшении входного напряжения ток через стабилитрон и падение напряжения на R_0 может уменьшаться, а напряжения на стабилитроне и на нагрузке останутся постоянными, исходя из вольт-амперной характеристики (рисунок 3.15). При увеличении входного напряжения ток через стабилитрон и UR_0 увеличивается, а напряжение на нагрузке все равно остается постоянным и равным напряжению стабилизации.

Следовательно, стабилитрон поддерживает постоянство напряжения при изменении тока через него от $I_{ст.мин}$ до $I_{ст.мах}$.

Основные параметры стабилитронов:

$U_{ст}$ – напряжение стабилизации, В;

$I_{ст.мин}$, $I_{ст.мах}$, $I_{ст.ном}$ – минимальное, максимальное и номинальное значение тока стабилизации, А;

$\Delta U_{ст}$ – изменение напряжения стабилизации, В.

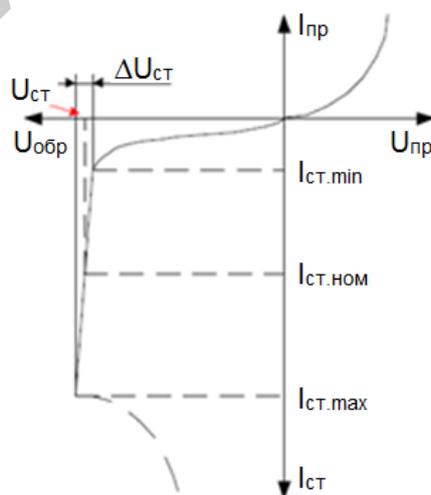


Рисунок 3.15 – Вольт-амперная характеристика

Дифференциальное сопротивление на участке стабилизации:

$$R_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст.маx}} - I_{\text{ст.мин}}} . \quad (3.5)$$

Температурный коэффициент стабилизации:

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}} \cdot \Delta t} \cdot 100 \% , \quad (3.6)$$

$$U_{\text{стt}} = U_{\text{стt}'} - U_{\text{ст}} , \quad (3.7)$$

$$\Delta t = t_2^0 - t_1^0 . \quad (3.8)$$

Стабилитроны, предназначенные для стабилизации малых напряжений, называются *стабисторами*.

Стабисторы служат для стабилизации напряжения менее 3 В, и у них используется прямая ветвь ВАХ (рисунок 3.16). Применяются стабисторы в прямом включении.

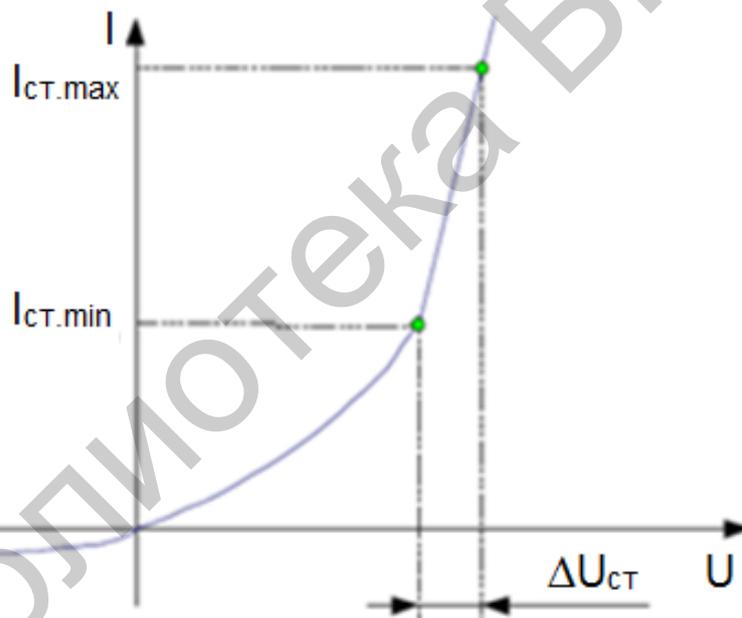


Рисунок 3.16 – Вольт-амперная характеристика стабистора

Варикапы. Варикапом называется полупроводниковый диод, у которого в качестве основного параметра используется барьерная емкость, величина которой варьируется при изменении обратного напряжения. Следовательно, варикап применяется как конденсатор переменной емкости, управляемый напряжением.

Принцип действия варикапов. Если к р-п-переходу приложить обратное напряжение, то ширина потенциального барьера увеличивается (рисунок 3.17).

$$C_б = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{p-n}}{\Delta X} . \quad (3.9)$$

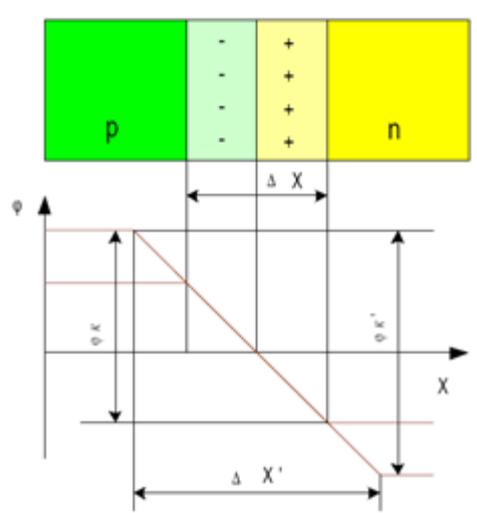


Рисунок 3.17 – Принцип действия варикапа

При подключении обратного напряжения ширина перехода ΔX увеличивается, следовательно, барьерная емкость будет уменьшаться. Основной характеристикой варикапов является вольт-фарадная характеристика $C=f(U_{обр})$ (рисунок 3.18).

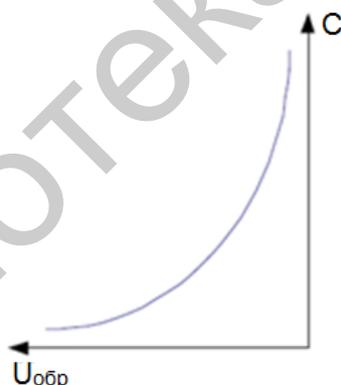


Рисунок 3.18 – Вольт-фарадная характеристика

Основные параметры варикапов:

- максимальное, минимальное и номинальное значение емкости;
- коэффициент перекрытия:

$$k = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} ; \quad (3.10)$$

- отношение максимальной емкости к минимальной;
- максимальное рабочее напряжение варикапа.

Эффекты полупроводника

Туннельный эффект. Туннельный эффект (открыт в 1958 году в Японии) проявляется на р-п-переходе в вырожденных полупроводниках.

Вырожденный полупроводник – это полупроводник с очень высокой концентрацией донорной или акцепторной примеси (концентрация – 10²⁴ атомов примеси на 1 см³ полупроводника).

В вырожденных полупроводниках очень тонкий р-п-переход: его ширина составляет сотые доли микрона, а напряженность внутреннего поля составляет $E_{p-n} \approx 108$ В/м, что обеспечивает очень высокий потенциальный барьер. Основные носители заряда не могут преодолеть этот потенциальный барьер, но за счет малой его ширины как бы механически пробивают в нем туннели, через которые проходят другие носители зарядов. Следовательно, свойство односторонней проводимости на р-п-переходе при туннельном эффекте отсутствует, а ток через р-п-переход будет иметь три составляющие: $I = I_{т.пр} - I_{т.обр} + I_{пр}$, где $I_{т.пр}$ – прямой туннельный ток (за счет прохождения зарядов через туннели при прямом включении); $I_{т.обр}$ – обратный туннельный ток (то же, что и прямой, но при обратном включении); $I_{пр}$ – прямой ток проводимости (вызван носителями заряда, преодолевающими потенциальный барьер при относительно высоком прямом напряжении).

Вольт-амперная характеристика р-п-перехода при туннельном эффекте будет иметь вид, представленный на рисунке 3.19.

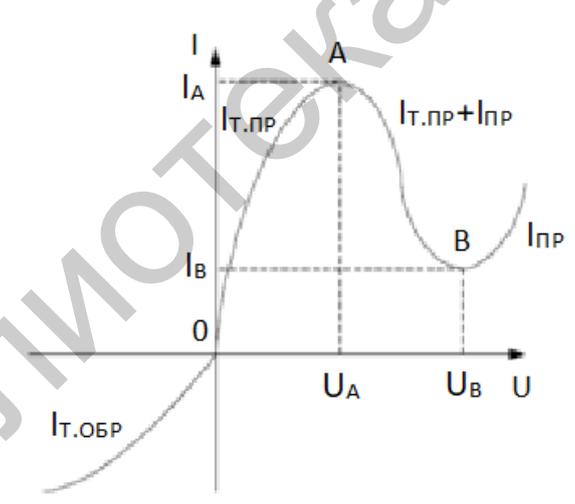


Рисунок 3.19 – Вольт-амперная характеристика р-п-перехода при туннельном эффекте

На участке АВ прямой туннельный ток уменьшается за счет снижения потенциального барьера и в точке В он становится равным нулю, а ток проводимости незначительно возрастает. За счет этого общий ток на участке АВ уменьшается. Особенностью туннельного эффекта является то, что на участке АВ вольт-амперной характеристики имеет место отрицательное динамическое сопротивление.

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_B - U_A}{I_B - I_A} . \quad (3.11)$$

Туннельный эффект применяется в туннельных диодах, которые используются в схемах генераторов гармонических колебаний и как маломощные бесконтактные переключающие устройства.

Эффект Гана. Эффект Гана проявляется в полупроводниках n-типа проводимости в сильных электрических полях.

Участок OA – линейный участок, на котором соблюдается закон Ома. Участок AB – при сравнительно больших напряженностях электрического поля уменьшается подвижность электронов (показывает, как легко электроны проходят сквозь кристаллическую решетку проводника) за счет увеличения амплитуд колебания атомов в узлах кристаллической решетки. И за счет этого рост тока замедляется. Участок BC – сильное уменьшение подвижности электронов, что приводит к уменьшению тока. Участок CD – при очень больших напряженностях значительно увеличивается генерация носителей зарядов и, хотя подвижность электронов уменьшается, ток возрастает за счет увеличения количества зарядов.

Сущность эффекта Гана состоит в том, что если в полупроводнике создать напряженность электрического поля, большую $E_{кр}$, но меньшую $E_{пор}$, т. е. на участке BC вольт-амперной характеристики, то в полупроводнике возникнут электрические колебания сверхвысокой частоты.

Эффект Гана применяется в диодах Гана, которые используются как маломощные генераторы СВЧ.

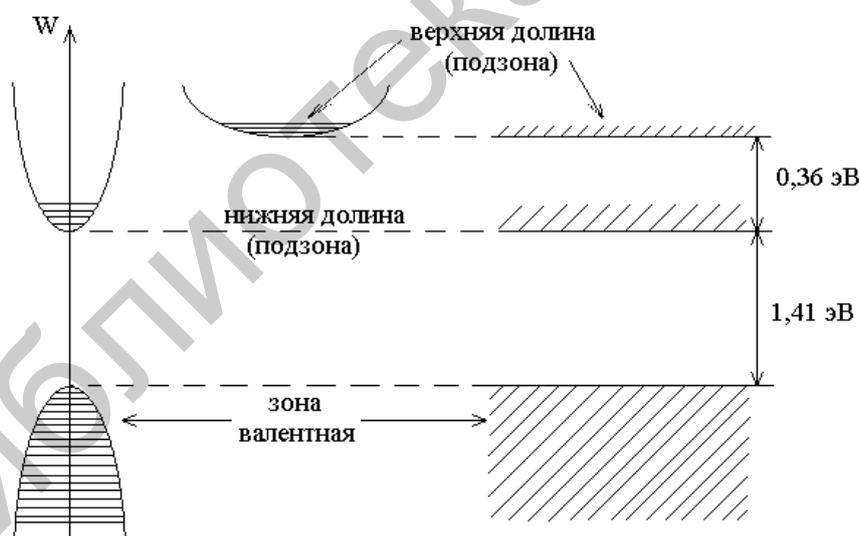


Рисунок 3.20 – Эффект Ганна

Эффект Холла. Эффект Холла проявляется в полупроводниках n-типа проводимости (с протекающими через них токами), помещенными в магнитное поле.

На движущиеся электроны в полупроводнике будет действовать сила Лоренца F , под действием которой электроны будут отклоняться к дальнему краю пластинки, следовательно, там будет сгущение электронов, а около переднего

края – их недостаток. Поэтому между этими краями возникнет ЭДС, которая называется ЭДС Холла (рисунок 3.21).

Эффект Холла применяется в магнитометрических датчиках.

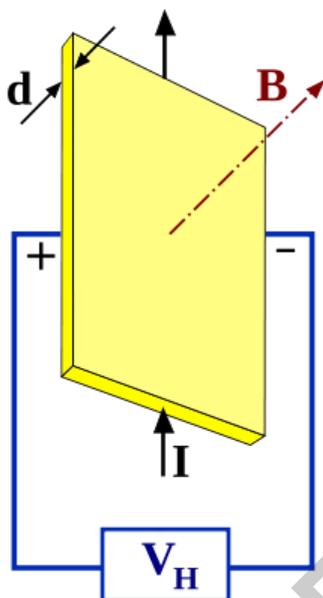


Рисунок 3.21 – Эффект Холла

Переход Шоттки

Образование перехода Шоттки. Переход Шоттки возникает на границе раздела металла и полупроводника n-типа, причем металл должен иметь работу выхода электрона большую, чем полупроводник (рисунок 3.22).

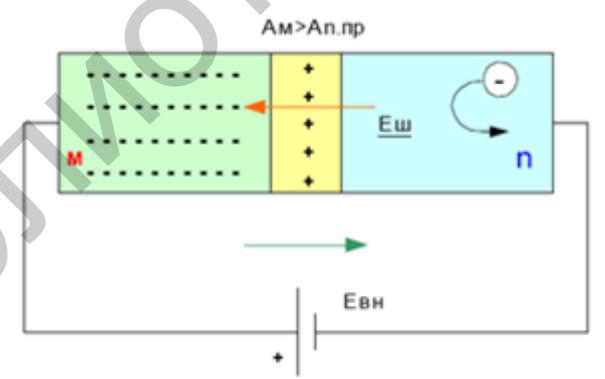


Рисунок 3.22 – Переход Шоттки

При контакте двух материалов с разной работой выхода электронов электрон проходит из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода, и ни при каких условиях – наоборот. Электроны из приграничного слоя полупроводника переходят в металл, а на их месте остаются некомпенсированные положительные заряды ионов донорной примеси.

В металле большое количество свободных электронов, и, следовательно, на границе металл-полупроводник возникает электрическое поле и потенциал-

ный барьер. Возникшее поле будет тормозящим для электронов полупроводника и будет отбрасывать их от границы раздела. Граница раздела металла и полупроводника со слоем положительных зарядов ионов донорной примеси называется переходом Шоттки (открыт в 1934 году).

Прямое и обратное включение диодов Шоттки. Если приложить внешнее напряжение плюсом на металл, а минусом на полупроводник, возникает внешнее электрическое поле, направленное навстречу полю перехода Шоттки. Это внешнее поле компенсирует поле перехода Шоттки и будет являться ускоряющим для электронов полупроводника. Электроны будут переходить из полупроводника в металл, образуя достаточно большой прямой ток. Такое включение называется прямым.

При подаче минуса на металл, а плюса на полупроводник возникает внешнее электрическое поле, сонаправленное с полем перехода Шоттки. Оба этих поля будут тормозящими для электронов полупроводника и будут отбрасывать их от границы раздела. Оба этих поля будут ускоряющими для электронов металла, но они через границу раздела не пройдут, так как у металла больше работа выхода электрона. Такое включение перехода Шоттки называется обратным.

Обратный ток через переход Шоттки будет полностью отсутствовать, так как в металле не существует неосновных носителей зарядов.

Достоинства и недостатки диодов Шоттки. Полупроводниковые диоды обладают многими преимуществами по сравнению с вакуумными диодами: малые размеры, длительный срок службы, механическая прочность. Существенным недостатком полупроводниковых диодов является зависимость их параметров от температуры. Кремниевые диоды, например, могут удовлетворительно работать только в диапазоне температур от минус 70 до 80 °С. У германиевых диодов диапазон рабочих температур несколько шире.

Достоинства перехода Шоттки:

- отсутствие обратного тока;
- возможность работать на СВЧ;
- высокое быстродействие при переключении из прямого состояния в обратное и наоборот.

Недостаток диода Шоттки – стоимость. В качестве металла обычно применяют золото.

Тема 3.2 Транзисторы

Транзистор – полупроводниковый электронный прибор с двумя электронно-дырочными переходами, обеспечивающий управление электрическим током посредством управляющего тока или напряжения. Также к транзисторам относят некоторые другие полупроводниковые приборы подобные им по структуре или функциональности (транзистор Дарлингтона, интегральные транзисторы).

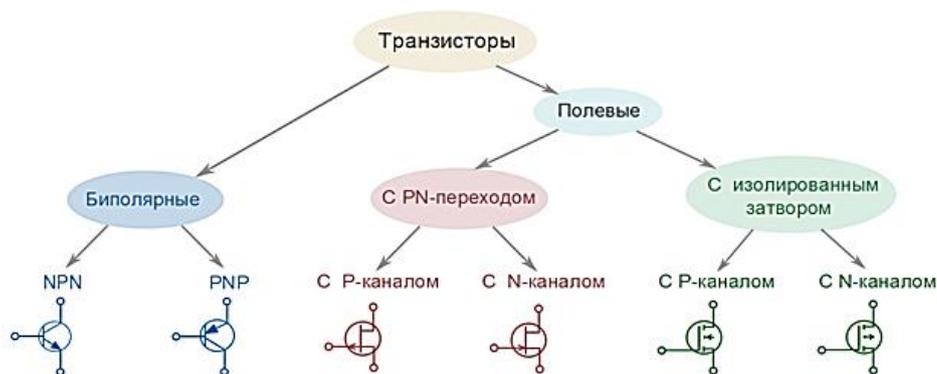


Рисунок 3.23 – Классификация транзисторов

Биполярные транзисторы

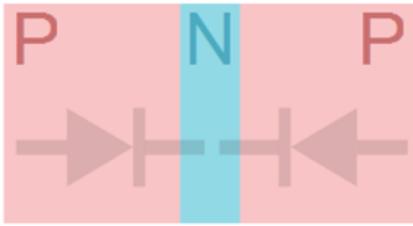
Биполярный транзистор – электронный полупроводниковый прибор, один из типов транзисторов, предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Транзистор называется биполярным, поскольку в работе прибора одновременно участвуют два типа носителей заряда – электроны и дырки. Этим он отличается от униполярного (полевого) транзистора, в работе которого участвует только один тип носителей заряда.

Принцип действия. У биполярных транзисторов через прибор проходят два тока – основной «большой» и управляющий «маленький» ток. Мощность основного тока зависит от мощности управляющего (рисунок 3.24).

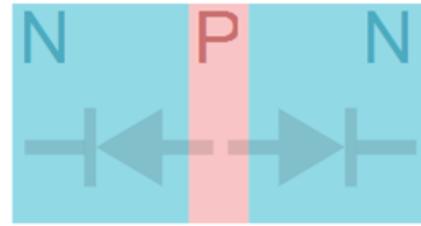


Рисунок 3.24 – Принцип действия биполярного транзистора

Устройство биполярного транзистора. Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника и двух р-n-переходов. Различают р-n-р- и n-p-n-транзисторы по типу чередования дырочной и электронной проводимостей. Это похоже на два диода, соединенных лицом к лицу или наоборот (рисунок 3.25).



p-n-p-транзистор



n-p-n-транзистор

Рисунок 3.25 – Устройство биполярного транзистора

У биполярного транзистора три контакта (электрода). Контакт, выходящий из центрального слоя, называется *база* (*base*). Крайние электроды носят названия *коллектор* и *эмиттер* (*collector, emitter*) (рисунок 3.26). Прослойка базы очень тонкая относительно коллектора и эмиттера. В дополнение к этому области полупроводников по краям транзистора несимметричны. Слой полупроводника со стороны коллектора немного толще, чем со стороны эмиттера (рисунок 3.27). Это необходимо для правильной работы транзистора.



Рисунок 3.26 – Внешний вид биполярного транзистора

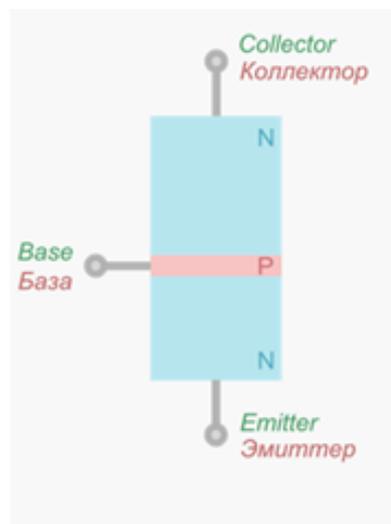


Рисунок 3.27 – Биполярный транзистор

Режимы работы биполярного транзистора. В соответствии с уровнями напряжения на электродах транзистора различают четыре режима его работы:

– Режим отсечки (cut off mode) – напряжение база – эмиттер ниже, чем 0,6–0,7 В, р-n-переход между базой и эмиттером закрыт. В таком состоянии у транзистора отсутствует ток базы. В результате тока коллектора тоже не будет, поскольку в базе нет свободных электронов, готовых двигаться в сторону напряжения на коллекторе. Получается, что транзистор как бы заперт, и говорят, что он находится в режиме отсечки.

– Активный режим (active mode) – напряжение на базе достаточное, для того чтобы р-n-переход между базой и эмиттером открылся. В этом состоянии у транзистора присутствуют токи базы и коллектора. Ток коллектора равняется току базы, умноженному на коэффициент усиления. То есть активным режимом называют нормальный рабочий режим транзистора, который используют для усиления.

– Режим насыщения (saturation mode) – ток базы слишком большой, в результате мощности питания просто не хватает для обеспечения такой величины тока коллектора, которая соответствовала бы коэффициенту усиления транзистора. Поэтому в режиме насыщения будет максимальный ток коллектора, который может обеспечить источник питания и не будет зависеть от тока базы. В таком состоянии транзистор не способен усиливать сигнал, поскольку ток коллектора не реагирует на изменения тока базы. В режиме насыщения проводимость транзистора максимальна, и он больше подходит для функции переключателя (ключа) в состоянии «включен». Аналогично в режиме отсечки проводимость транзистора минимальна, и это соответствует переключателю в состоянии «выключен».

– Инверсный режим (reverse mode) – коллектор и эмиттер меняются ролями: коллекторный р-n-переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном. В результате ток из базы течет в коллектор. Область полупроводника коллектора несимметрична эмиттеру, и коэффициент усиления в инверсном режиме получается ниже, чем в нормальном активном режиме. Конструкция транзистора выполнена таким образом, чтобы он максимально эффективно работал в активном режиме. Поэтому в инверсном режиме транзистор практически не используют.

Основные параметры биполярного транзистора:

– *Коэффициент усиления по току* – соотношение тока коллектора I_C и тока базы I_B . Обозначается β , h_{fe} или h_{21e} в зависимости от специфики расчетов, проводимых с транзисторов. Коэффициент β – величина постоянная для одного транзистора, и зависит от физического строения прибора. Высокий коэффициент усиления исчисляется в сотнях единиц, низкий – в десятках. Для двух отдельных транзисторов одного типа, даже если во время производства они были «соседями по конвейеру», β может немного отличаться. Эта характеристика биполярного транзистора является самой важной. Если другими параметрами прибора довольно часто можно пренебречь в расчетах, то коэффициентом усиления по току практически невозможно.

– *Входное сопротивление* – сопротивление в транзисторе, которое «встречает» ток базы. Обозначается R_{in} ($R_{вх}$). Чем оно больше, тем лучше для усилительных характеристик прибора, поскольку со стороны базы обычно находится источник слабого сигнала, у которого нужно потреблять как можно меньше тока. Идеальный вариант – это когда входное сопротивление равняется бесконечности. Сопротивление $R_{вх}$ для среднестатистического биполярного транзистора составляет несколько сотен килоом. Здесь биполярный транзистор очень сильно проигрывает полевому транзистору, где входное сопротивление доходит до сотен гигаом.

– *Выходная проводимость* – проводимость транзистора между коллектором и эмиттером. Чем больше выходная проводимость, тем больше тока коллектор – эмиттер сможет проходить через транзистор при меньшей мощности.

Также с увеличением выходной проводимости (или уменьшением выходного сопротивления) увеличивается максимальная нагрузка, которую может выдержать усилитель при незначительных потерях общего коэффициента усиления. Например, если транзистор с низкой выходной проводимостью усиливает сигнал в 100 раз без нагрузки, то при подсоединении нагрузки в 1 кОм, он уже будет усиливать всего в 50 раз. У транзистора с таким же коэффициентом усиления, но с большей выходной проводимостью, падение усиления будет меньше. Идеальный вариант – это когда выходная проводимость равняется бесконечности (или выходное сопротивление $R_{out} = 0$ ($R_{вых} = 0$)).

Полевые транзисторы

Поскольку у полевого транзистора нет управляющего тока, то у него очень высокое входное сопротивление, достигающее сотен гигаом и даже тераом (против сотен килоом у биполярного транзистора). У полевых транзисторов через прибор проходит только один ток, мощность которого зависит от электромагнитного поля.

Полевые транзисторы иногда называют униполярными, поскольку носителями электрического заряда в нем выступают только электроны или только дырки. В работе же биполярного транзистора, как следует из названия, участвуют одновременно два типа носителей заряда – электроны и дырки.

Полевые транзисторы (**FET** – Field-Effect-Transistors) разделяются на два типа – с управляющим *p-n-переходом* (**JFET** – Junction-FET) и с *изолированным затвором* (**MOSFET** – Metal-Oxid-Semiconductor-FET).

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом – транзистор, в котором сила проходящего через него тока регулируется внешним электрическим полем, т. е. напряжением (рисунок 3.28). Это принципиальное различие между ним и биполярным транзистором, где сила основного тока регулируется управляющим током.

Полевой транзистор с изолированным затвором MOSFET – это полевой транзистор, затвор которого электрически изолирован от проводящего канала полупроводника слоем диэлектрика. Благодаря этому у транзистора очень высокое входное сопротивление (у некоторых моделей оно достигает 10^{17} Ом).



Рисунок 3.28 – Принцип действия полевого транзистора

В соответствии со своей физической структурой полевой транзистор с изолированным затвором носит название *МОП-транзистор* (металл-оксид-полупроводник), или *МДП-транзистор* (металл-диэлектрик-полупроводник). Международное название прибора – MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor).

МДП-транзисторы делятся на два типа – со *встроенным каналом* и с *индуцированным каналом*. В каждом из типов есть транзисторы с n-каналом и p-каналом (рисунок 3.29).

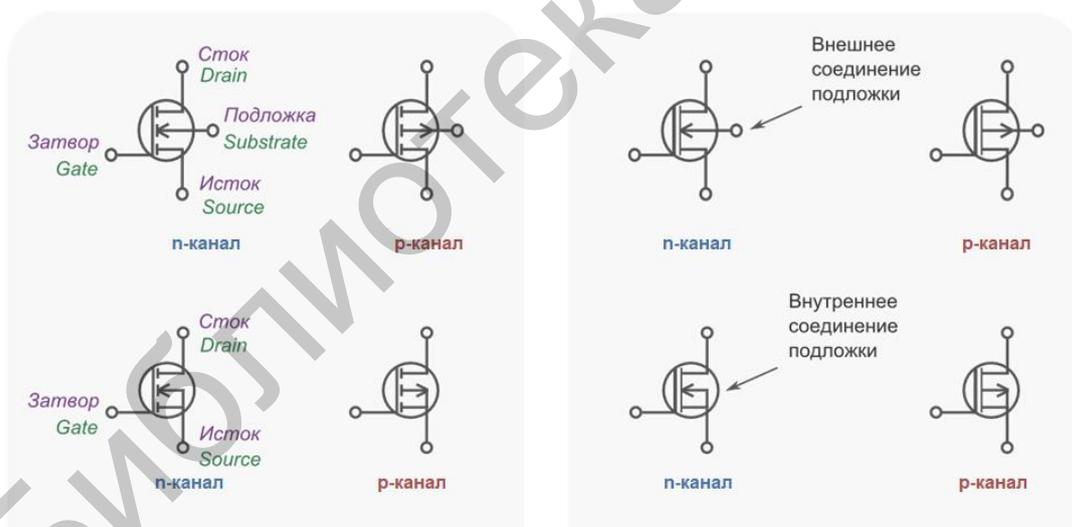


Рисунок 3.29 – Условное графическое обозначение МДП-транзистора

Устройство полевого транзистора с n-каналом. Как показано на рисунке 3.30, область полупроводника n-типа формирует канал между зонами p-типа. Электроды, подключаемые к концам n-канала, называются сток и исток. Полупроводники p-типа электрически соединяются между собой (закорачиваются) и представляют собой один электрод – *затвор*.

Вблизи стока и истока находятся области повышенного легирования n^+ , т. е. зоны с повышенной концентрацией электронов. Это улучшает проводимость кана-

ла. Кроме этого, наличие областей n^+ ослабляет эффект появления паразитических р-п-переходов в случае присоединения проводников из трехвалентного алюминия.

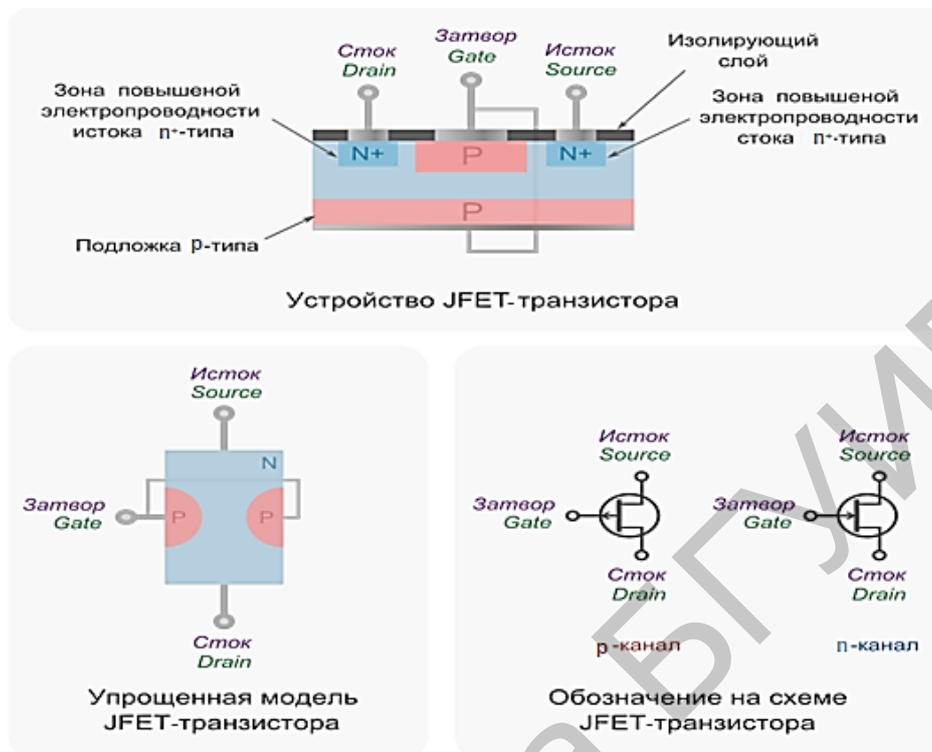


Рисунок 3.30 – Полевой транзистор

Устройство МДП-транзистора (MOSFET) с индуцированным каналом. На основании (подложке) полупроводника с электропроводностью р-типа (для транзистора с n-каналом) созданы две зоны с повышенной электропроводностью n^+ -типа. Все это покрывается тонким слоем диэлектрика, обычно диоксида кремния SiO_2 . Сквозь диэлектрический слой проходят металлические выводы от областей n^+ -типа, называемые *стоком* и *истоком*. Над диэлектриком находится металлический слой *затвора*. Иногда от подложки также идет вывод, который закорачивают с истоком [15].

Главные преимущества полевых транзисторов:

- Благодаря очень высокому входному сопротивлению цепь полевых транзисторов расходует крайне мало энергии, так как практически не потребляет входного тока.
- Усиление по току у полевых транзисторов намного выше, чем у биполярных.
- Значительно выше помехоустойчивость и надежность работы, поскольку из-за отсутствия тока через затвор транзистора управляющая цепь со стороны затвора изолирована от выходной цепи со стороны стока и истока.
- У полевых транзисторов на порядок выше скорость перехода между состояниями проводимости и непроводимости тока. Поэтому они могут работать на более высоких частотах, чем биполярные.

Главные недостатки полевых транзисторов:

– Структура полевых транзисторов начинает разрушаться при меньшей температуре (150 °С), чем структура биполярных транзисторов (200 °С).

– Несмотря на то что полевые потребляют намного меньше энергии по сравнению с биполярными транзисторами, при работе на высоких частотах ситуация кардинально меняется. На частотах выше 1,5 ГГц потребление энергии у металл-оксид-полупроводниковых транзисторов (МОП-транзистор) начинает возрастать по экспоненте. Поэтому скорость процессоров перестала так стремительно расти, и их производители перешли на стратегию «многоядерности».

– При изготовлении мощных МОП-транзисторов в их структуре возникает «паразитный» биполярный транзистор. Для того чтобы нейтрализовать его влияние, подложку закорачивают с истоком. Это эквивалентно закорачиванию базы и эмиттера «паразитного» транзистора (рисунок 3.31). В результате напряжение между базой и эмиттером биполярного транзистора никогда не достигнет необходимого, для того чтобы он открылся (около 0,6 В необходимо, чтобы р-п-переход внутри прибора начал проводить).

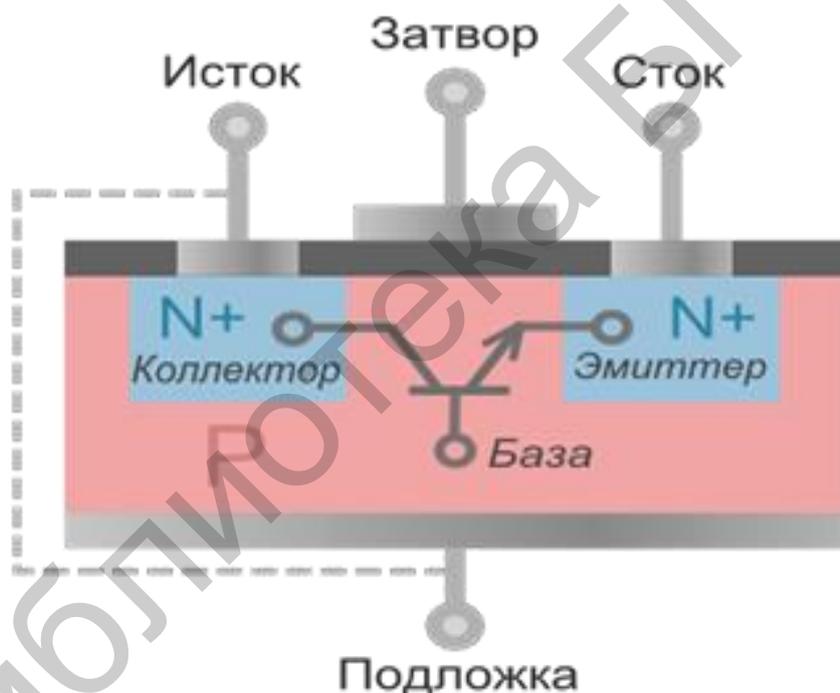


Рисунок 3.31 – «Паразитный» биполярный п-р-п-транзистор внутри МОП-транзистора

Однако при быстром скачке напряжения между стоком и истоком полевого транзистора, «паразитный» транзистор может случайно открыться, в результате чего вся схема может выйти из строя.

Важнейшим недостатком полевых транзисторов является *их чувствительность к статическому электричеству* (рисунок 3.32). Поскольку изоляционный слой диэлектрика на затворе чрезвычайно тонкий, иногда даже относительно невысокого напряжения бывает достаточно, чтобы его разрушить. А разряды статического электричества, присутствующего практически в каждой среде, могут достигать нескольких тысяч вольт.

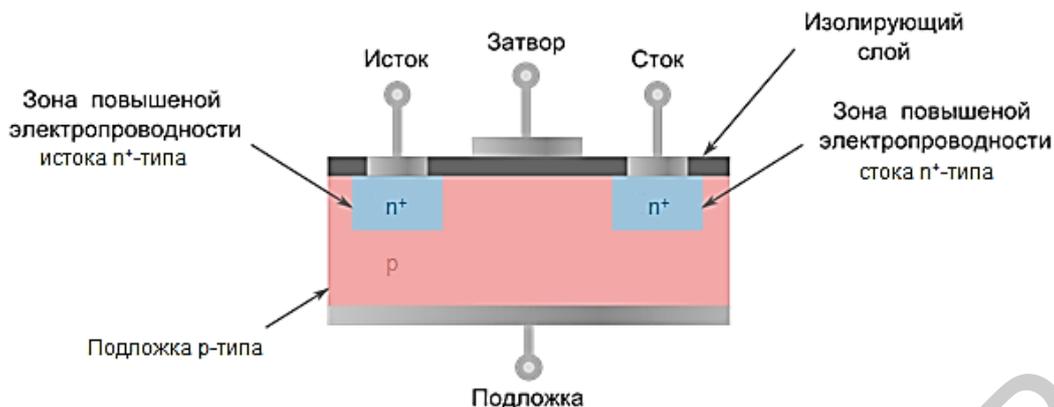


Рисунок 3.32 – Устройство МОП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

Маркировка транзисторов. В качестве маркировки транзисторов (рисунок 3.33) используются цветные точки или полоски, которые наносятся на передний срез корпуса или на сторону, противоположную выводам (верхняя часть транзистора). Первая метка обозначает тип транзистора и располагается на переднем срезе корпуса транзистора, вторая метка наносится сверху, указывает на букву. Обозначение типа транзистора и буквы расположены в алфавитно-цифровом порядке.

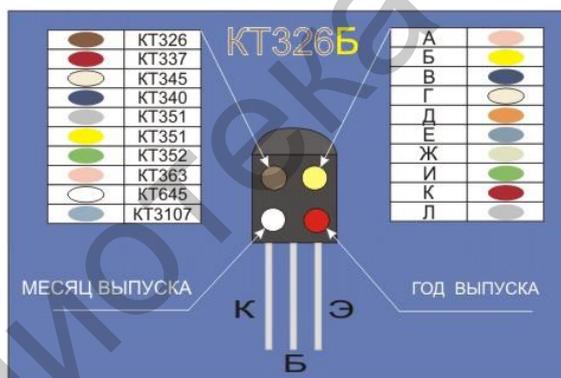


Рисунок 3.33 – Пример маркировки транзисторов на корпусах KT502A, KR351A

Виды корпусов транзисторов. На сегодняшний день можно перечислить несколько тысяч различных транзисторов, выпускаемых более чем двумя тысячами производителей. Как же можно их различить? Каждый тип транзистора характеризуется его кодом, например, 2N2222 или MPS6519. По этой причине, если вам необходимо переделать схему, взятую из книги или с веб-сайта, используйте код транзистора, чтобы найти соответствующую замену. Если замена отсутствует, то чаще всего можно найти близкий по характеристикам *аналог транзистора*. Производители транзисторов даже выпускают руководства и перечни замен, позволяющих подобрать близкий по параметрам аналог. Как выглядят некоторые корпуса, показано на рисунке 3.34 [16].

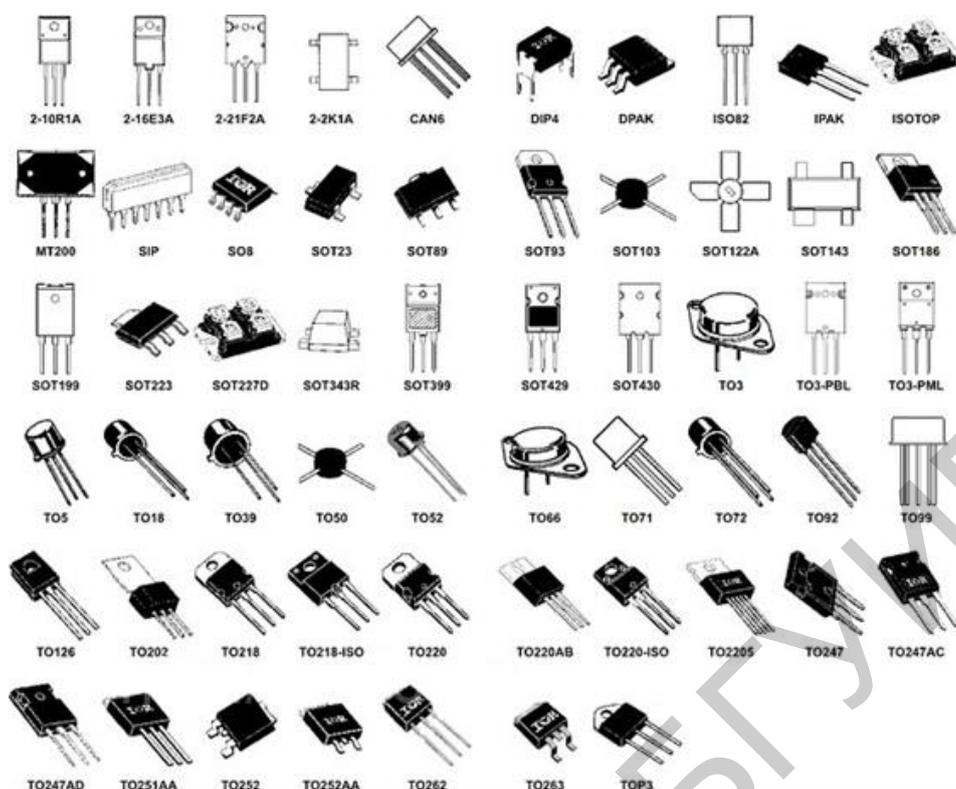


Рисунок 3.34 – Корпуса транзисторов

Тема 3.3 Микросхемы

Появление микросхем основано на логике развития полупроводниковых приборов. Раньше каждый электронный компонент – транзистор, резистор или диод – использовался по отдельности, обладал индивидуальным корпусом и включался в схему при помощи своих индивидуальных контактов. Но постепенно полупроводниковая электроника создала предпосылки для создания подобных устройств на общем кристалле, а не из отдельных элементов.

Благодаря применению данной технологии в настоящее время можно сразу создать на одном кристалле законченную схему из нескольких десятков, сотен или даже тысяч электронных компонентов. Преимущества новой разработки очевидны:

- Снижение затрат (стоимость микросхемы обычно гораздо меньше, чем общая стоимость всех составляющих ее электронных элементов).

- Надежность устройства. Это имеет огромное значение, поскольку поиск неисправности в схеме из десятков или сотен тысяч электронных компонентов – довольно сложная и трудоемкая работа.

- Ввиду того что электронные элементы интегральной микросхемы в сотни и тысячи раз меньше своих аналогов в обычной сборной схеме, их энергопотребление намного меньше, а КПД гораздо выше.

Интегральная (микро)схема (от англ. Integrated Circuit, IC, microcircuit), чип, микрочип (от англ. microchip, silicon chip, chip – тонкая пластинка, первоначально термин относился к пластинке кристалла микросхемы) – микроэлектронное устройство – электронная схема произвольной сложности,

изготовленная на полупроводниковом кристалле (или пленке) и помещенная в неразборный корпус (рисунок 3.35).

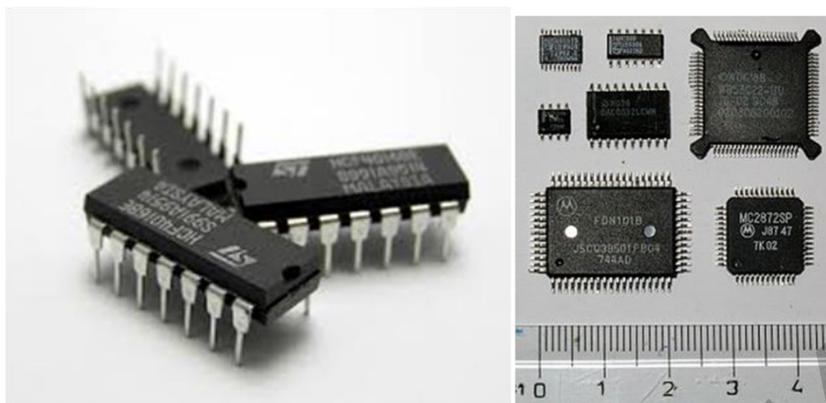


Рисунок 3.35 – Примеры микросхем

Интегральной микросхемой (ИМС) называют миниатюрное электронное устройство, выполняющее определенные функции преобразования и обработки сигналов и содержащее большое число активных и пассивных элементов (от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч) в сравнительно небольшом корпусе. Часто под интегральной схемой (ИС) понимают собственно кристалл или пленку с электронной схемой, а под микросхемой (МС) – ИС, заключенную в корпус. В то же время выражение «чип-компоненты» означает «компоненты для поверхностного монтажа», в отличие от компонентов для традиционной пайки в отверстия на плате. Поэтому правильнее говорить «чип-микросхема», имея в виду микросхему для поверхностного монтажа. На 2009 год большая часть микросхем изготавливается в корпусах для поверхностного монтажа.

Составной элемент не может быть отделен от ИМС как самостоятельное изделие. Компонент интегральной микросхемы – часть ИМС, которая выполняет функцию какого-либо электронного элемента и которая до монтажа в ИМС была самостоятельным комплектующим изделием. Компонент может быть отделен от изготовленной ИМС (например керамический конденсатор, бескорпусный транзистор). Корпус интегральной микросхемы предназначен для защиты от внешних воздействий и соединения ее с внешними электрическими цепями посредством выводов. Подложка ИМС предназначена для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных ИМС, межэлементных и межкомпонентных соединений, а также контактных площадок. Плата интегральной микросхемы является частью подложки или всей подложкой гибридной или пленочной ИМС, на поверхность которой нанесены пленочные элементы ИМС, межэлементные и межкомпонентные соединения и контактные площадки. Контакты площадки представляют собой металлизированные участки на плате, подложке или кристалле ИМС, предназначенные для присоединения выводных тактов, а также контроля электрических параметров и режимов ИМС.

Сегодня интегральные микросхемы являются одним из самых массовых изделий современной микроэлектроники. Микросхемы способны облегчать расчет и проектирование функциональных узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры, ускорять процесс создания новых аппаратов и внедрения их в серийное производство. Широкое применение микросхем позволяет повысить технические характеристики и надежность аппаратуры [17].

В зависимости от вида сигналов и выполняемых функций микросхемы можно разделить на различные категории, которые мы рассмотрим далее.

Аналоговые микросхемы

Аналоговые микросхемы предназначены для преобразования и обработки непрерывных сигналов. Эти микросхемы применяют в измерительных устройствах, системах автоматического регулирования. К аналоговым микросхемам относятся усилители, стабилизаторы напряжения и тока, специализированные микросхемы для радиоприемных и телевизионных устройств, аналоговые перемножители сигналов, компараторы, аналоговые ключи и коммутаторы, а также микросхемы для цифроаналогового и аналого-цифрового преобразования информации. Аналоговые микросхемы в отличие от цифровых характеризуются большим числом параметров. В справочных данных, как правило, приводится ограниченное число параметров, соответствующих главным образом одному из частных вариантов использования микросхем. Поэтому при проектировании новой аппаратуры нередко требуется дополнительная информация о параметрах микросхем.

Аналоговые микросхемы можно разделить на две группы. Первую составляют микросхемы универсального назначения: матрицы согласованных резисторов, диодов, транзисторов и т. д. Сюда также относятся интегральные операционные усилители (ОУ), появление которых является важнейшим достижением аналоговой микроэлектроники. Во вторую группу входят специализированные аналоговые микросхемы, выполняющие некоторые определенные функции, например, фильтрацию, компрессию, перемножение аналоговых сигналов.

Работа любого аналогового устройства сопряжена с ошибками, источниками которых может быть технологический разброс параметров элементов, их температурный и временной дрейфы, шумы, наводки. Уменьшение погрешности работы аналоговых устройств – одна из главных задач их разработчиков. Высокая сложность решения этой проблемы вызвала отставание технологии аналоговых микросхем как самостоятельного направления микроэлектроники по сравнению технологиями цифровых микросхем. Серьезным препятствием явился ограниченный набор элементов полупроводниковых микросхем, в частности отсутствие индуктивных элементов и конденсаторов. Трудной оказалась задача разработки небольшого числа типовых структур, которые подобно логическим элементам (ЛЭ) в цифровых микросхемах могли бы стать основной для аналоговой микросхемотехники.

В настоящее время многие из указанных трудностей преодолены. Разработаны специальные схемотехнические приемы взаимной компенсации нестабильности параметров элементов электрических цепей, при которых точность работы аналогового устройства гарантируется идентичностью характеристик элементов. Особенностью схемотехники аналоговых микросхем является реализация принципа

схемотехнической избыточности, который несмотря на усложнение изделий, благодаря интегральной технологии, позволяет улучшить их качество.

Зачастую одна микросхема может выполнять несколько функций одновременно, к примеру, микросхема К174ХА11, применяемая в отечественных телевизорах, выполняет не только функцию задающего генератора строчной развертки, но и селектора синхроимпульсов.

Основные области применения аналоговых микросхем:

1. В АВМ:
 - операционные усилители.
2. В блоках питания:
 - линейные стабилизаторы напряжения;
 - импульсные стабилизаторы напряжения.
3. В видеокамерах и фотоаппаратах:
 - ПЗС-матрицы;
 - ПЗС-линейки;
4. В аппаратуре звукоусиления и звуковоспроизведения:
 - усилители мощности звуковой частоты;
 - усилитель мощности сдвоенной частоты (УМСЧ) для стереофонической аппаратуры, например ТДА1519 или ТДА1557;
 - различные регуляторы (К174УН12 – двухканальный регулятор громкости и баланса).
5. В измерительных приборах:
 - датчики давления;
 - датчики магнитного поля;
 - датчики температуры.
6. В радиопередающих и радиоприемных устройствах:
 - детекторы АМ-сигнала;
 - детекторы ЧМ-сигнала;
 - смесители;
 - усилители высокой частоты;
 - усилители промежуточной частоты;
 - однокристалльные радиоприемники.
7. В телевизорах (на примере отечественного производства):
 - в радиоканале (К174УР8 – усилитель с автоматической регулировкой (АР), детектор промежуточной частоты (ПЧ) изображения и звука, К174УР2 – усилитель напряжения ПЧ-изображения, синхронный детектор, предварительный усилитель видеосигнала, система ключевой автоматической регулировки усиления);
 - в канале цветности (К174АФ5 – формирователь цветовых R-, G-, B-сигналов, К174ХА8 – электронный коммутатор, усилитель-ограничитель и демодулятор сигналов цветовой информации);
 - в цепях коммутации, синхронизации, коррекции и управления (К174АФ1 – амплитудный селектор синхросигнала, генератор импульсов строчной частоты, узел автоматической подстройки частоты и фазы сигнала, формирователь задающих импульсов строчной развертки, К174УП1 – усили-

тель яркостного сигнала, электронный регулятор размаха выходного сигнала и уровня «черного») [18].

Цифровые микросхемы (рисунок 3.36)

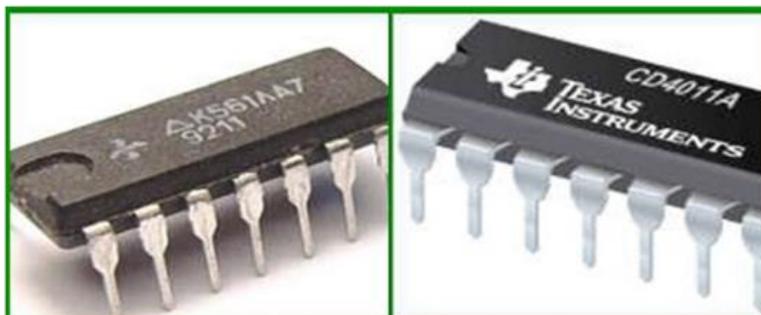


Рисунок 3.36 – Логический элемент 2И-НЕ

Цифровые микросхемы предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной, например двоичной, функции. Они применяются для построения цифровых вычислительных машин, а также цифровых узлов измерительных приборов, аппаратуры автоматического управления, связи и т. д.

По функциональному назначению цифровые микросхемы подразделяются на подгруппы: логические микросхемы, триггеры, элементы арифметических и дискретных устройств и др. Внутри каждой подгруппы по функциональному признаку микросхемы подразделяют на виды. Сведения о подгруппе и виде микросхемы содержатся в ее условном обозначении.

Цифровые микросхемы выпускаются сериями. В состав каждой серии входят микросхемы, имеющие единое конструктивно-технологическое исполнение, но относящиеся к различным подгруппам и видам. В серии может быть несколько микросхем одного вида, различающихся, например, числом входов или нагрузочной способностью. Чем шире функциональный состав серии, тем в большей степени она удовлетворит требованиям, предъявленным к микроэлектронной аппаратуре в отношении компактности, надежности и экономичности, поскольку применение микросхем одной серии исключает необходимость в дополнительных, например, согласующих устройствах (рисунок 3.37).

Вид логики	Полярность напряжения питания	
	положительная	отрицательная
Положительная		
Отрицательная		

Рисунок 3.37 – Состояния двоичного сигнала

Большинство цифровых микросхем относится к потенциальным микросхемам: сигнал на входе и выходе представляется высоким и низким уровнем напряжений. Этим двум состояниям сигнала ставятся в соответствие логические значения 1 и 0. В зависимости от кодирования состояний сигнала различают положительную и отрицательную логику. Логические операции, выполняемые микросхемами, обычно указываются для положительной логики. Длительность потенциального сигнала определяется сменой информации; например, длительность сигнала на выходе микросхемы определяется временным интервалом между двумя входными сигналами. Иногда применительно к потенциальным микросхемам говорят, что они управляются положительными или отрицательными импульсами. В таких случаях речь идет о том, что для изменения состояния микросхемы необходимо на заданное время изменить уровень входного сигнала с 1 на 0 (отрицательный импульс) либо с 0 на 1 (положительный импульс).

По конструктивно-технологическому исполнению все цифровые схемы делятся на группы, по характеру выполняемых функций в аппаратуре на подгруппы (например, логические элементы, триггеры и т. д.) и виды внутри подгрупп (например, триггеры с задержкой, триггеры универсальные и т. д.).

Кратко рассмотрим основные подгруппы и некоторые виды цифровых микросхем.

1. Логические микросхемы выполняют операции конъюнкции (И), дизъюнкции (ИЛИ), инверсии (НЕ), более сложные логические операции: Н-НЕ, ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ-НЕ и др. Логическая микросхема как функциональный узел может состоять из нескольких логических элементов, каждый из которых выполняет одну-две или более перечисленных логических операций, и является функционально-автономной, т. е. может использоваться независимо от других логических элементов микросхемы. Конструктивно логические элементы объединены единой подложкой и корпусом и, как правило, имеют общие выводы для подключения источника питания.

На рисунке 3.48 приведены условные обозначения и таблицы истинности некоторых логических элементов. Таблицы истинности показывают, каким будет сигнал на выходе (нулевым или единичным) при той или другой комбинации сигналов на входе. На рисунке 3.38 приведены логические элементы с двумя входами. Количество входов может быть и большим. При создании какого-либо устройства могут понадобиться логические элементы с разным количеством входов. Поэтому в состав серий, как уже отмечалось, нередко включаются микросхемы, которые содержат логические элементы на 2, 3, 4, 6, 8 входов. Поскольку микросхемы выпускаются в корпусах с ограниченным количеством выводов, например корпус 301Пл14-1 имеет 14 выводов, то и логических элементов, размещаемых в таком корпусе, будет тем меньше, чем больше входов у каждого из них. Например, серия К155, микросхемы которой выпускаются в подобном корпусе, включает следующий ряд логических микросхем: К1ЛБ551 – два четырехходовых логических элемента, К1ЛБ552 – один восьмивходовый логи-

ческий элемент, К1ЛБ553 – четыре двухвходовых логических элемента, К1ЛБ554 – три трехвходовых логических элемента.

Разработка каждой серии цифровых микросхем начинается с базового логического элемента. Так называют элемент, который лежит в основе всех микросхем серии: и логических, и триггеров, и счетчиков и т. д. Как правило, базовые логические элементы выполняют операции И-НЕ либо ИЛИ-НЕ. Принцип построения базового элемента, способ управления его работой, выполняемая им логическая операция, напряжение питания и другие параметры являются определяющими для всех микросхем серии. Например, логический элемент на является базовым для микросхем серий КПЗ, КП14, КП5. По принципу построения базовых логических элементов цифровые микросхемы подразделяются на следующие логики: диодно-транзисторную (ДТЛ); транзисторно-транзисторную (ТТЛ); транзисторную логику на переключателях тока (ПТТЛ), или, иначе, транзисторной логики со связанными эмиттерами; транзисторную логику на МДП-транзисторах (МДПТЛ).

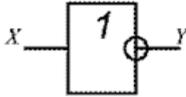
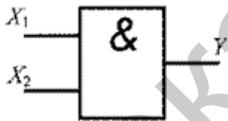
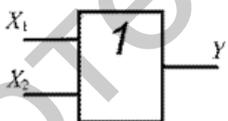
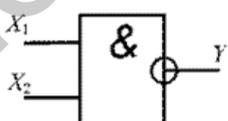
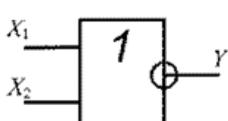
Название логического элемента	Условное обозначение логического элемента	Таблица истинности															
НЕ (NOT)		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	X	Y	0	1	1	0									
X	Y																
0	1																
1	0																
И (AND)		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X₁</th> <th>X₂</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
X ₁	X ₂	Y															
0	0	0															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	1															
ИЛИ (OR)		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X₁</th> <th>X₂</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
X ₁	X ₂	Y															
0	0	0															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	1															
И-НЕ		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X₁</th> <th>X₂</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
X ₁	X ₂	Y															
0	0	1															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	0															
ИЛИ-НЕ		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X₁</th> <th>X₂</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
X ₁	X ₂	Y															
0	0	1															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	0															

Рисунок 3.38 – Соответствие обозначения логического элемента и его таблицы истинности

Разнообразие типов базовых элементов объясняется тем, что каждый из них имеет свои достоинства и свою область применения. Некоторые из перечисленных типов логических элементов – РТЛ, ДТЛ, ПТТЛ – перешли в цифровую микроэлектронику, сохранившись практически в том же виде, в каком они были в цифровых устройствах на навесных компонентах. Логические элементы ТТЛ, МДПТЛ появились сравнительно недавно и сразу в микроэлектронном

исполнении. В настоящее время наблюдается интенсивное развитие серий микросхем, построенных на принципах ТТЛ, МДПТЛ, ПТТЛ, и вытеснение ими микросхем РТЛ и ДТЛ.

2. Триггеры – это функциональные узлы, которые обладают двумя устойчивыми состояниями равновесия. В микроэлектронном исполнении выпускаются триггеры, различающиеся по сложности построения, по своим функциональным возможностям, по способу управления работой.

В соответствии с принятой классификацией триггеры подразделяют на следующие виды:

– *RS-триггер* имеет два информационных входа R и S, сигналы на которых управляют состоянием триггера. Различают асинхронные и синхронные триггеры. Особенностью асинхронных триггеров является то, что установка их состояния, т. е. запись информации, осуществляется непосредственно с поступлением сигналов на входы. В синхронных триггерах наряду с информационными входами есть вход для синхронизирующего (тактового) сигнала. Запись информации в них производится только с поступлением синхронизирующего сигнала. RS-триггер способен хранить записанную информацию, т. е. сохранять установленное входными сигналами состояние до тех пор, пока не изменятся сигналы на входах. Поэтому такой триггер применяется в основном как элемент памяти в запоминающих устройствах, регистрах. Выполнять функции счетчика RS-триггер не может.

– *D-триггер* имеет один информационный вход D и вход для синхронизирующего сигнала. Основное назначение триггера заключается в задержке информационного сигнала на один такт: поступивший на D-вход сигнал появится на выходе в следующем такте. Различают одно- и двухступенчатые D-триггеры. Первые состоят из одного RS-триггера и дополнительных логических элементов на его входе. Одноступенчатые D-триггеры отличаются от RS-триггеров лишь тем, что управление их работой осуществляется по одному входу. Двухступенчатые D-триггеры состоят из двух RS-триггеров и обладают большими функциональными возможностями, например: при соединении выхода со входом получается триггер со счетным входом.

– *T-триггер* (триггер со счетным входом) имеет один вход T. Его называют счетным, тем самым указывая на основное назначение триггера считать поступающие на вход сигналы. Коэффициент пересчета равен 2: двум входным сигналам соответствует один сигнал на выходе. Такой триггер составляет основу счетчиков. В микроэлектронном исполнении T-триггер специально не изготавливается. При необходимости он получается, например, из двухступенчатого D-триггера или более универсального JK-триггера.

– *JK-триггер* имеет два информационных входа J и K и вход для синхронизирующего сигнала, обладает свойствами синхронного DRS-триггера и триггера со счетным входом, включен в состав многих серий благодаря своей универсальности.

Следует указать на то, что все триггеры обычно имеют дополнительные входы для сигналов установки исходного состояния. Такие сигналы имеют опре-

деленную длительность, т. е. являются импульсами. Триггеры с установочными входами называются комбинированными, например DRS-триггер – это D-триггер с R и S установочными входами.

3. Элементы арифметических и дискретных устройств предназначены для выполнения операций над кодовыми комбинациями 0 и 1: хранения (регистры хранения или параллельные регистры), преобразования из последовательной формы в параллельную и обратно (регистры сдвига или последовательные регистры), подсчета числа импульсов и хранения результата (счетчики), получения единичного сигнала, соответствующего определенной кодовой комбинации (дешифраторы), сложения по правилам алгебры логики двух кодовых комбинаций (сумматоры и их составные элементы полусумматоры) и т. д.

В некоторых сериях цифровых и аналоговых микросхем имеются микросхемы, которые могут выполнять различные функции. Такие микросхемы получили название многофункциональных схем. Цифровые многофункциональные схемы выполняют, как правило, логические функции. Такие микросхемы имеют различную структуру. Одни состоят из многих логических элементов, из которых путем внешней коммутации выводов можно получить требуемое устройство: логическое, триггер, несколько разрядов регистра и т. д. Другие многофункциональные схемы представляют собой сложное логическое устройство, которое можно настраивать с помощью внешних сигналов на выполнение требуемой логической операции.

Цифровые интегральные микросхемы

Микроконтроллер – это специальная микросхема, предназначенная для управления различными электронными устройствами (рисунок 3.39). Микроконтроллеры впервые появились в том же году, что и микропроцессоры общего назначения (1971).

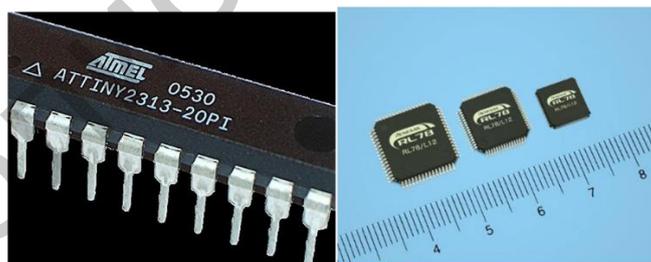


Рисунок 3.39 – Микроконтроллер и его размеры

Разработчики микроконтроллеров объединили процессор, память, ПЗУ и периферию внутри одного корпуса, внешне похожего на обычную микросхему. С тех пор производство микроконтроллеров ежегодно во много раз превышает производство процессоров, а потребность в них не снижается.

Микроконтроллеры выпускают десятки компаний, причем производятся не только современные 32-битные микроконтроллеры, но и 16-, и даже 8-битные (как i8051 и аналоги). Внутри каждого семейства часто можно встретить почти одинаковые модели, различающиеся скоростью работы центрального процессорного

устройства (ЦПУ) и объемом памяти. Микроконтроллеры применяются преимущественно во встроенных системах: игрушках, станках, массовой домашней технике, домашней автоматике – там, где нужна не мощность процессора, а, скорее, баланс между ценой и достаточной функциональностью.

Именно поэтому самые старые типы микроконтроллеров еще до сих пор в ходу – они многое могут: от автоматического открывания дверей и включения полива газонов до интеграции в систему «умный дом». При этом существуют и более мощные микроконтроллеры, способные выполнять сотни миллионов операций в секунду и обвязанные периферией «до зубов». У них и задачи соответствующие. Таким образом, разработчик сначала оценивает задачу, а уж потом выбирает под нее подходящее «железо».

На сегодняшний день существует более 200 модификаций микроконтроллеров, совместимых с i8051, выпускаемых двумя десятками компаний, и большое количество микроконтроллеров других типов. Популярностью у разработчиков пользуются 8-битные микроконтроллеры PIC фирмы Microchip Technology и AVR фирмы Atmel, 16-битные MSP430 фирмы TI, а также 32-битные микроконтроллеры архитектуры ARM, которую разрабатывает фирма ARM Limited и продает лицензии другим фирмам для их производства.

Микроконтроллер характеризуется большим числом параметров, поскольку он одновременно является сложным программно-управляемым устройством и электронным прибором (микросхемой). Приставка «микро» в названии микроконтроллера означает, что выполняется он по микроэлектронной технологии.

В ходе работы микроконтроллер считывает команды из памяти или порта ввода и исполняет их. Это значит, что каждая команда определяется системой команд микроконтроллера. Система команд заложена в архитектуре микроконтроллера и выполнение кода команды выражается в проведении внутренними элементами микросхемы определенных микроопераций.

Микроконтроллеры позволяют гибко управлять различными электронными и электрическими устройствами. Некоторые модели микроконтроллеров настолько мощны, что могут непосредственно переключать реле (к примеру, на елочных гирляндах).

Микроконтроллеры, как правило, не работают в одиночку, а запаиваются в схему, где кроме него подключаются экраны, клавиатурные входы, различные датчики и т. д.

Софт для микроконтроллеров может привлечь внимание тех, кто «гоняется за битами», так как обычно память в микроконтроллерах составляет от 2 до 128 кбит. Если меньше, то писать приходится на языке Ассемблер или Форте, если есть возможность, то используют специальные версии Бейсика, Паскаля, но в основном – Си. Прежде чем окончательно запрограммировать микроконтроллер, его тестируют в эмуляторах – программных или аппаратных.

Тут может возникнуть вопрос: микропроцессор и микроконтроллер это просто разные названия одного и того же устройства, или это все-таки разные понятия?

Микропроцессор – это центральное устройство любой ЭВМ, выполненное по интегральной технологии. Само название говорит о том, что именно в нем происходят вычислительные процессы. Чтобы из него получилась ЭВМ, пусть даже не очень современная и мощная (вспомните любительские конструкции Радио-86 или Синклер), его надо дополнить внешними устройствами. В первую очередь это оперативная память и порты ввода-вывода информации.

Микроконтроллер имеет внутри себя процессор, оперативную память, память программ, а кроме этого целый набор периферийных устройств, которые превращают процессор в полнофункциональную ЭВМ. По старой терминологии советских времен подобные устройства назывались однокристальными микроЭВМ (ОМЭВМ), но они не получили должного развития и применения. В зарубежной вычислительной технике ОМЭВМ стали называться контроллерами (от англ. control – управлять, управление). Они оказались пригодными для управления различной техникой, даже не очень сложной.

МИКРОКОНТРОЛЛЕР – это уже не процессор, но еще и не компьютер[20].

Центральный процессор, имеющийся в каждом компьютере, – главный вычислитель. Хотя компьютер и не предназначен исключительно для вычислительной нагрузки, процессор является в нем головным элементом. Но не только в компьютере имеется процессор. Процессоры применяются в большинстве приборов бытового назначения. Только там используются не такие процессоры, как в компьютере, а микропроцессоры и даже микроконтроллеры.

Таким образом, большие интегральные микросхемы или микросхемы с большой степенью интеграции и есть процессоры. Микропроцессоры по сути те же процессоры, только намного меньше в размерах. Первые процессоры могли занимать не одну комнату, их можно назвать макропроцессорами, чтобы как-то упорядочить в современном представлении об электронике.

Уменьшенный в габаритах и скомпонованный процессор занимает меньше места и его можно поместить в более компактное изделие, это и есть микропроцессор. Но сам процессор выполняет немного функций: пересылает данные между регистрами и совершает какие-либо арифметические и логические действия над ними.

Чтобы микропроцессор мог переслать данные в память, она должна присутствовать либо на самом кристалле, на котором находится сам процессорный элемент, либо подключаться к внешней оперативной памяти выполненной в виде отдельного кристалла или модуля.

Кроме памяти процессор должен взаимодействовать с внешними устройствами – периферией. Иначе какой пользы можно ожидать от работы процессора, перемещающего и перемещающего данные внутри системы. Смысл возникает тогда, когда процессор взаимодействует с устройствами ввода-вывода. У компьютера это клавиатура, манипулятор «мышь» и устройства отображения, такие как дисплей, принтер и, например, сканер (опять же для ввода информации).

Чтобы управлять устройствами ввода-вывода, непременно необходимы соответствующие буферные схемы и элементы. На их основе реализуются ин-

терфейсные, так называемые аппаратные средства. Способы взаимодействия с интерфейсными элементами предполагают наличие схем портов ввода-вывода, дешифраторов адреса и формирователей шин с буферными схемами для увеличения нагрузочной способности микропроцессора.

Интеграция процессора со всеми необходимыми дополнительными элементами, для того чтобы это изделие стало законченным конструктивом, и приводит к образованию микроконтроллера. Микросхема, или микроконтроллерный чип, реализует на одном кристалле процессор и интерфейсные схемы и является примером типового микроконтроллера. Например, наручные электронные часы или часы-будильник имеют внутри микроконтроллер, который реализует все функции такого устройства. Отдельные периферийные устройства подключаются непосредственно к ножкам микросхемы микроконтроллера, либо совместно используются дополнительные элементы или микросхемы малой либо средней степени интеграции.

Микроконтроллеры широко используются в изделиях, которые содержат всю систему целиком исключительно в одной миниатюрной микросхеме, часто называемой микросборкой. Например, «чиповая» кредитная карточка содержит микроконтроллер внутри в пластиковой основе. Таблетка домофона также внутри себя содержит микроконтроллер. Примеров использования и применения микроконтроллеров настолько много в современном мире, что легко обнаружить наличие контроллера в любом интеллектуальном устройстве: от детской игрушки до беспроводной гарнитуры сотового телефона.

Виды корпусов ИМС

Корпус интегральной микросхемы – это герметичная несущая система и часть конструкции, предназначенная для защиты кристалла интегральной схемы от внешних воздействий и для электрического соединения с внешними цепями посредством выводов. Для упрощения технологии автоматизированной сборки (монтажа) РЭА, включающей в себя ИМС, типоразмеры корпусов ИМС стандартизованы.

В российских корпусах ИМС расстояние между выводами (шаг) измеряется в миллиметрах: для корпусов типа 1 и 2 – 2,5 мм, для корпуса типа 3 – под углом 30 или 45° и для типа 4 – 1,25 мм. Зарубежные производители ИМС измеряют шаг в долях дюйма, милах (1/1000 дюйма) или используют величину 1/10 или 1/20 дюйма, что при переводе в метрическую систему соответствует 2,54 и 1,28 мм.

В современных импортных корпусах ИМС, предназначенных для поверхностного монтажа, применяют и метрические размеры: 0,8; 0,65 мм и др. Выводы корпусов ИМС могут быть круглыми, диаметром 0,3–0,5 мм или прямоугольными, в пределах описанной окружности 0,4–0,6 мм.

ИМС выпускаются в двух конструктивных вариантах – корпусном и бескорпусном.

1. DIP-корпус (рисунок 3.40).

- PDIP (Plastic DIP) – имеет пластиковый корпус;
- CDIP (Ceramic DIP) – имеет керамический корпус.

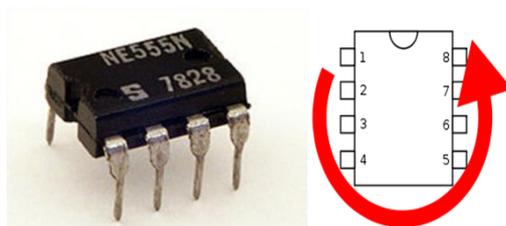


Рисунок 3.40 – DIP-корпус

2. **SIP**-корпус (Single In line Package) – плоский корпус с выводами с одной стороны. Очень удобен при монтаже и занимает мало места (рисунок 3.41). Количество выводов также пишется после названия корпуса.

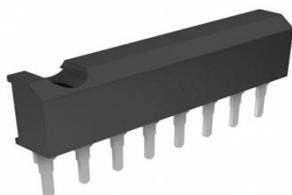


Рисунок 3.41 – SIP-корпус

3. **SMD** (рисунок 3.42).



Рисунок 3.42 – SMD-корпус

Виды корпусов поверхностного монтажа:

– **ZIP** (Zigzag In line Package) – плоский корпус с выводами, расположенными зигзагообразно.

– **SOIC** (Small-Outline Integrated Circuit) – маленькая микросхема с выводами по длинным сторонам, похожа на DIP-корпус, но ее выводы параллельны поверхности самого корпуса.

– **SOP** (Small Outline Package) – почти то же самое, что и SOIC, но расстояние между выводами SOPа намного меньше, чем у SOICа.

– **QFP** (Quad Flat Package) – плоский корпус с четырьмя рядами контактов, представляющий собой прямоугольный корпус с расположенными по краям контактами: PQFP (Plastic QFP) – имеет пластиковый корпус; CQFP (Ceramic QFP) – имеет керамический корпус.

– **LCC** (Leadless Chip Carrier) представляет собой низкопрофильный квадратный керамический корпус с расположенными на его нижней части контактами, предназначенный для поверхностного монтажа.

– **BGA** (Ball Grid Array) – корпус PGA, в котором штырьковые контакты заменены на шарики припоя, предназначен для поверхностного монтажа, чаще всего используется в мобильных процессорах, чипсетах и современных графических процессорах: FCBGA (Flip-Chip BGA) – в данном корпусе открытый кристалл процессора расположен на верхней части корпуса, изготовленного из органического материала; μ BGA (Micro BGA) и μ FCBGA (Micro Flip-Chip BGA) – компактные варианты корпуса.

– **PLCC** (Plastic Leaded Chip Carrier) и **CLCC** (Ceramic Leaded Chip Carrier) представляют собой квадратный корпус с расположенными по краям контактами, предназначенный для установки в специальную панель (часто называемую «кровать»). В настоящее время широкое распространение получили микросхемы флэш-памяти в корпусе PLCC, используемые в качестве микросхемы BIOS на системных платах.

– **LGA** (Land Grid Array) – корпус PGA, в котором штырьковые контакты заменены на контактные площадки, может устанавливаться в специальное гнездо, имеющее пружинные контакты, либо на печатную плату: CLGA; PLGA; OLGA.

– **PGA** (Pin Grid Array) – корпус с матрицей выводов, представляет собой квадратный или прямоугольный корпус с расположенными в нижней части штырьковыми контактами (в современных процессорах контакты расположены в шахматном порядке): PPGA (Plastic PGA) – пластиковый корпус; CPGA (Ceramic PGA) – керамический корпус; OPGA (Organic PGA) – корпус из органического материала.

При монтаже ИМС на поверхность печатной платы необходимо принять все меры по недопущению деформации корпуса. С одной стороны, должна обеспечиваться механическая прочность монтажа, гарантирующая устойчивость к механическим нагрузкам, с другой – определенная «гибкость» крепления, чтобы возможная в процессе нормальной эксплуатации деформация печатной платы не превысила допустимые пределы механической нагрузки на корпус ИМС, результатом чего могут стать негативные последствия от растрескивания корпуса ИМС с последующей потерей герметичности до отрыва подложки от корпуса.

Кроме того, схема размещения корпусов ИМС на печатной плате, зависящая от конструкции платы и компоновки на ней элементов, должна обеспечить:

- эффективный отвод тепла за счет конвекции воздуха или с помощью теплоотводов;
- возможность покрытия влагозащитным лаком без попадания его на места, не подлежащие покрытию;
- свободный доступ к любой ИМС для ее монтажа/демонтажа.

Раздел 4

Выбор электрорадиоэлементов, их монтаж на печатных платах, обозначение в технической документации

Тема 4.1 Основные принципы выбора электрорадиоэлементов

Выбор элементной базы проводится на основе схемы электрической принципиальной с учетом изложенных в техническом задании условий и требований. Эксплуатационная надежность элементной базы в основном определяется правильным выбором типа элементов при проектировании и при использовании в режимах, которые не превышают предельно допустимые.

Критерием выбора в устройстве электрорадиоэлементов является соответствие технологических и эксплуатационных характеристик ЭРЭ, заданных условиями работы и эксплуатации. Основными критериями выбора ЭРЭ являются:

1. Значения параметров и их разрешенные изменения в процессе эксплуатации (номинальное значение, мощность, допуск, сопротивление изоляции, шумы, вид функциональной характеристики и др.).

2. Разрешенные режимы и рабочие электрические нагрузки (мощность, напряжение, частота, параметры импульсного режима и др.).

3. Условия эксплуатации радиоэлектронного оборудования, в котором будет установлен этот элемент.

Они зависят от следующих факторов:

- климатические воздействия, вызванные состоянием окружающей среды;

- механические воздействия, вызванные силой тяжести, вибрациями и ударами, ускорением и силой инерции.

Повышение температуры окружающего воздуха вызывает увеличение сопротивления проводниковых материалов и ухудшение диэлектрических параметров изоляционных материалов – это ведет к увеличению потерь, появлению утечек в схеме, уменьшению добротности контуров и другим нежелательным явлениям.

При воздействии воздуха с высоким содержанием влаги возникает уменьшение сопротивления изоляции, растут потери в диэлектрике, на органических изоляционных материалах образуется плесневый грибок, что ухудшает электрические и механические свойства материалов.

Повышение давления воздуха сопровождается уменьшением его электрической прочности, что может привести к пробоям воздушных промежутков.

4. Показатели надежности: долговечность, безотказность, сохраняемость и др. (описаны в теме 1.2).

Надежность элементов является одним из факторов, существенно влияющих на интенсивность отказов аппаратуры в целом. Интенсивность отказов элементов зависит от конструкции, качества изготовления, условий эксплуатации и электрических нагрузок в схеме.

5. Стоимость элемента. От стоимости элементов в целом зависит и стоимость всего оборудования. В целях получения низкой себестоимости РЭА необходимо выбирать наиболее оптимальные варианты ЭРЭ, чтобы удовлетворялись основные требования, предъявляемые к элементу, при которых не ухудшались бы характеристики устройства.

Выбор элементной базы по вышеназванным критериям позволяет обеспечить надежную работу изделия при соблюдении всех требований, изложенных в техническом задании на разработку. Дополнительными критериями при выборе ЭРЭ являются: унификация ЭРЭ, их масса и габариты. Применение принципов стандартизации и унификации при выборе ЭРЭ, а также при конструировании изделия в целом позволяет получить следующие преимущества:

- значительно уменьшить сроки и стоимость проектирования;
- сократить на предприятии номенклатуру примененных деталей и сборочных единиц;
- увеличить масштабы производства;
- исключить разработку специальной оснастки и специального оборудования для каждого нового варианта схемы, т. е. упростить подготовку производства;
- создать специализированное производство стандартных и унифицированных сборочных единиц для централизованного обеспечения предприятия;
- улучшить эксплуатационную и производственную технологичность;
- снизить себестоимость выпуска проектируемого изделия [21].

В связи с тем что при проектировании различного рода радиоэлектронных устройств возникает задача выбора ЭРЭ из чрезвычайно широкого ассортимента, необходимо перечислить рекомендации, на которые надо обратить внимание при выборе основных типов ЭРЭ.

1) Резисторы:

- рекомендуется применять постоянные резисторы общего применения;
- резисторы постоянные специальные (прецизионные, высокоомные и др.) следует применять в тех случаях, когда значения соответствующих параметров резисторов общего применения недостаточны либо требуют выполнения особых условий;
- переменные резисторы следует применять только по назначению.

2) Конденсаторы:

- тип конденсатора выбирают по совокупности значений его номинальной емкости и рабочего напряжения;
- не следует без необходимости применять конденсатор с номинальным напряжением, значительно превышающим рабочее, так как при этом значительно ухудшаются массогабаритные и стоимостные показатели изделия;
- оксидные конденсаторы изготавливаются двух типов: полярные и неполярные. Полярные конденсаторы можно устанавливать лишь в тех цепях, в которых постоянная составляющая напряжения на конденсаторе будет больше амплитуды переменной составляющей.

3) Полупроводниковые диоды:

- необходимо применять диоды по указанному в справочнике назначению;
- обратное напряжение на диоде и прямой ток через него не должны превышать 70–80 % от максимально допустимых значений;
- рабочая частота не должна превышать указанного в справочнике предельного значения.

4) Транзисторы:

- применение высокочастотных транзисторов в низкочастотных электронных устройствах нежелательно, так как они дорогостоящие, склонны к самовозбуждению и развитию вторичного пробоя, обладают меньшими эксплуатационными запасами;
- не следует применять мощные транзисторы там, где можно применять маломощные;
- если нет особых причин для применения германиевого транзистора, лучше применить кремниевый.

5) Микросхемы:

- главным условием применения микросхем является строгое соблюдение режимов работы, рекомендованных в технических условиях на выбранную микросхему, это относится в первую очередь к величине напряжения питания, сопротивлению нагрузки и диапазону температур;
- рекомендации по применению аналоговых микросхем приводятся в справочниках;
- при выборе логических микросхем необходимо избегать применения микросхем разных серий, лучше применять микросхемы с одинаковым напряжением питания.

Тема 4.2 Особенности монтажа электрорадиоэлементов

Классификация методов монтажа электрических и электронных компонентов на печатных платах

Порядок установки деталей и узлов на плате в основном определяется удобством выполнения работ. Сравнительно тяжелые детали и узлы крепятся разъемными и неразъемными соединениями. Разъемные соединения, выполненные с помощью винтов, болтов, гаек и шпилек, применяются для тех деталей и узлов, которые в условиях эксплуатации могут быть заменены. Механические и монтажные электрические соединения выполняются склепыванием, развальцовкой, пластическим деформированием элементов соединяемых деталей, запрессовкой, пайкой, накруткой, сваркой, склеиванием, скреплением с помощью замазок и цементов.

Монтаж пайкой. Наибольшее распространение получил монтаж пайкой. Пайка применяется для получения неразъемного соединения деталей из различных металлов путем введения между контактами деталей расплавленного металла – припоя, имеющего более низкую температуру плавления, чем материалы соединяемых деталей.

Пайка может выполняться как вручную паяльником, так и с помощью специально разработанных специфических технологий.

Спаиваемые контакты деталей, а также припой и флюс вводятся в соприкосновение и подвергаются нагреву с температурой выше температуры плавления припоя, но ниже температуры плавления спаиваемых деталей. В результате припой переходит в жидкое состояние и смачивает поверхности деталей. После этого нагрев прекращается, и припой переходит в твердую фазу, образуя соединение.

Перед пайкой компоненты размещаются на печатной плате выводами компонентов в сквозные отверстия платы и припаиваются к контактным площадкам и/или металлизированной внутренней поверхности отверстия – так называемая технология монтажа в отверстия (ТНТ Through Hole Technology – технология монтажа в отверстия или, другими словами, штыревой монтаж или DIP-монтаж). Также все большее распространение, в особенности в массовом и крупносерийном производстве, получила более прогрессивная технология поверхностного монтажа, называемая ТМП (технология монтажа на поверхность) или SMT (Surface Mount Technology), или SMD-технология (Surface Mount Device – прибор, монтируемый на поверхность). Основным ее отличием от «традиционной» технологии монтажа в отверстия является то, что компоненты монтируются и паяются на контактные площадки, являющиеся частью проводящего рисунка на поверхности печатной платы. В технологии поверхностного монтажа, как правило, применяются два метода пайки: пайка оплавлением припойной пасты и пайка волной [22].

Основное преимущество метода пайки волной – возможность одновременной пайки компонентов, монтируемых как на поверхность платы, так и в отверстия. При этом пайка волной является самым производительным методом пайки при монтаже в отверстия. Пайка оплавлением основана на применении специального технологического материала – паяльной пасты. Она содержит три основных составляющих: припой, флюс (активаторы) и органические наполнители. Паяльная паста наносится на контактные площадки либо с помощью дозатора, либо через трафарет, затем устанавливаются электронные компоненты выводами на паяльную пасту и далее процесс оплавления припоя, содержащегося в паяльной пасте, выполняется в специальных печах путем нагрева печатной платы с компонентами.

Для предотвращения случайного короткого замыкания проводников из разных цепей в процессе пайки производители печатных плат применяют защитную паяльную маску (от англ. solder mask – зеленка) – слой прочного полимерного материала, предназначенного для защиты проводников от попадания припоя и флюса при пайке, а также от перегрева. Паяльная маска закрывает проводники и оставляет открытыми контактные площадки и ножевые разъемы. Наиболее распространенные цвета паяльной маски, используемые в печатных платах, – зеленый, затем красный и синий. Следует иметь в виду, что паяльная маска не защищает плату от влаги в процессе эксплуатации платы и для влагозащиты используются специальные органические покрытия.

Монтаж накруткой. Метод монтажа накруткой представляет собой способ постоянного соединения однопроволочного (одножильного) провода со штыревым выводом схемы путем накрутки под натягом определенного числа витков провода вокруг вывода, имеющего два или более острых края. В международной практике соединением накруткой называется электрическое соединение между проводом и выводом с острыми краями, при котором провод наматывается непосредственно на вывод с контролируемым усилием, причем несколько витков провода, врезаясь, запираются на углах вывода.

Накрутка, как правило, производится на штыри разъемов, вывода радиоэлементов и некоторые другие детали. Пример штыревого разъема показан на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Монтаж накруткой

Когда провод накручивается на вывод, оба они слегка деформируются. Поскольку при комнатной температуре соединение «старее», оно благодаря диффузии в месте стыка становится механически более прочным, исключая в конце концов зазор между проводом и выводом в точках контакта. Навитые соединения могут в течение 3 ч выдерживать температуру до 175 °С, что снижает напряжение примерно наполовину и соответствует сроку службы около 40 лет при температуре около 57 °С.

При монтаже накруткой для повышения надежности соединения часто используется так называемое «модифицированное» соединение. Модифицированное соединение отличается от обычного добавлением к виткам из неизолированного провода, создающим контактирующую поверхность, одного-двух витков провода с изоляцией. Это несколько увеличивает объем и высоту соединения, но дает ряд преимуществ [23].

Изоляция уменьшает концентрацию напряжения в точке, где осуществляется касание провода к выводу, и поэтому при модифицированном соединении поломка провода у первого витка соединения при вибрациях и перемещениях вывода менее вероятна, чем при обычном соединении. Проведенные испытания различных видов соединений на излом при воздействии вибраций показали, что паяное соединение разрушалось в среднем через 8 ч, соединение накруткой – через 12,5 ч, а модифи-

цированное соединение накруткой вообще не разрушалось за 24 ч испытаний, которые проводились в диапазоне частот 10–2 000 Гц.

Жесткость и диаметр провода для накрутки являются основными факторами. Чем пластичнее провод, тем его легче сгибать при накрутке. Провод низкой пластичности (жесткий) требует большего усилия для накрутки, и соединение получается более прочным. Это не означает, что провод низкой пластичности имеет большее преимущество, так как накрутка на соединения может развиваться.

Монтаж компонентов в отверстия. Технология монтажа в отверстия (Through Hole Technology, ТНТ), также называемая иногда штырьковым монтажом, является родоначальником подавляющего большинства современных технологических процессов сборки электронных модулей.

Технология монтажа в отверстия представляет собой метод монтажа компонентов на печатную плату, при котором выводы компонентов устанавливаются в сквозные отверстия платы и припаиваются к контактным площадкам и/или металлизированной внутренней поверхности отверстия.

Широкое распространение технология монтажа в отверстия получила в 50–60-х годах XX века. С тех пор значительно уменьшились размеры компонентов, увеличилась плотность монтажа и трассировки плат.

В настоящее время технология монтажа в отверстия уступает свои позиции более прогрессивной технологии поверхностного монтажа, в особенности, в массовом и крупносерийном производстве, бытовой электронике, вычислительной технике, телекоммуникациях, портативных устройствах и других областях.

Тем не менее есть области электроники, где технология монтажа в отверстия до настоящего времени является доминирующей. Это прежде всего силовые устройства, блоки питания, высоковольтные схемы мониторов и других устройств, а также области, в которых из-за повышенных требований к надежности большую роль играют традиции, доверие проверенному, например, авионика, автоматика АЭС и т. п.

Технология установки элементов в отверстия относительно проста, хорошо отработана, допускает ручные и автоматизированные методы сборки, хорошо обеспечена сборочным оборудованием и технологическим оснащением.

Электронные компоненты, используемые в технологии монтажа в отверстия по типу корпуса, можно разбить на следующие основные группы:

- а) электронные компоненты с осевыми (часто встречается обозначение axial – аксиальный) выводами;
- б) электронные компоненты с радиальными выводами (radial);
- в) SIL, SIP – многовыводные корпуса с однорядным расположением выводов;
- г) DIP (Dual In-Line Package) – корпус с двухрядным расположением выводов;
- д) разъемы, слоты;

е) панели для ИС, в том числе DIP, ZIF (Zero Insertion Force, панели с нулевым усилием вставки для штырьковых ИС), PGA (Pin Grid Array, панели для штырьковых ИС с матрицей выводов);

ж) различные компоненты сложной формы.

Поверхностный монтаж (рисунок 4.2). На ПП наносят пасту методом трафаретной печати или дозированием. Количество припоя должно обеспечивать требуемые электрофизические характеристики паяного соединения. После позиционирования и фиксации компонентов следует операция пайки оплавлением дозированного припоя. В случае двухстороннего поверхностного монтажа на обратной стороне фиксируются простые чип-компоненты с помощью адгезива и подвергаются пайке двойной волной припоя либо оплавлением дозированного припоя вместе с компонентами на лицевой стороне.

Особенности поверхностного монтажа. Существуют три основных варианта реализации поверхностного монтажа:

1. Чисто поверхностный монтаж на плате (односторонний или двухсторонний).

2. Смешанно-разнесенный вариант, когда традиционные (DIP) компоненты размещаются на лицевой стороне, а простые чип-компоненты – на обратной.

3. Смешанный монтаж, когда традиционные компоненты и для поверхностного монтажа находятся на лицевой или обеих сторонах платы.

Особенности этих процессов заключаются в следующем:

– корпуса компонентов для поверхностного монтажа не закрепляются на поверхности печатной платы (ПП) с помощью выводов;

– корпуса компонентов для поверхностного монтажа приклеиваются с помощью клеев или припойной пасты;

– пайка двойной волной припоя применима только к простым чип-компонентам, устанавливаемым на обратной стороне ПП, и к термостойким компонентам;

– компоненты для поверхностного монтажа на лицевой стороне припаяются с применением пайки расплавлением дозированного припоя в парогазовой фазе или ИК-печи, или с помощью лазерного нагрева;

– при смешанном монтаже необходимо перевертывание платы с компонентами и как минимум две установки пайки [24].

Далее следует очистка и испытание смонтированных плат.

Достоинства этого варианта монтажа следующие:

– наибольшая степень микроминиатюризации всего изделия;

– высокая автоматизация технологического процесса;

– высокая воспроизводимость и малый разброс электрофизических характеристик компонентов за счет группового способа монтажа;

– одноступенчатый процесс пайки;

– высокая надежность изделия;

– процесс с потенциально высоким выходом годных изделий;

– низкие затраты;

– улучшенные выходные электрические параметры изделия;

– уменьшение размеров изделия на 40–75 %.

Недостатки этого варианта монтажа следующие:

- большие первоначальные затраты на приобретение сборочно-монтажного оборудования;
- затраты на переквалификацию и обучение кадров.

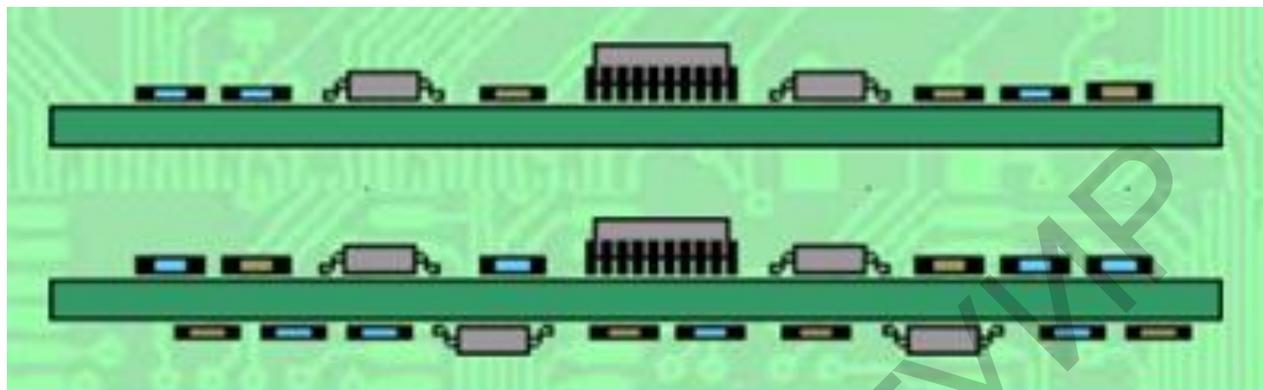


Рисунок 4.2 – Поверхностный монтаж

Смешанно-разнесенный монтаж (рисунок 4.3). Существуют две разновидности реализации этого варианта монтажа. В первом варианте сборку начинают с чип-компонентов на обратной стороне платы, которые приклеиваются. Затем формируют и обрезают выводы у традиционных (DIP) и вставляют в отверстия с лицевой стороны платы, паяют двойной волной припоя одновременно с чип-корпусами. Во втором варианте сборку начинают с установки на лицевой стороне традиционных компонентов, затем обрезают выводы у всех компонентов одновременно, а далее монтируют чип-компоненты на обратной стороне и запаивают все компоненты двойной волной припоя. Первый вариант обеспечивает повышенную плотность монтажа и минимальное количество переворотов платы в процессе сборки [25].

Достоинства этого варианта монтажа следующие:

- выигрыш в плотности монтажа по сравнению с традиционной технологией монтажа компонентов в отверстия;
- одноступенчатый процесс пайки (пайка двойной волной припоя);
- возможность использовать имеющееся оборудование из традиционной технологии;
- уменьшение объема изделия на 10–30 %.

Недостатки этого варианта монтажа следующие:

- требуется специальный флюс или адгезии для закрепления компонентов на обратной стороне платы;
- требуется дополнительное сборочно-монтажное оборудование;
- затруднены испытания и ремонт изделия;
- обратная сторона платы используется не полностью из-за выводов DIP-компонентов.

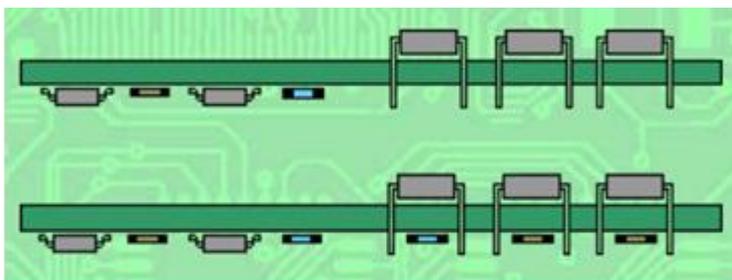


Рисунок 4.3 – Смешанно-разнесенный монтаж

Смешанный монтаж (рисунок 4.4):

Данный вариант монтажа реализуется в трех разновидностях. Первая заключается в установке компонентов для поверхностного монтажа на лицевой стороне платы.

Вторая разновидность заключается в установке чип-компонентов для поверхностного монтажа на обеих сторонах платы.

Третья разновидность заключается в установке компонентов для поверхностного монтажа на лицевой или обеих сторонах платы. Достоинства этого варианта монтажа следующие:

- большой выбор компонентов с целью достижения заданного критерия качества всего изделия;
- высокая плотность монтажа;
- оптимальная стоимость компонентов;
- возможность полностью автоматизировать монтаж компонентов.

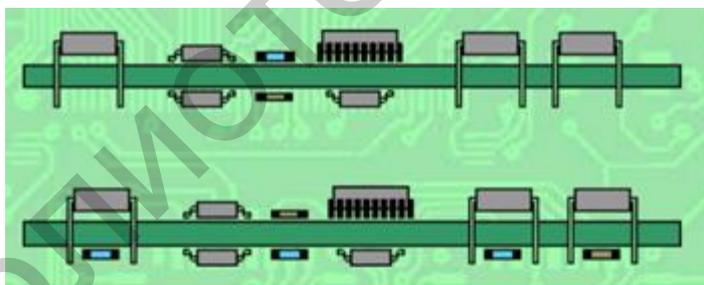


Рисунок 4.4 – Смешанный монтаж

Электрический монтаж кристаллов ИМС на платах. Электромонтаж бескорпусных кристаллов ИМС заключается в электрическом соединении контактных монтажных площадок на поверхности кристалла с контактными монтажными площадками на поверхности коммутационной платы. Обычно кристалл предварительно фиксируется на плате с помощью клея или припоя. Во втором случае групповая пластина до разделения ее на отдельные кристаллы должна быть металлизирована со стороны, противоположной структурам, металлом, который хорошо смачивается припоем. Обложенными должны быть также площадки на плате, на которые устанавливаются кристаллы.

В производстве нашли применение три способа электромонтажа:

1) с помощью гибких проволочных перемычек круглого сечения (проволочный монтаж);

2) с помощью гибких ленточных перемычек прямоугольного сечения (ленточный монтаж);

3) с помощью жестких объемных выводов, предварительно выращенных на кристалле [26].

Проволочный монтаж (рисунок 4.5). При проволочном монтаже перемычка формируется в процессе монтажа. После совмещения свободного конца проволоки с площадкой на кристалле производится сварка, далее изделие (коммутационная плата) перемещается так, чтобы под сварочный инструмент пришла соответствующая площадка коммутационной платы; после совмещения инструмента с площадкой производится сварка и обрезка проволоки. Далее формируется перемычка для следующей пары контактов.

При перемещении платы с приваренным концом проволоки последняя сматывается с катушки неподвижной сварочной головки так, чтобы образовался небольшой избыток по длине. В результате упругости проволоки перемычка получает плавный изгиб вверх, который при температурных изменениях длины перемычки предотвращает замыкание ее на кристалл.

В современных установках для микросварки рабочий цикл сварки (контролируемые давление инструмента, нагрев, время выдержки) автоматизирован. Что касается вспомогательных приемов (перемещения, совмещения), то существуют установки с ручным перемещением изделия и визуальным совмещением с помощью микроскопа, а также установки с автоматическими программируемыми перемещениями в сочетании с системой «машинного зрения», освобождающей оператора от зрительного напряжения.

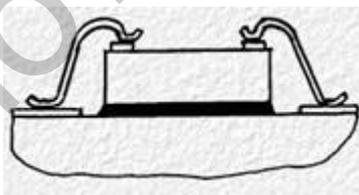


Рисунок 4.5 – Проволочный монтаж

Достоинством проволочного монтажа является возможность размещения перемычек при произвольном расположении любого количества монтажных площадок на коммутационной плате, т. е. гибкость в процессе ее конструирования. Недостаток заключается в высокой трудоемкости монтажа, так как сварные соединения можно получать только последовательно, индивидуально.

Ленточный монтаж (рисунок 4.6). Отказ от проволоки и переход к плоским ленточным перемычкам позволяет изготовить их заранее и одновременно вне кристалла методом избирательного травления (фотолитографии) ленты, однако взаимное расположение перемычек должно быть жестко определено расположением монтажных площадок на кристалле и плате.

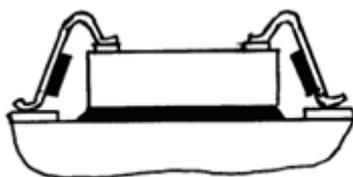


Рисунок 4.6 – Ленточный монтаж

Ленточные перемычки толщиной 70 мкм остаются гибкими, поэтому для сохранения их взаимной ориентации они удерживаются в заданном положении изолирующими перемычками из полиимида. Таким образом, исходная лента для изготовления системы перемычек должна быть двухслойной: алюминий (70 мкм) и полиимид (40 мкм). Для исключения замыкания перемычек на кристалл их специально формуют перед монтажом.

Использование ориентированных ленточных перемычек позволяет существенно снизить трудоемкость монтажа. Во-первых, для совмещения всей системы перемычек с кристаллом достаточно совместить две пары «перемычка-площадка», расположенные по диагонали. После приварки всех перемычек на кристалле последний с системой перемычек переносится на плату и аналогично производится совмещение свободных концов с площадками платы и их приварка. Во-вторых, появляется возможность одновременной (групповой) приварки всех перемычек, расположенных в одном ряду. Для групповой сварки могут быть использованы термокомпрессионный и ультразвуковой способы.

Недостатком ленточного монтажа являются ограничения, накладываемые на конструкцию коммутационной платы и самого кристалла по числу и характеру расположения монтажных площадок. Для смягчения этого недостатка приходится разрабатывать и изготавливать стандартный ряд систем перемычек, отличающихся числом и шагом расположения.

Монтаж с помощью жестких объемных выводов (рисунок 4.7). Жесткие объемные выводы формируются на кристаллах заранее и одновременно до разделения групповой пластины. В первом приближении они представляют собой выступы полусферической формы высотой порядка 60 мкм и покрыты припоем. Облуженными должны быть и ответные монтажные площадки на коммутационной плате. В отличие от проволочного и ленточного монтажа объемные выводы соединяют с площадками платы пайкой, а кристалл при этом оказывается в перевернутом положении, т. е. структурами вниз.

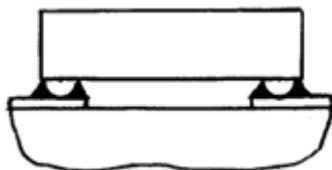


Рисунок 4.7 – Монтаж с помощью жестких объемных выводов

Последовательность монтажа следующая. Кристалл, находящийся в кассете в ориентированном положении, забирается вакуумным присосом («пинцетом») и переносится в позицию монтажа с определенным зазором. В зазор вводится полупрозрачное зеркало, позволяющее оператору через микроскоп наблюдать одновременно площадки на плате и выводы на кристалле. После совмещения зеркало выводится из зазора, а присос опускает кристалл на плату и прижимает его. Далее из миниатюрного сопла подается горячий инертный газ, выполняющий одновременно функции нагревательной и защитной среды, затем холодный инертный газ, чем и заканчивается цикл монтажа.

К достоинствам монтажа с помощью жестких объемных выводов относятся:

- сокращение числа соединений вдвое, что повышает надежность изделия при эксплуатации;
- сокращение трудоемкости за счет одновременного присоединения всех выводов;
- уменьшение монтажной площади до площади, занимаемой кристаллом;
- отсутствие необходимости предварительного механического крепления кристалла.

Ограничением для использования данного метода является необходимость применения коммутационных плат на основе тонких пленок с использованием фотолитографии, т. е. высокого разрешения, так как размеры площадок и шаг их расположения на плате и кристалле должны совпадать [27].

Оборудование, применяемое при монтаже электрорадиоэлементов

Существует огромное количество инструментов и оборудования для монтажа электрорадиоэлементов. Выбор их зависит от технологии сборки и сложности монтажа.

Для монтажа накруткой есть несколько видов и типов инструментов, как ручные, так и автоматические (электронные). Некоторые автоматические инструменты могут зачищать изоляцию при накрутке. При накрутке ручными инструментами изоляцию с провода приходится снимать вручную с помощью монтажных ножниц и иных приспособлений. Ручные накрутки, как правило, универсальные, со сменными насадками для разного сечения проводов.

Для пайки электрорадиоэлементов существует широкая гамма, как ручных паяльников, так и целых автоматических монтажных и паяльных станций.

Паяльники применяются при лужении и пайке для нагрева деталей, флюса, расплавления припоя и внесения его в место контакта спаиваемых деталей. Существует два основных типа паяльников: с периодическим и постоянным нагревом.

Паяльники с периодическим нагревом. Молотковые и торцевые паяльники. Они представляют собой массивный рабочий наконечник, закрепленный на относительно длинной металлической рукоятке, длина которой обеспечивает безопасность в обращении с инструментом. Для выполнения нестандартных работ паяльники подобного типа снабжаются фасонными наконечниками.

Нагрев этих паяльников осуществляется внешними источниками тепла. Это наиболее старый вид паяльников (известны с античности).

Паяльники с постоянным нагревом.

1. *Электропаяльники* – имеют встроенный электронагревательный элемент, работающий от электросети, понижающего трансформатора либо аккумуляторов.

2. *Газовые* – паяльники со встроенной газовой горелкой (горючий газ подается из встроенного баллончика со сжиженным газом или, реже, по шлангу от внешнего источника).

3. *Термовоздушные* – в них нагрев деталей, расплавление припоя происходят путем обдува их струей горячего воздуха. В этом он напоминает промышленный фен, но в отличие от него используется тонкая струя воздуха.

4. *Инфракрасные* – нагревание осуществляется источником инфракрасного излучения.

Электропаяльники малой мощности (5–40 Вт) обычно используются для пайки электронных компонентов при помощи легкоплавких оловянно-свинцово-сурьмяных припоев; это основной инструмент электроника и электромеханика. Мощные электропаяльники (100 Вт и более) используются для пайки и лужения массивных деталей.

Паяльные станции (рисунок 4.8). Паяльные станции (паяльный станок, паяльная установка) – класс специального оборудования радиотехнической промышленности, предназначенного для осуществления операций единичной или групповой пайки. Выпускаемое в данный момент оборудование может содержать следующие компоненты:

- контрольно-управляющий модуль (специальный прибор для контроля параметров и режимов работы агрегатов станции);
- паяльник (для низкотемпературной пайки припоем);
- термопинцет (для выполнения операций монтажа и демонтажа миниатюрных SMD-компонентов);
- фен локального подогрева (для осуществления вспомогательного подогрева в месте паяного соединения или использования в качестве инструмента групповой пайки);
- мощный источник теплового излучения (для разогрева платы при групповой пайке, например ИК-излучение);
- узконаправленный источник теплового излучения (для локального разогрева платы при групповой пайке, например лазер);
- пневматические агрегаты (вакуумный пинцет, вакуумный отсос припоя);
- вспомогательная арматура и принадлежности (подставки, держатели, рамки, стойки, антистатические браслеты и коврик) [28].



Рисунок 4.8 – Паяльная станция

Для автоматизированного монтажа электрорадиоэлементов применяют разного рода оборудование, которое позволяет устанавливать элементы как в отверстия, так и в SMD-элементы.

Для установки в отверстия применяют «Инserterы» – высокопроизводительные, высокоточные системы для монтажа радиальных и аксиальных компонентов (конденсаторы, транзисторы, триоды, светодиоды, клавишные выключатели, резисторы, разъемы и другие компоненты) и перемычек в отверстия (рисунок 4.9). Производительность данных аппаратов достигает до 26 000 комп./ч. Данные системы получили широкое распространение на производствах бытовой техники: телевизоров, микроволновых печей, автомобильных аудиосистем и кондиционеров и др.



Рисунок 4.9 – Инserter

Для установки SMD-элементов применяют универсальные автоматы установки компонентов. В основном они предназначены для крупносерийного производства. Благодаря высокой точности и широкому диапазону устанавливаемых компонентов, а также большому количеству питателей (до 160) данные

установки является идеальными инструментами для контрактного производства.

Производительность некоторых автоматов достигает 62 000 комп./ч по стандарту IPC-9850 на чип-компонентах и 7 000 – на больших и сложных микросхемах.

Автоматы могут быть оснащены четырьмя головами на четырех балках. Две головы имеют по шесть скоростных вакуумных захватов, а две оставшиеся – по три прецизионных.

Автоматы могут комплектоваться CSP-видеосистемами с передней и задней стороны питателей, видеосистемами Multiple FOV, магазинами (ANC) для автоматической смены головок вакуумных захватов и набором головок, позволяющих устанавливать большинство компонентов. Двойной конвейер позволяет производить сборку одновременно двух или четырех плат, обеспечивая максимальную производительность.

Для примера универсальный автомат установки SMD-компонентов Mx-350P (производитель «Mirae») благодаря 160 питателям за один проход может собрать практически любую плату.

Библиотека БГУИР

Перечень сокращений

АР	– автоматическая регулировка
ВАХ	– вольт-амперная характеристика
ВШП	– встречно-штыревой преобразователь
ГИС	– гибридно-интегральная схема
ГРП	– газоразрядные приборы
ИМС	– интегральная микросхема
ИС	– интегральная схема
ЛЗ	– линия задержки
МОП	– металл-оскид-полупроводник
ПАВ	– поверхностно-активные вещества
ПКЭ	– пьезокерамический элемент
ПП	– печатная плата
ППП	– полупроводниковые приборы
ПЧ	– промежуточные частоты
ПЭЭ	– пьезоэлектрический эффект
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура
САПР	– системы автоматизированного проектирования
СВЧ	– сверхвысокая частота
ТКЕ	– температурный коэффициент емкости
ТКС	– температурный коэффициент сопротивления
УЗО	– устройства защитного отключения
УКВ	– ультракороткие волны
УМСЧ	– усилитель мощности сдвоенной частоты
УО	– условное обозначение
ЦПУ	– центральное процессорное устройство
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭРЭ	– электрорадиоэлементы

Список использованных источников

1. Рычина, Т. А. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы : учебник / Т. А. Рычина, А. В. Зеленский. – М. : Радио и связь, 1989. – 352 с.
2. Электронные компоненты на основе пьезоустройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/search>.
3. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учебник / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2011. – 682 с.
4. Интернет-магазин электронных компонентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.chipdip.ru/product>.
5. Энциклопедия электронных компонентов. В 2 т. Т. 2 : Тиристоры, аналоговые и цифровые микросхемы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.bhv.ru/books/book.php?id=194297>.
6. Свитенко, В. И. Электрорадиоэлементы / В. И. Свитенко. – М. : Высш. шк., 1987. – 207 с.
7. Цветная маркировка резисторов. Кодовая маркировка резисторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.radiant.su/rus/articles/>.
8. Речицкий, В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты / В. И. Речицкий. – М. : Радио и связь, 1987. – 265 с.
9. Конденсаторы – условные графические обозначения на электронных схемах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://radio-hobby.org/modules/instruction>.
10. Кодовая и цифровая маркировка конденсаторов : справочник [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://x-shoker.ru/publ/kodovaja>.
11. Катушки индуктивности, дроссели и трансформаторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mirznanii.com/a/120006/katushki-induktivnosti-drosseli-i-transformatory>.
12. Виды кабелей и их различия. Кабель электрический [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://elektrik.info/main/school/777-vidy-kabeley-i-ih-razlichiya.html>.
13. Справочно-практическое пособие электрика [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://books.google.by/books?id=LYXLA AAAAQBA/>.
14. Баранов, В. В. Электрорадиоэлементы и устройства функциональной электроники : конспект лекций / В. В. Баранов. – Минск : БГУИР, 1999. – 86 с.
15. Импортные и отечественные мощные транзисторы. Справочник [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://trzrus.ru/>.
16. Типы корпусов импортных транзисторов и тиристоров » РадиобукА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://radiobooka.ru/spravochniki>.
17. Кузнецов, Ю. А. Микросхемотехника БИС на приборах с зарядовой связью / Ю. А. Кузнецов, В. А. Шилин. – М. : Радио и связь. – 1988. – 160 с.
18. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники : в 2 т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан. – 3-е изд. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 408 с. – 2 т.

19. Цифровые микросхемы. Типы логики, корпуса [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://сhem.net/beginner>.
20. Микроконтроллер – назначение, устройство, софт [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://electric.info/main/automation>.
21. Лачин, В. И. Электроника : учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д : Феникс, 2001. – 448 с.
22. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и устройства : учебник / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко, Г. С. Хижа. – СПб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд., 1999. – 512 с.
23. Борисов, Ю. М. Электротехника : учебник / Ю. М. Борисов. – 3-е изд. – СПб. : ВHV, 2014. – 592 с.
24. Гальперин, М. В. Электротехника и электроника : учебник / М. В. Гальперин. – М. : Форум, НИЦ ИНФРА, 2013. – 480 с.
25. Данилов, И. А. Общая электротехника : учеб. пособие / И. А. Данилов. – М. : Юрайт, ИД Юрайт, 2013. – 673 с.
26. Иванов, И. И. Электротехника : учеб. пособие / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев. – 5-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2008. – 496 с.
27. Кузовкин, В. А. Электротехника и электроника : учебник / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – М. : Юрайт, 2013. – 431 с.
28. Паяльные станции: обзор, характеристики, ассортимент [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://siriust.ru/podderzhka-blog>.

Учебное издание

Баранов Валентин Владимирович
Хорошко Виталий Викторович
Гременок Валерий Феликсович и др.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ
КОМПОНЕНТЫ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *О. И. Толкач*

Подписано в печать 27.05.2019. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 8,02. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 50 экз. Заказ 273.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск