

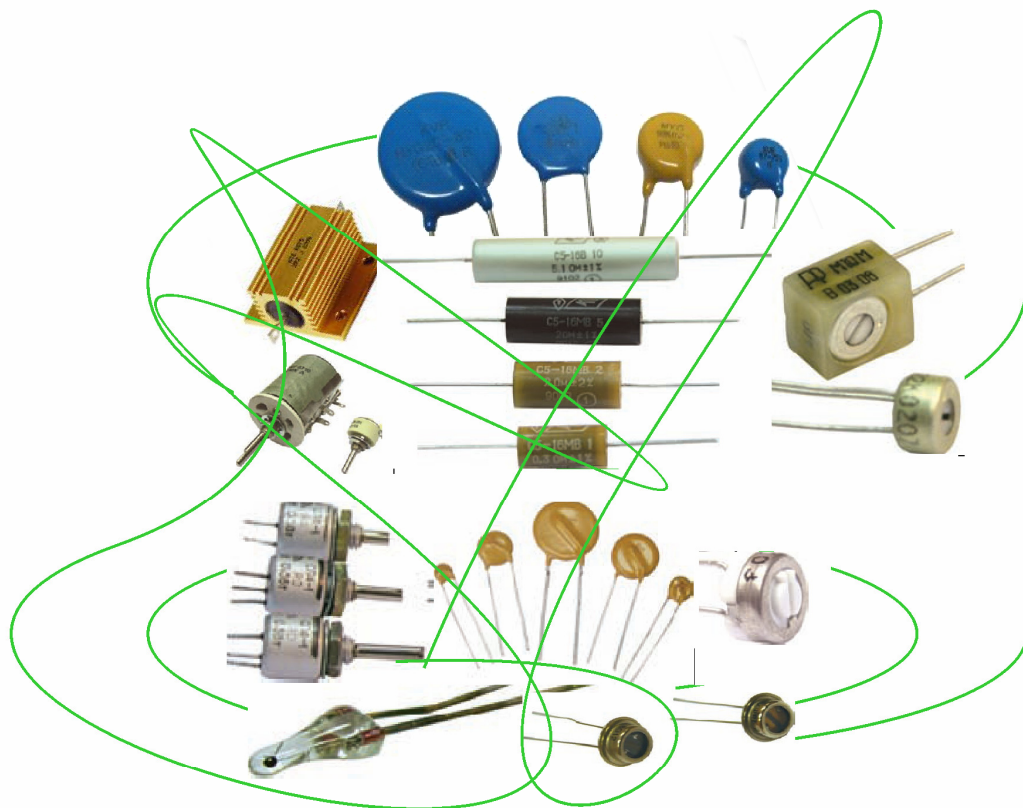
И.Б. Бондаренко

# ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТЫ

## I ЧАСТЬ

# РЕЗИСТОРЫ

Учебное пособие



Санкт-Петербург  
2012

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**И.Б. Бондаренко**

# **ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТЫ**

---

## **РЕЗИСТОРЫ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург**  
**2012**

Бондаренко И.Б. Электрорадиоэлементы. Часть 1. Резисторы. – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2012. – 108 с.

В учебном пособии описаны основные свойства таких электрорадиоэлементов, как резисторы. Описаны классификации резисторов: по материалу резистивного элемента и назначению. Рассмотрены принципы работы полупроводниковых нелинейных резисторов, приведены параметры представителей как резисторов общего, так и специального назначения.

Работа предназначена для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям подготовки: 211000 "Конструирование и технология электронных средств" и 090900 "Информационная безопасность", а также специалистов по специальности 210202.65 "Проектирование и технология электронно-вычислительных средств". Пособие может использоваться специалистами и радиолюбителями, связанными с разработкой и эксплуатацией радиоэлектронной аппаратуры, систем автоматики и сбора данных.

Рекомендовано к печати на заседании Ученого совета факультета Компьютерных технологий и управления «15» июня 2012г., протокол заседания № 6.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012.  
© И.Б. Бондаренко, 2012.

## Содержание

	Стр.
Введение.....	5
1. Общие свойства электрорадиоэлементов.....	7
1.1. Номинальная величина.....	8
1.2. Допуск на параметр.....	8
1.3. Параметры, характеризующие электрическую прочность.....	9
1.4. Номинальная мощность.....	9
1.5. Параметры, характеризующие потери.....	9
1.6. Характеристики стабильности.....	14
1.7. Параметры надежности.....	15
Контрольные вопросы.....	19
2. Резисторы: классификация, основные параметры.....	20
2.1. Классификация резисторов.....	20
2.2. Основные параметры и свойства резисторов.....	24
Контрольные вопросы.....	35
3. Типы резисторов.....	36
3.1. Углеродистые и бороуглеродистые резисторы.....	36
3.2. Металлопленочные, металлоокисные и металлодиэлектрические резисторы.....	39
3.3. Композиционные резисторы.....	42
3.4. Резисторы переменного сопротивления.....	45
3.5. Проволочные резисторы.....	49
3.6. Металлофольговые резисторы.....	54
Контрольные вопросы.....	57
4. Полупроводниковые нелинейные резисторы.....	58
4.1. Терморезисторы.....	58
4.2. Варисторы.....	74
4.3. Магниторезисторы.....	80
4.4. Фоторезисторы.....	91
Контрольные вопросы.....	102
Литература.....	103

## Введение

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 211000 "Конструирование и технология электронных средств" и 090900 "Информационная безопасность", а также для подготовки специалистов по специальности 210202.65 "Проектирование и технология электронно-вычислительных средств".

Пособие составлено в соответствии с программой курса "Электроэлементы и передача данных в компьютерных системах".

Резисторы относятся к изделиям массового производства электронной промышленности. Они составляют около половины всех комплектующих компонентов электронной аппаратуры. Широкое использование резисторов обусловлено их назначением – распределением электрической энергии между другими элементами электрической схемы. Поэтому резисторы используются в радиоэлектронной аппаратуре, измерительных устройствах, ЭВМ, магазинах сопротивлений, и бытовой аппаратуре различного назначения.

В связи с развитием элементной базы число типоразмеров резисторов постоянно увеличивается, что вносит коррективы и в системы кодирования параметров этих элементов. Из-за чего возникает необходимость использования справочных материалов различных производителей, которые используют собственные принципы кодировки параметров резисторов. Большое число типов резисторов привносит еще большие трудности в выборе конкретного вида.

Работа резисторов непосредственно связана с электрическими сигналами, поэтому первая часть пособия содержит описание основных электрических параметров и причин потери сигнала, особенно при повышении частоты.

Вторая часть учебного пособия содержит классификации резисторов и описание основных свойств резисторов с учетом общих свойств электрорадиоэлементов, описанных в первой части.

В третьей и четвертой части работы рассмотрены основные виды резисторов, приведены их основные свойства и параметры представителей каждого типа. Рассмотрены принципы работы полупроводниковых нелинейных резисторов.

Хочется отметить, что параметры некоторых резисторов даны не для бездумного заучивания, а для количественного подтверждения

основных свойств различных типов резисторов и для возможности сравнения их друг с другом без использования дополнительных справочных материалов. Пособие содержит лишь информацию об основных типах резисторов и ни в коей мере не претендует на полноту сведений по данному типу электрорадиоэлементов.

Для более глубокого усвоения материала, а также для ознакомления с полным перечнем резисторов, выпускаемых как отечественной, так и зарубежной электронной промышленностью, рекомендуется пользоваться литературой, указанной в конце учебного пособия.

Целью учебного пособия является знакомство с основными свойствами и параметрами различных типов резисторов, а также принципом их работы.

Пособие содержит краткие теоретические сведения, необходимые для успешного освоения дисциплины "Электроэлементы и передача данных в компьютерных системах", и является основным материалом для подготовки к лабораторным работам [1], их защиты и сдачи экзамена.

Автор благодарит за помощь коллектив кафедры "Проектирования и безопасности компьютерных систем", а также студентов НИУ ИТМО, принимавших активное участие при подготовке данного учебного пособия.

## 1. Общие свойства электрорадиоэлементов

Электроэлементом называется конструктивно завершенное, изготовленное в промышленных условиях изделие, способное выполнять свои функции в составе электрических цепей.

Любое устройство электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА) состоит из элементов. Их можно сгруппировать следующим образом.

1. Конструктивные элементы или детали. Они являются составной частью конструкции устройства и предназначены для механических соединений, передачи и направления движения – это: оси, валы, подшипники, скобы, планки и т.д.

2. Вспомогательные элементы – сочетают выполнение механических функций с электрическими. Это различные переключатели, реле, разъемы и т.п.

3. Электроэлементы – наиболее многочисленная и характерная для ЭВА часть элементов, образующая электрическую схему. Элементы могут иметь достаточно сложное устройство, но не допускают разделения на части и имеют самостоятельное функциональное назначение. К ним относятся резисторы, конденсаторы, трансформаторы, катушки индуктивности, полупроводниковые и оптоэлектронные приборы.

Наиболее многочисленными являются резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Их называют элементами общего применения или электрорадиоэлементами (ЭРЭ).

Элементы общего назначения являются изделиями массового производства, поэтому они подвергались достаточно широкой стандартизации. ГОСТ установлены технико-экономические и качественные показатели, параметры и размеры. Такие элементы называют типовыми.

Основными параметрами электроэлементов являются:

- номинальное значение величины, характерной для данного элемента (сопротивление – для резисторов, емкость – для конденсаторов, индуктивность – для катушек индуктивности);
- пределы допустимых отклонений параметров (в процентах от номинальной величины или класс точности);
- параметры, характеризующие электрическую прочность и способность длительно выдерживать электрическую нагрузку;
- номинальная мощность;
- параметры, характеризующие потери;

- характеристики стабильности;
- надежность, виброустойчивость, вибропрочность, срок службы и долговечность.

Рассмотрим перечисленные параметры ЭРЭ более подробно.

### 1.1. Номинальная величина

Она устанавливается соответствующим ГОСТ и указывается с помощью маркировки на элементе или на таре. Численное значение номинальной величины устанавливается рядами предпочтительных чисел, т.е. десятичными рядами геометрических прогрессий, первый член которых равен 1, а знаменатель  $q$  определяет количество номинальных значений в десятичном (от 1 до 10) интервале. Любой член такой прогрессии  $a_N$  равен:

$$a_N = q^{N-1},$$

где  $N$  – номер искомого члена.

Для номинальных значений параметров электроэлементов наиболее употребительны ряды предпочтительных чисел, которым присвоены обозначения Е6, Е12, Е24 и т.д.

Элементы этих рядов вычисляются соответственно следующим образом. Сначала определяются основания рядов:

$$q_6 = \sqrt[6]{10} = 1,47; \quad q_{12} = \sqrt[12]{10} = 1,21; \quad q_{24} = \sqrt[24]{10} = 1,1,$$

а, затем, подставляя в формулу значения  $q$ , определяем ряды:

Е6 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8.

Е12 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2.

Е24 1,0; ...

Е48 1,0; ...

Использование рядов предпочтительных чисел сокращает количество номиналов, уменьшает число типоразмеров элементов и удешевляет производство.

### 1.2. Допуск на параметр

Допускаемое отклонение фактической величины от номинальной называется допуском и указывается в процентах или с помощью класса точности.

ГОСТ 9664-61 определяет следующие стандартные отклонения действительной величины параметра от номинальной (в %).



...±0,01;±0,02;±0,05;±0,1;±0,2;±0,5;±1,0;±5,0;±10,0;±20,0;±30,0....  
1 2 3

Наиболее часто используются: 1, 2, и 3 классы точности. Класс точности не является показателем качества.

### 1.3. Параметры, характеризующие электрическую прочность

Электрическая прочность – это способность ЭРЭ выдерживать электрические нагрузки без потери работоспособности. Электрическую прочность характеризуют следующие напряжения.

$U_{ном}$  – максимальное напряжение, под которым при нормальных условиях (температура 15...25 °С; влажность 45...75 %, давление 650...800 мм.рт.ст.) элемент может находиться в течение гарантированного срока службы.

$U_{раб}$  – напряжение, соответствующее эксплуатационным условиям и требованиям надежности. Для соблюдения условий нормальной работы ЭРЭ должно выполняться неравенство:

$$U_{раб} < U_{ном}.$$

$U_{исп}$  – максимальное напряжение, под которым ЭРЭ может находиться небольшой промежуток времени (примерно несколько секунд).

$U_{проб}$  – минимальное напряжение, при котором наступает пробой изоляции ЭРЭ.

### 1.4. Номинальная мощность

Номинальная мощность ( $P_{ном}$ ) – максимально допустимая мощность, которую элемент может рассеивать в течение гарантированного срока службы при непрерывной электрической нагрузке и определенных условиях окружающей среды: температуры, влажности и атмосферном давлении, и при условии, что напряжение на элементе не превышает  $U_{ном}$ .

### 1.5. Параметры, характеризующие потери

На электрические параметры некоторых элементов схем большое влияние оказывает различные потери. Особенно они влияют на параметры колебательных контуров, так как определяют их активное сопротивление.

Активное сопротивление  $r$  складывается из:

- активного сопротивления проводников току высокой частоты;
  - сопротивлений, определяемых диэлектрическими потерями;
  - сопротивлений, вносимых экранами, сердечниками и различными деталями;
  - сопротивления, вносимого различными нагрузками.
- Рассмотрим некоторые из них.

1. Сопротивление проводников. Известно, что сопротивление прямолинейного проводника переменному току больше его сопротивления постоянному току (омическое сопротивление) из-за явления поверхностного или Скин-эффекта. Суть заключается в следующем. При прохождении по проводнику переменного тока образуется магнитное поле, под влиянием которого в проводнике возникает индукционный ток. Взаимодействие этого тока с основным вызывает перераспределение тока по сечению проводника так, что плотность тока в наружных частях сечения возрастает, а во внутренних – падает. С увеличением частоты ток сильнее отесняется к поверхности проводника, занимая все более тонкий слой. Рассмотрим схему этого явления (см. рис. 1.1).

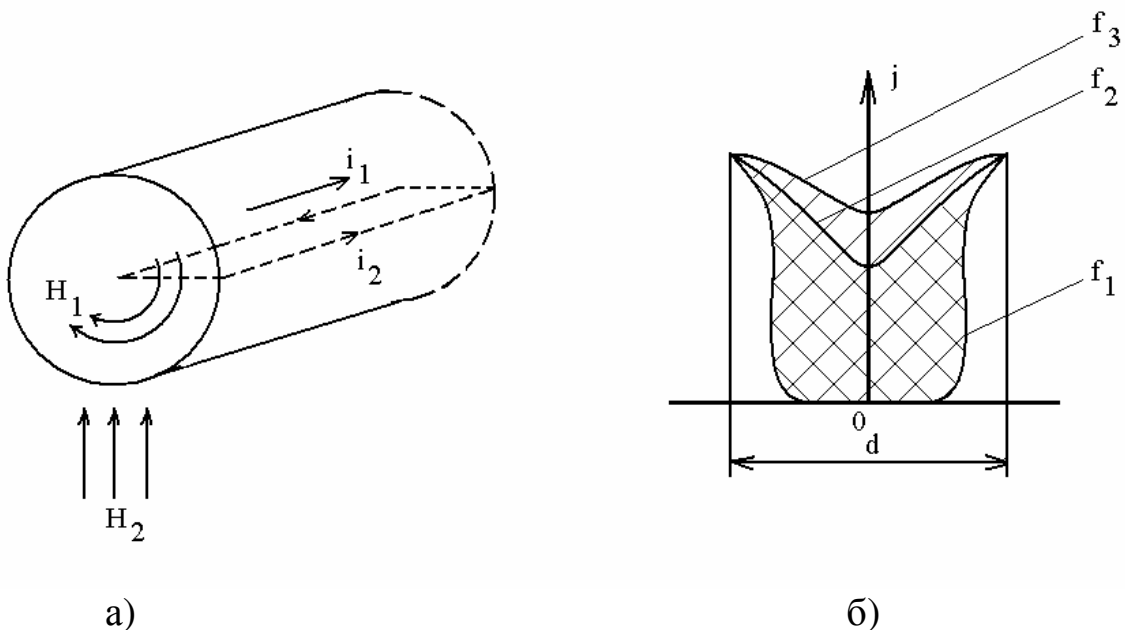


Рисунок 1.1. а) – возникновение скин-эффекта; б) – кривые распределения тока по сечению проводника при токах различной частоты:  $f_1 \supset f_2 \supset f_3$

В прямолинейном проводнике круглого сечения мгновенное направление переменного тока  $i_1$  указано стрелкой. Ток  $i_1$  возбуждает магнитное поле  $H_1$ , имеющего вид концентрических окружностей и

направленных по часовой стрелке. Это поле  $H_1$ , пронизывая проводник, возбуждает индукционный ток  $i_2$ , который создает вторичное магнитное поле  $H_2$ , направленное противоположно основному. Циркуляция тока  $i_2$  показана пунктирной линией и стрелкой. Линии тока  $i_2$  в наружных частях проводника совпадают, а во внутренних – они противоположны. Поэтому плотность тока в наружных слоях проводника возрастает, а во внутренних падает. Поэтому уменьшается действующее, или эффективное сечение проводника, что ведет к повышению сопротивления провода току высокой частоты, которое может быть в несколько раз выше значения сопротивления постоянному току.

Поверхностный эффект характеризуется глубиной проникновения тока  $\chi_3$ . Ее величина (в мм) для немагнитных материалов определяется :

$$\chi_3 = \frac{1}{2} \sqrt{\rho / f} ,$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$f$  – частота, МГц.

Глубина проникновения для магнитных материалов меньше в  $\sqrt{\mu}$  раз. С ростом температуры величина  $\chi_3$  увеличивается.

Оказывает влияние на величину сопротивления проводника и шероховатость поверхности (см. рис. 1.2). Удельное поверхностное сопротивление определяется как:

$$R_s = \frac{\rho}{\chi_3} = g \sqrt{f} ,$$

где  $g$  – табличный коэффициент.

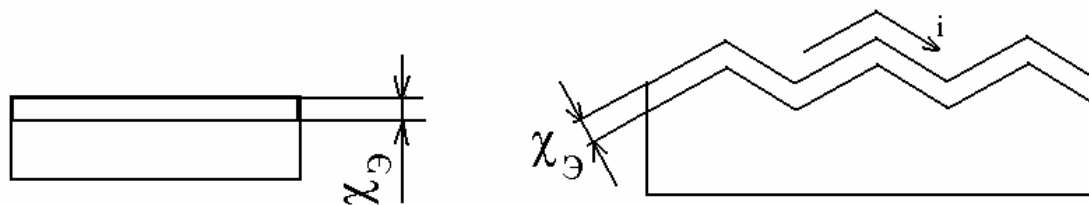


Рис. 1.2. Зависимость сопротивления проводника от шероховатости поверхности

Шероховатости удлиняют путь тока и увеличивают сопротивление проводника. А в совокупности с действующим Скин-эффектом сопротивление еще больше увеличивается и может достигать 50...100 % роста на частотах в сотни МГц. Для

предотвращения этого явления токопроводящие поверхности тщательно полируют и покрывают слоем серебра, тогда поверхность меньше подвергается окислению. Для защиты используется также покрытие слоем радия, потом  $Ag$ , потом снова радием.

Сопротивление криволинейного проводника может значительно отличаться от сопротивления прямолинейного проводника при всех прочих равных условиях. Это объясняется тем, что на любом участке криволинейного проводника распределение тока по сечению определяется как собственным магнитным потоком, так и магнитным потоком соседних участков. Поэтому ток оттесняется к внутренним участкам катушки, а активное сечение уменьшается (см. рис. 1.3). При этом действующее сечение уменьшается, сопротивление возрастает. Это явление называется эффектом близости и особенно сильно проявляется в проводниках, свернутых в виде спирали. Сопротивление может возрасти в несколько раз.

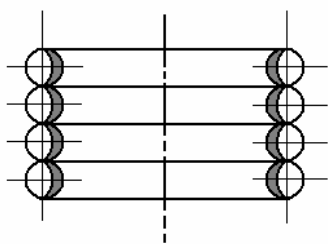


Рис. 1.3. Распределение плотности тока по сечению провода в катушке

2. Потери в диэлектрике. Они возникают в тех элементах, где имеется несовершенный диэлектрик, находящийся в переменном электрическом поле. Например, в конденсаторах, катушках индуктивности, переключателях, цоколях и панельках и т.п. Каждый такой случай можно уподобить наличию несовершенного диэлектрика в конденсаторе. Поэтому можно рассматривать диэлектрические потери в конденсаторе.

При невысоких напряжениях диэлектрические потери в основном вызываются замедленной поляризацией и проводимостью диэлектрика. Благодаря потерям в полной проводимости конденсатора появляется активная составляющая, которая изменяет угол сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением. В идеальном конденсаторе  $\varphi=90^\circ$ , в конденсаторе с потерями  $\varphi < 90^\circ$ .

Мощность потерь может быть выражена соотношением:

$$P_n = UI \cos(\varphi).$$

Величину  $\cos(\varphi)$  называют коэффициентом мощности и обычно выражают в процентах. При малых потерях, характерных для большинства элементов, величину потерь удобнее оценивать тангенсом угла потерь, который дополняет угол  $\varphi$  до  $90^\circ$ . Он представляет собой отношение мощности потерь  $P_n$  к полной реактивной мощности  $P_p$ , запасаемой конденсатором:

$$\operatorname{tg} \delta \cong \frac{P_n}{P_p}.$$

Для удобства расчетов конденсатор с потерями представляют в виде схемы замещения, состоящей из идеальной (без потерь) емкости и некоторого сопротивления, эквивалентного потерям. При этом используются как параллельная, так и последовательная схемы замещения. При этом справедливы следующие соотношения: для параллельной:

$$R = \frac{1}{\omega} C_D \operatorname{tg} \delta,$$

а для последовательной:

$$r = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega} C_D,$$

где:  $C_D$  – емкость конденсатора с потерями;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла потерь диэлектрика, вносящего потери;

$\omega$  – угловая частота, рад/с.

Векторные диаграммы приведены на рис 1.4.

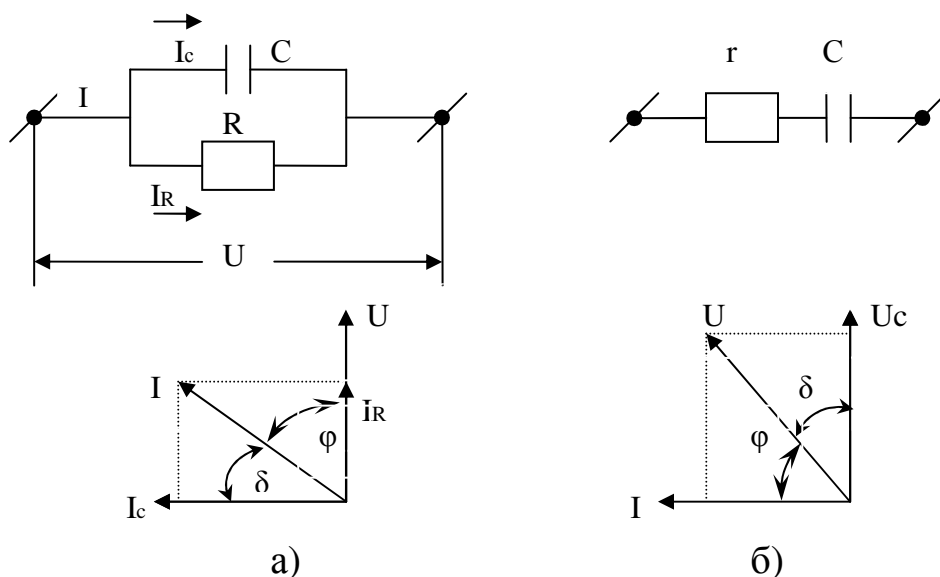


Рис. 1.4. Схемы замещения и векторные диаграммы для: а) – параллельного и б) – последовательного соединения

Параллельная схема лучше подходит для случая, когда преобладают потери в диэлектрике (проводимость), а последовательная – для случая преобладания потерь в обкладках и выводах.

Диэлектрические потери становятся значительными лишь при применении низкокачественных диэлектриков и на высоких частотах. При повышении температуры диэлектрические потери увеличиваются.

## 1.6. Характеристики стабильности

Стабильность параметров – это способность элементов сохранять свои первоначальные параметры в пределах, установленных ТУ и ГОСТ при воздействии внешних факторов.

Внешние воздействия делятся на климатические и механические.

К механическим воздействиям относятся вибрация и удары, а к климатическим – температура, влажность, атмосферное давление.

Наиболее существенное влияние на параметры оказывает колебание температуры. На ЭРЭ воздействует температура окружающей среды, подогрев со стороны других элементов, а также самонагрев ЭРЭ, связанный с выделением тепла. Под влиянием температуры происходит изменение размеров отдельных деталей и их взаимное перемещение, изменяются величина диэлектрической проницаемости диэлектриков и удельное электрическое сопротивление проводников.

Изменения, вызываемые температурой делятся на обратимые и необратимые. Обратимое изменение параметра – это такое, при котором параметр изменяется в соответствии с изменением температуры, а после установления первоначальной температуры параметр возвращается к своему исходному значению. Такие изменения характеризуются температурным коэффициентом (ТК).

ТК показывает относительное изменение величины параметра при изменении температуры на 1°.

ТКЕ ( $\alpha_c$ ) – температурный коэффициент емкости, ТКС ( $\alpha_r$ ) – сопротивления, ТКИ ( $\alpha_L$ ) – индуктивности. В математическом виде:

$$TKC = \Delta R / (R \cdot \Delta t), \quad TKE = \Delta C / (C \cdot \Delta t), \quad TKI = \Delta L / (L \cdot \Delta t).$$

Необратимые изменения – изменения при неоднократном воздействии температуры, когда параметр не возвращается к своему исходному значению при установлении первоначальной температуры.

Они характеризуются коэффициентом температурной нестабильности (КТН).

КТН – относительное изменение параметра после изменений его температуры:

$$КТНС = \beta_r = \Delta R/R, \quad КТНЕ = \beta_c = \Delta C/C, \quad КТНИ = \beta_L = \Delta L/L.$$

Необратимые изменения свидетельствуют о несовершенстве конструкции элемента, в котором могут возникать остаточные деформации и проявляться механизмы старения.

Изменение атмосферного давления наиболее сильно сказывается на электрической прочности: при понижении давления электрическая прочность падает. Для защиты элементов применяется герметизация.

Механические воздействия: вибрации, удары, растяжение, скручивание могут привести к обрыву проволочного вывода или нарушению целостности контактного узла, что приводит к катастрофическим отказам. Кроме того, может иметь место нарушение герметичности конструкции, растрескивание заливочного компаунда или опрессовочной пластмассы.

Для оценки влияния механических воздействий введем следующие понятия.

Вибропрочность – свойство противостоять разрушающему воздействию вибрации и после длительного ее воздействия сохранять способность к выполнению своих функций.

Виброустойчивость – способность выполнять свои функции в условиях вибрации.

Особенно опасен механический резонанс, когда частота собственных колебаний совпадает с внешней частотой.

## 1.7. Параметры надежности

Надежность – свойство элемента выполнять все заданные функции в течение требуемого времени при определенных условиях эксплуатации и сохранять основные параметры в пределах заранее установленных допусков.

Для количественной характеристики надежности применяются такие показатели, как: гарантийный срок службы, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и др.

Гарантийный срок службы – время, в течение которого изготовитель гарантирует надежную работу элемента, т.е. изменение параметров в течение данного срока не должно превышать значений, допускаемых ТУ.

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что время от включения элемента до первого отказа  $T$  больше некоторого заданного времени  $t$ .

Так как  $T > t$ , то:

$$p(t) = p(T > t).$$

Время  $T$  – случайная величина, а функция  $p(t)$  монотонно убывает от единицы до нуля. Статистически  $p(t)$  за время  $t$  определяется как отношение числа элементов нормально функционирующих к концу испытаний  $N_u$  к общему числу испытанных элементов  $N$ , подвергшихся испытаниям:

$$p(t) = \frac{N_u}{N},$$

где число исправных элементов можно определить как:

$$N_u = N - n(t),$$

где  $n(t)$  – число элементов, отказавших за время испытания.

Вероятность безотказной работы позволяет определить число элементов, нормально работающих к моменту времени  $t$ :

$$N_u = N \cdot p(t)$$

Интенсивность отказов – отношение количества элементов, отказавших в течение времени  $\Delta t$  к произведению количества работоспособных элементов к концу интервала времени  $\Delta t$  на его продолжительность:

$$\lambda = \frac{\Delta n(t)}{N_u \cdot \Delta t},$$

где:  $\Delta n(t)$  – число элементов, отказавших за время  $\Delta t$ .

Зависимость интенсивности отказов от времени может быть получена экспериментально и представлена на рисунке 1.5.

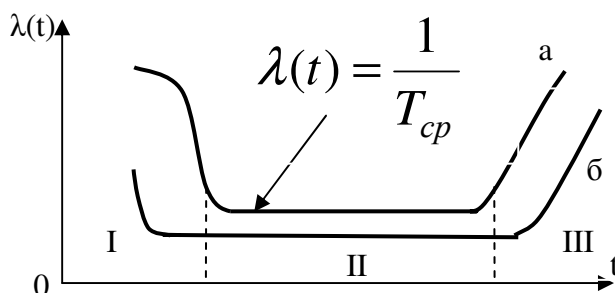


Рис. 1.5. Зависимость интенсивности отказов от времени работы. На рисунке 1.5 можно выделить три характерных участка.



I – приработка, когда из строя выходит большое количество элементов из-за проявления скрытых дефектов и производственного брака. Эти дефекты в ЭРЭ можно выявить тренировкой.

II – период нормальной работы. На этом участке  $\lambda \cong \text{const}$ .

III – период повышения числа отказов из-за естественного износа и старения. Указывает на необходимость ремонта или замены ЭРЭ.

Увеличить период нормальной работы можно облегченным режимом работы (см. рис. 1.5. (б)).

$\lambda(t)$  зависит от качества изготовления ЭРЭ, и определяется уровнем производства. Большое влияние оказывают такие факторы, как: отклонения от установленного ТП, разброс параметров исходных материалов, а также окружающая среда.

Для расчетов интенсивность отказов ЭРЭ можно определить из справочной литературы. Например, для резисторов постоянного сопротивления интенсивность отказов составляет  $(0,5...1) \cdot 10^{-7}$  1/ч, а для резисторов переменного сопротивления  $7 \cdot 10^{-6}$  1/ч.

Отказ элемента – случайное событие, заключающееся в том, что он перестает выполнять свои функции полностью или частично. Отказы могут быть полными и условными.

Полный отказ – нарушение электрической или механической прочности ЭРЭ (обрыв, временное или постоянное короткое замыкание, перегорание, пробой и т.д.).

Условный отказ – изменение какого-либо параметра ЭРЭ свыше некоторых пределов, установленных в ТУ. Незначительное изменение параметров может привести к существенному изменению показателей надежности. Условные отказы некоторых элементов приводят к условному отказу схем (падение коэффициента усиления, шумы и т.д.), а также могут вызвать полный отказ схемы.

Важным параметром, определяющим надежность ЭРЭ и узлов ЭВА, является коэффициент нагрузки  $K_n$ , который представляет собой отношение фактического значения параметра к номинальному. Например, для рассеиваемой ЭРЭ мощности:

$$K_n = \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{ном}}}.$$

При использовании ЭРЭ в предельных режимах интенсивность отказов возрастает в 5...10 раз (см. рис. 1.6 и таблицу 1.1).

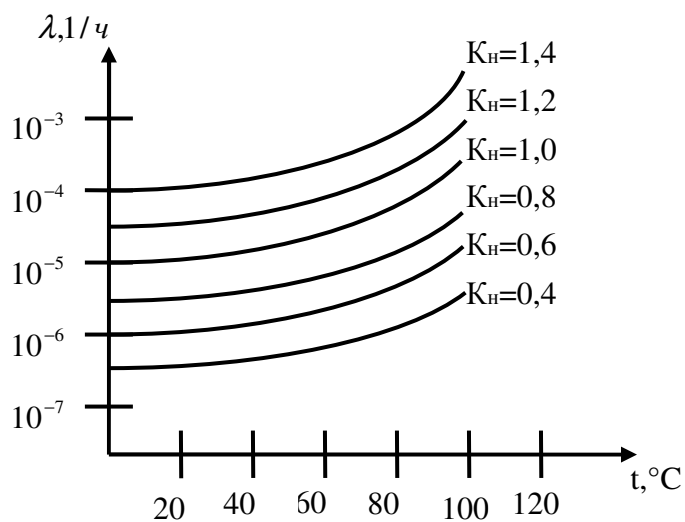


Рис. 1.6. Зависимость интенсивности отказов от нагрузки на ЭРЭ

Таблица 1.1.

Зависимость уровня нагрузки от интенсивности отказов

Уровень нагрузки	$\lambda(t)$ , 1/ч
Нижний	$2 \cdot 10^{-4}$
Низкий	$3 \cdot 10^{-5}$
Нормальный	$5 \cdot 10^{-6}$
Разгруженный нормальный	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Высокий	$5 \cdot 10^{-7}$
Разгруженный высокий	$10^{-7}$
Высший	$5 \cdot 10^{-8}$

## Контрольные вопросы

1. Поясните, как образуются номинальные значения резисторов?
2. Сколько номинальных значений будет содержать ряд E192?
3. Чем отличается допуск от класса точности?
4. Расположите параметры, характеризующие электрическую прочность ЭРЭ, в порядке возрастания.
5. Что произойдет с рассеиваемой мощностью при повышении температуры окружающей среды?
6. Как уменьшить влияние Скин-эффекта?
7. В чем заключается эффект близости? В каких электроэлементах он проявляется сильнее всего?
8. Какие параметры характеризуют стабильность резисторов?
9. Чем отличается КТНС от ТКС?
10. Каково влияние климатических факторов на стабильность параметров резисторов?
11. Как влияют механические воздействия на параметры резисторов?
12. Перечислите параметры надежности. Какие из них являются справочными величинами и указываются в документации на электрорадиоэлемент?
13. Что определяет коэффициент нагрузки?
14. От чего зависит надежность электрорадиоэлемента?
15. Как можно изменить надежность резистора и на каком этапе его жизненного цикла?
16. В чем особенность условного отказа элемента?
17. Каковы типичные значения интенсивности отказов для резисторов?

## 2. Резисторы: классификация, основные параметры

### 2.1. Классификация резисторов

Резистор – элемент, 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 долей Ом до ТОм ( $10^{12}$  Ом) с допускаемыми отклонениями  $\pm(0,001...30)$  %.

Классификация резисторов производится по характеру изменения сопротивления, назначению и материалу резистивного элемента (см. рис. 2.1).



Рис. 2.1. Классификация резисторов

Дадим разъяснения к рисунку 2.1.

Резисторы постоянного сопротивления 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.

По характеру изменения сопротивления резисторы делятся следующим образом. Резисторы переменного сопротивления

регулируемые применяются в качестве плавных регуляторов усиления, для точной и плавной установки напряжения (например, в регуляторах громкости). Подстроечные резисторы предназначены для точной установки сопротивления при разовой настройке и регулировке прибора при изготовлении и ремонте аппаратуры.

Резисторы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) предназначены для устройств автоматики, измерительных цепей автоматического регулирования и стабилизации токов и напряжений. К ним относятся варисторы, сопротивление которых зависит от приложенного напряжения, терморезисторы, сопротивление которых зависит от температуры, магниторезисторы и фоторезисторы.

По назначению резисторы могут быть разделены на элементы общего и специального назначения.

Резисторы общего назначения используются в качестве нагрузок, поглотителей 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 величину сопротивления. 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, обладающие определенными специфическими свойствами и параметрами, могут быть разделены на следующие виды.

1. Высокоомные резисторы – преимущественно композиционного типа с сопротивлением до  $10^{13}$  Ом применяются в устройствах для измерения очень малых токов: в дозиметрах различных излучений. Номинальная мощность обычно не указывается, а рабочие напряжения составляют 100...300 В. Типы: С5-23, КВМ (здесь и далее во втором разделе расшифровки будут даны ниже в соответствующих разделах, посвященных отдельным типам резисторов).

2. Высоковольтные резисторы – с сопротивлением до  $10^{11}$  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: КЛВ, СЗ-5, СЗ-6 и др.

3. Высокочастотные резисторы – преимущественно поверхностного типа, предназначены для аппаратуры, работающей на частотах свыше 10 МГц, кабелях, волноводах. Высокочастотные резисторы используют при конструировании высоко и сверхвысокочастотных трактов аппаратуры в качестве согласующих нагрузок, аттенуаторов, эквивалентов антенн, элементов волноводов, а также в измерительной приемно-передающей и радиолокационной аппаратуре.

Отличаются малой собственной емкостью и индуктивностью из-за отсутствия нарезки и выводов, а также защитной эмали. Номинальная мощность 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...9 и др.

4. Прецизионные и полупрецизионные резисторы – 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...1МОм.  $P_{ном}$  не более 10 Вт. Типы: БЛП, С2-10, С2-13 и др.

5. Миниатюрные резисторы – предназначены для малогабаритной аппаратуры.  $P_{ном}$  составляет 0,01...0,125 Вт, сопротивление до 5 МОм. Типы: УЛМ, КИМ и др.

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 резисторов проводится по типу проводящего элемента.

В соответствии с новой действующей системой существует сокращенное обозначение резисторов (см. табл. 2.1), состоящее из трех элементов [2].

В старой системе резисторы обозначались следующим образом.

- С – резисторы постоянные;
- СП – резисторы переменные;
- СТ – терморезисторы;

СН – варисторы.

Второй элемент обозначал вид резисторного элемента, а третий – тип разработки.

С1 – углеродистые и бороуглеродистые;

С2 – металлодиэлектрические и металлоокисные;

С3 – композиционные пленочные;

С4 – композиционные объемные;

С5 – проволочные;

С6 – металлопленочные;

С7 – полупроводниковые.

Таблица 2.1.

Классификация резисторов в зависимости от типа проводящего элемента

Элементы			Пример обозначения
Первый	Второй	Третий	
Р – резисторы, РП – резисторы переменные	1 – непроволочные, 2 – проволочные, металлофольговые	Порядковый номер разработки конкретного типа резистора	Р1-26 (постоянный непроволочный резистор с порядковым номером разработки 26)
ТР – терморезисторы с отрицательным ТКС, ТРП – терморезисторы с положительным ТКС.	Полупроводниковые материалы не обозначаются	Порядковый номер разработки	ТР-7 (терморезистор с отрицательным ТКС с порядковым номером разработки 7)
ВР – варисторы постоянные, ВРП – варисторы переменные	Полупроводниковые материалы не обозначаются	Порядковый номер разработки	ВРП-14 (варистор переменный с порядковым номером разработки 14)

Резисторы с такими обозначениями можно встретить как в аппаратуре, так и в продаже.

В еще более старой системе обозначений у резисторов был буквенный код, обозначающий тип резистора и его основные свойства, например, маркировка МЛТ означала, что резистор металлопленочный лакированный, термостойкий, а УЛМ – углеродистый лакированный, малогабаритный. Резисторы с такой маркировкой можно встретить в аппаратуре, но все реже и реже.

## 2.2. Основные параметры и свойства резисторов

Свойства резисторов характеризуются следующими основными параметрами:

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

Рассмотрим их более подробно.

**Величина сопротивления** ( $R_{ном}$ ) является основным параметром и определяется размерами проводящего элемента и свойствами его материалов.

Типичные конструкции проводящих элементов приведены на рисунке 2.2.

Для резисторов цилиндрической формы с проводящим элементом, нанесенным на изоляционную поверхность, когда толщина проводящей пленки мала по сравнению с диаметром основания (см. рис. 2.2. (а)), величина сопротивления определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{L}{\pi D h},$$

где:  $\rho$  – удельное сопротивление пленки;

$h$  – толщина пленки;

$L$  – длина пленки;

$D$  – диаметр основания.



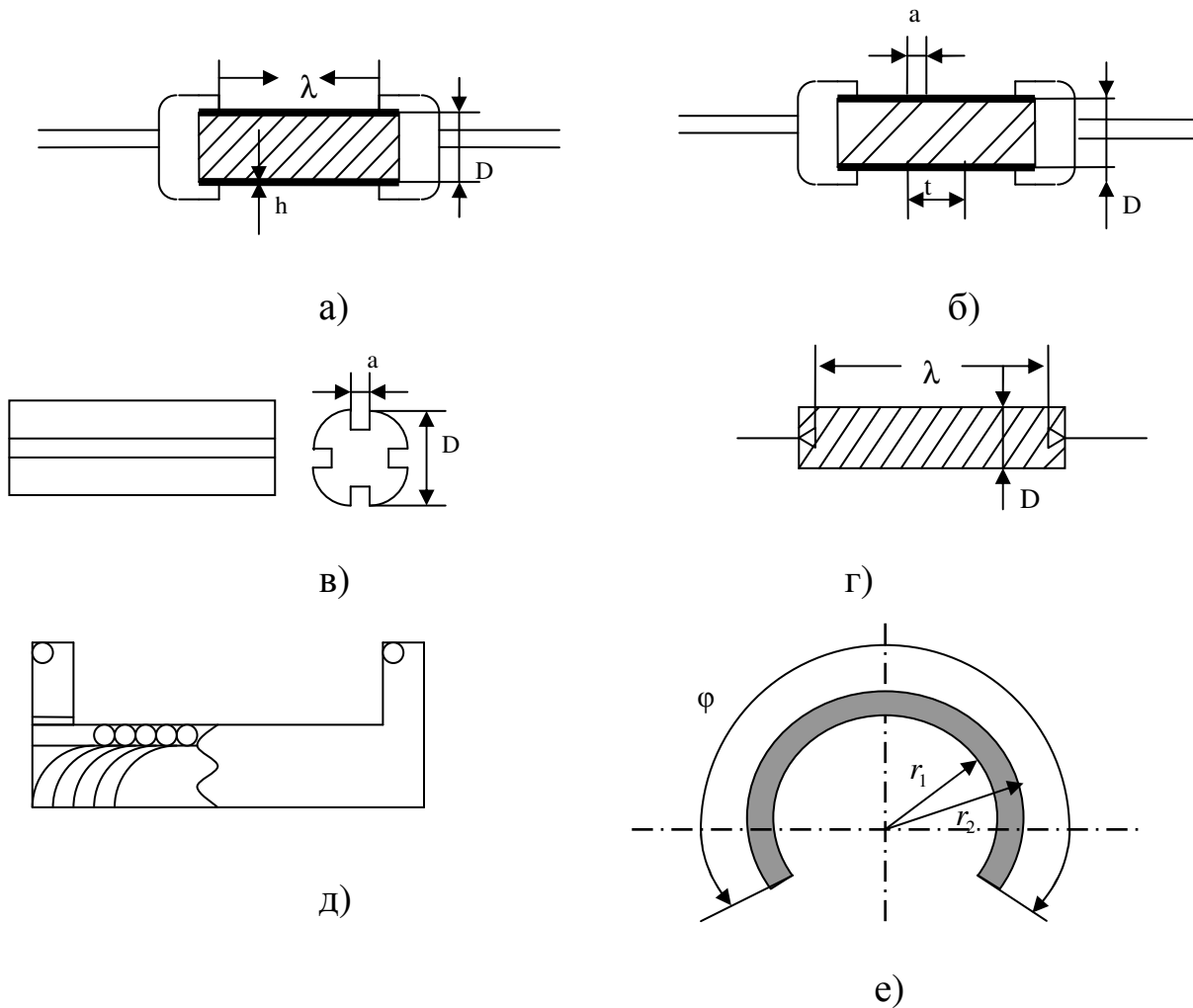


Рис. 2.2. Основные конструкции резисторов (пояснения смотри в тексте)

Величину сопротивления поверхностного типа можно изменить, если последовательно снимать части слоя проводящего элемента путем спиральной нарезки (рис. 2.2 (б)) или прорезанием изолирующих канавок (рис. 2.2 (в)). Это позволяет увеличивать сопротивление резисторов и свести к минимуму влияние переходного сопротивления в контактном узле на полное сопротивление резистора.

Для объемной конструкции (рис. 2.2 (г)) величина сопротивления определяется формулой:

$$R = \rho \frac{4L}{\pi D^2},$$

где  $D$  – диаметр проводящего элемента.

Сопротивление проволочных резисторов определяется длиной проволоки, ее удельным сопротивлением и площадью поперечного сечения (рис. 2.2 (д)):

$$R = \rho \frac{L}{S}.$$

В конструкциях резисторов переменного сопротивления применяются обычно подковообразные проводящие элементы (рис. 2.2 (е)).

Номинальные величины сопротивлений стандартизованы.

Для резисторов постоянного сопротивления согласно ГОСТ 2825-67 установлено 6 рядов: E6; E12; E24; E48; E96; E192, а для резисторов переменного сопротивления согласно ГОСТ 10318-80 установлен ряд E6. Число после буквы E указывает количество значений номиналов в каждом десятичном интервале.

На резисторы наносится буквенно-цифровая маркировка. Интересно, что систем маркировки достаточно много, а у некоторых производителей она 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 содержала номинальную мощность, номинальное сопротивление, допуск или класс точности и дату изготовления. Нередко на резисторе умещался и логотип завода-изготовителя. Номинальное сопротивление обозначалось цифрами с указанием единицы измерения следующим образом: Ом обозначались буквой "R", или "E", или вообще без буквы; кОм обозначались буквой "K", МОм – буквой "M", ГОм – буквой "G", или "G", ТОм – буквой "T" (тераомы).

Например, надпись "220E", или "220", или "220R", или "220Ω" обозначала номинал 220 Ом, 68K – 68 кОм, "3,3M" или "3M3" – 3,3 МОм, "4G7" – 4,7 ГОм, "1T", или "1TO" – 1 ТОм и т.д. (см. рис. 2.3 (а)-(в)).

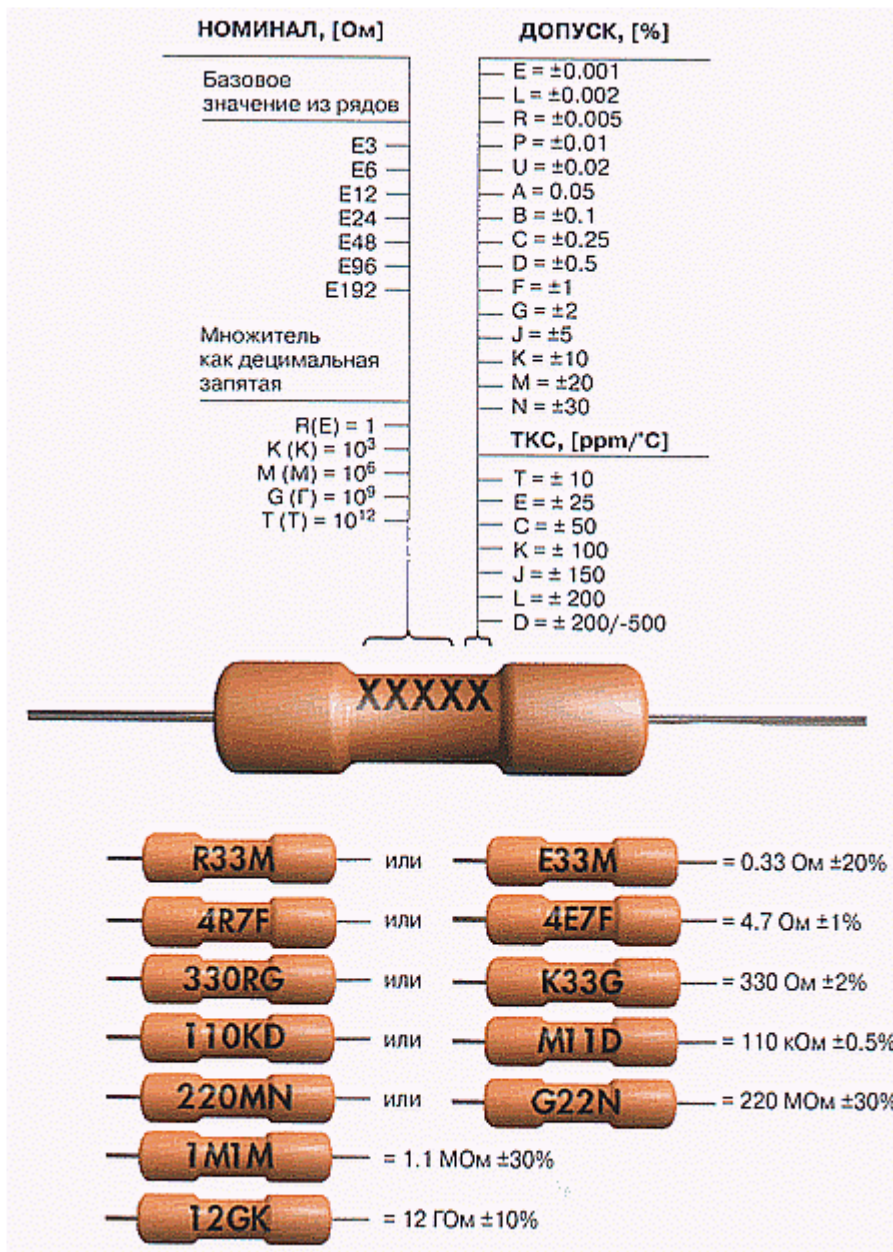


Рис. 2.3. а)

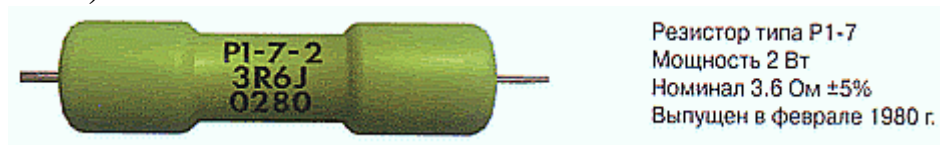
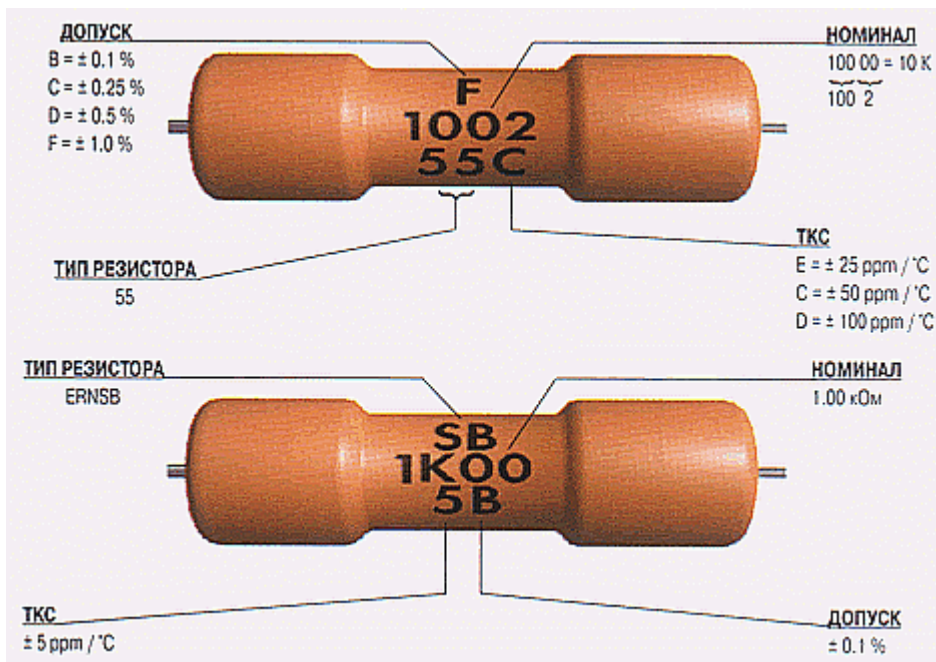


Рис. 2.3. б)



в)

Рис. 2.3 в). 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 производилась так, как указано на рисунке 2.4. 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). Вдобавок к этому такая 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 полоска 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 выше причинам, такая система маркировки резисторов очень неудобна, но она используется некоторыми производителями.

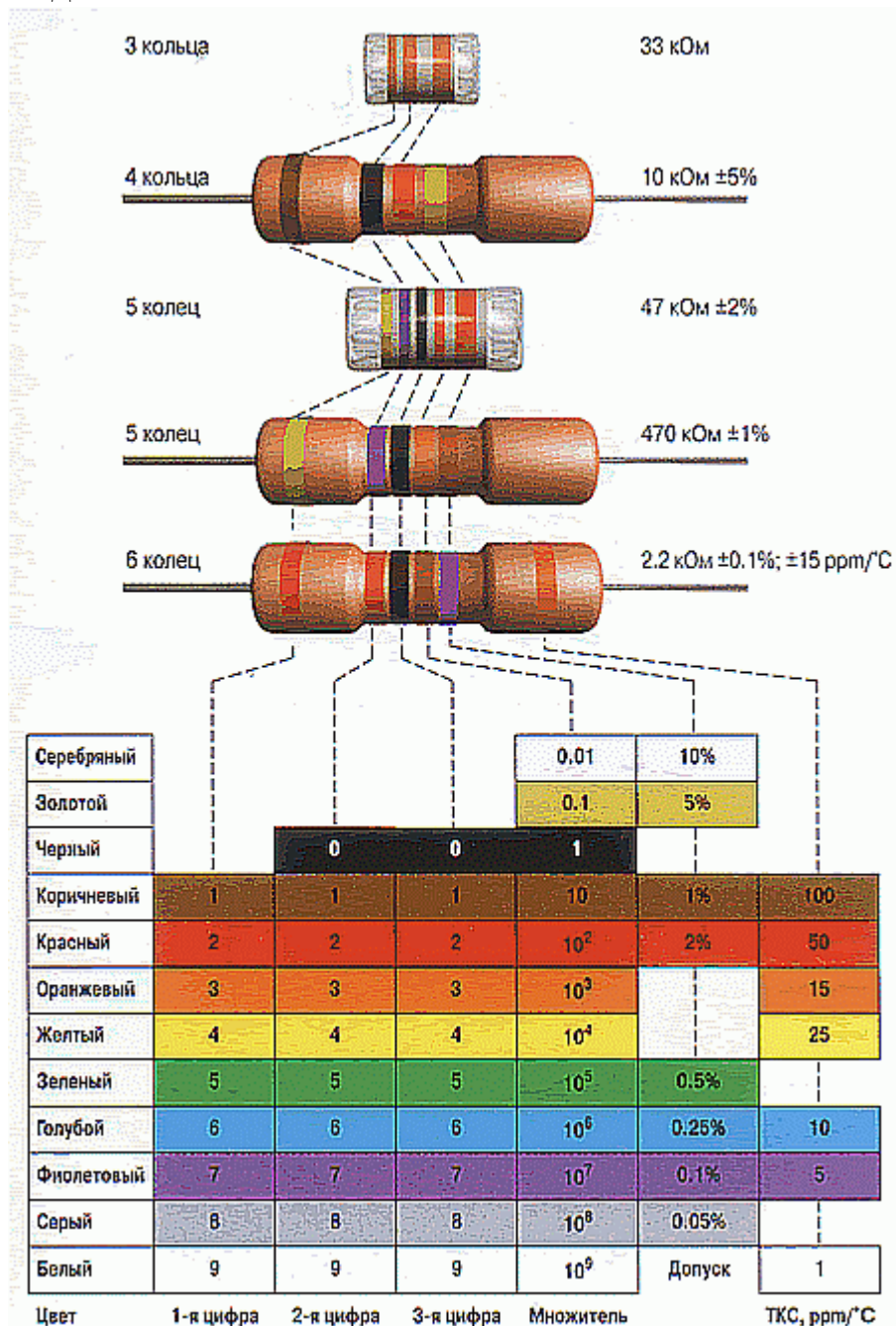
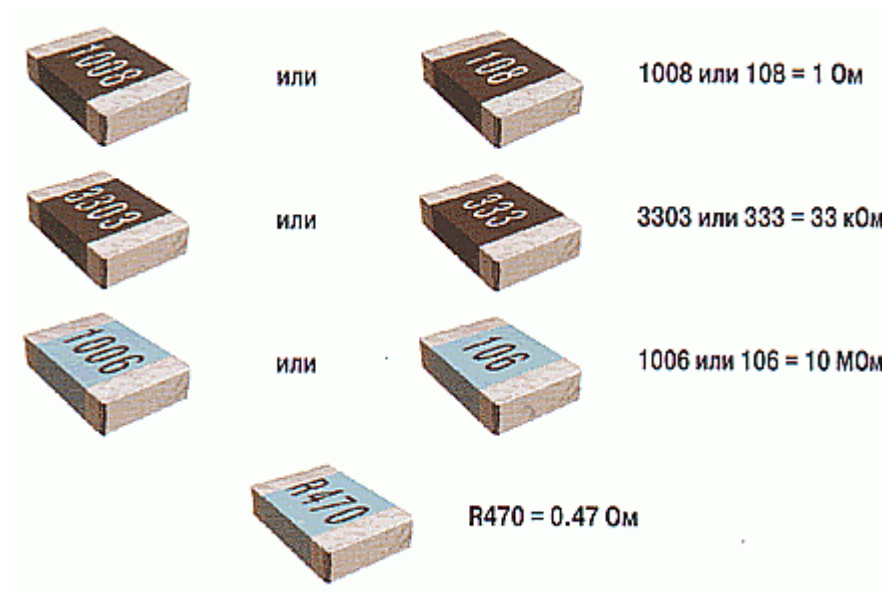
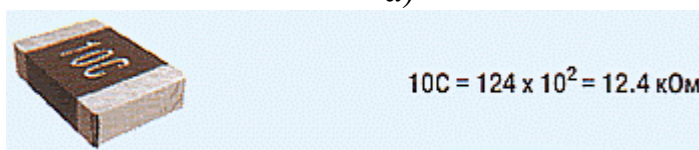


Рис. 2.4. Маркировка параметров резисторов с помощью цветных полосок

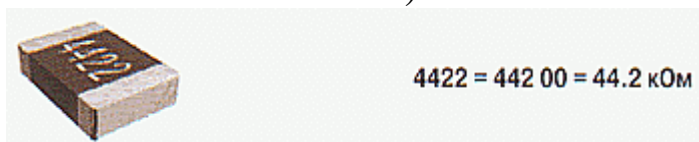
3. Современные резисторы для поверхностного монтажа (бескорпусные и безвыводные) потребовали другой системы маркировки. При размерах корпуса в несколько миллиметров имеется возможность размесить всего несколько знаков. Поэтому производители чип-компонентов используют преимущественно числовую кодировку и только номинала резисторов (см. примеры на рис. 2.5 (а)-(в)). 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 2.5 (г).



а)

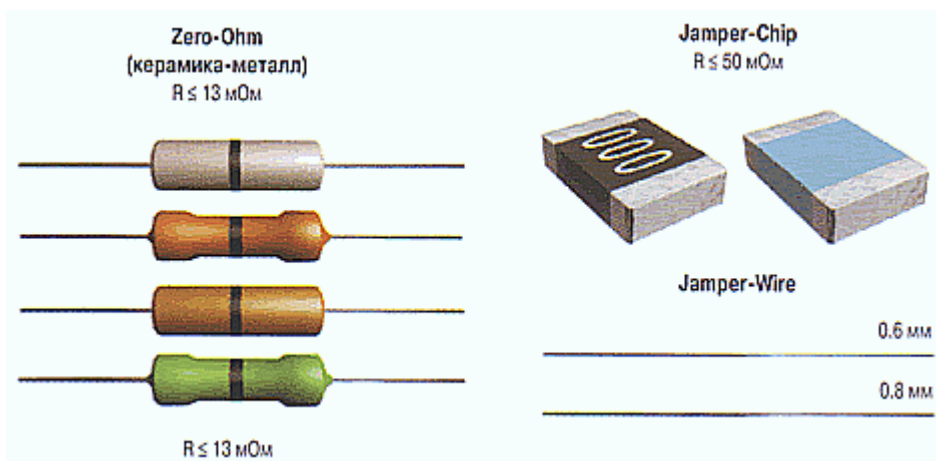


б)



в)

Рис. 2.5 а) – в).



г)

Рис. 2.5 г). Варианты кодировки номиналов резисторов для поверхностного монтажа

**Допустимое отклонение** или допуск указывается либо на ЭРЭ, либо в паспорте на электроэлемент, в зависимости от типа маркировки (см. рис. 2.3 (а)–(в) и 2.4). Согласно ГОСТ 9664-74 установлен ряд допусков:  $\pm 0,001$ ;  $\pm 0,002$ ;  $\pm 0,005$ ;  $\pm 0,01$ ;  $\pm 0,02$ ;  $\pm 0,05$ ;  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1$ ;  $\pm 2$ ;  $\pm 5$ ;  $\pm 10$ ;  $\pm 20$ ;  $\pm 30$  (%). Каждому отклонению соответствует свой класс точности, обозначаемый соответствующей буквой латинского алфавита. На ЭРЭ маркируется либо отклонение, либо класс точности.

В каждом конкретном случае выбираются резисторы с необходимым допуском, обеспечивая с заданной точностью режимы в электрических цепях.

**Номинальная мощность ( $P_{ном}$ )** – 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  $P_{ном}$  определяется конструкцией, физическими свойствами материалов проводящего элемента и защитного слоя. С повышением температуры окружающей среды  $P_{ном}$  снижается. С целью увеличения срока службы необходим запас по  $P_{ном}$ , что позволяет уменьшить изменение сопротивления в течение длительного периода времени и снизить влияние температуры.

Конкретные значения  $P_{ном}$  в Вт 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  $P_o$  (Вт/см<sup>2</sup>) определяется по формуле:

$$P_o = \frac{P}{S}.$$

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

$$U_{пред} \leq \sqrt{P_{ном} R_{ном}}.$$

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

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

Температура. Под ее влиянием возникают обратимые и необратимые изменения сопротивления резистора.

Обратимые изменения характеризуются ТКС ( $\alpha_r$ ), величина которого определяется свойствами материала элемента.

$$\alpha_r = \frac{\Delta R}{R \Delta T}.$$

Для проволочных резисторов ТКС имеет малое значение, практически не зависящее от температуры  $(0...2) \cdot 10^{-4}$  1/°С.

Необратимые температурные изменения сопротивления резистора возникают после длительного воздействия повышенных температур или после нескольких температурных циклов. Эти изменения вызваны структурными изменениями резистивного элемента и наблюдаются только у непроволочных резисторов.

Влажность. При воздействии влаги усиливаются окислительные и электрохимические процессы, которые сопровождаются необратимыми изменениями сопротивления. Для защиты резисторов применяют покрытия: лаками, эмалями, опрессовку пластмассами и герметизацию. Поэтому резисторы могут работать при влажности 90...98 %.



Старение. С течением времени происходит изменение сопротивления резистора, которое вызывается структурными изменениями резистивного элемента за счет кристаллизации, окисления и различных электрохимических процессов, а также за счет изменения свойств переходных контактов. Эти явления называются старением. Они в основном проявляются у непроволочных резисторов.

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

Имеют место два вида шумов.

1. Тепловые шумы – возникают в связи с изменением объемной концентрации электронов в проводнике за счет их теплового движения, поэтому между любыми точками проводника возникает напряжение колебательного характера.

ЭДС тепловых шумов определяется величиной сопротивления резистора, температурой и в полосе частот  $\Delta f$  может быть определена по формуле:

$$E_{\text{тепл}} = \sqrt{4kTR\Delta f},$$

где:  $k$  – постоянная Больцмана  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$T$  – абсолютная температура, К;

$R$  – сопротивление, Ом;

$\Delta f$  – полоса частот, Гц.

Тепловые шумы имеют место во всех типах резисторов.

2. Токовые шумы – возникают в проводниках с зернистой структурой из-за изменения контактных сопротивлений между зернами проводящего элемента (разрушение контакта, спекание частиц, электрохимические процессы, механические вибрации). Величина шума зависит от длины проводящего элемента, размера зерен и сопротивления. Чем больше сопротивление, чем дисперснее структура, чем длиннее резистивный элемент, тем токовые шумы меньше.

Таким образом, на концах резистора проявляется переменная составляющая напряжения различных частот. Действующее значение этой переменной составляющей напряжения  $E_m$ , отнесенного к постоянному напряжению  $U_R$ , приложенной к резистору, называется уровнем собственных шумов  $D$  (мкВ/В) и выражается как:

$$D = \frac{E_m}{U_R}.$$

Уровень шумов  $D$  обычно указывается для полосы частот от 50 Гц до 5 кГц и делится на 2 группы:

А, для которой  $D \leq 1$  мкВ/В;

Б, для которой  $D \leq 5$  мкВ/В.

Для резисторов специального применения  $D \leq 1$  мкВ/В.

Уровень собственных шумов в значительной степени зависит от качества контакта между резистивным элементом и выводами.

**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. Отказы вызываются как недостатками конструкции и технологии производства, так и неправильной эксплуатацией (электрические перегрузки, перегрев, слишком плотный монтаж и т.д.).

Для повышения надежности и увеличения периода работы, резисторы используют в облегченных (по мощности и напряжению) режимах в условиях хорошего охлаждения. Для этого выбирают  $K_n \approx 0,2 \dots 0,5$ .

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

В следующем разделе будут рассмотрены основные виды резисторов по типу их резистивного элемента.

## Контрольные вопросы

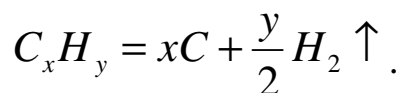
1. Как производится классификация резисторов?
2. Что содержит маркировка резисторов?
3. Как обозначается степень для обозначения сопротивления?
4. Как обозначается отклонение резисторов?
5. Перечислите основные виды кодирования параметров резисторов. В чем их отличия? Каковы свойства и область применения каждого из них?
6. Чем отличаются резисторы общего назначения от специального?
7. Для чего предназначены высокоомные резисторы. Какого типа они могут быть?
8. Где используются высоковольтные резисторы?
9. Для чего используются прецизионные и миниатюрные резисторы. В чем будет различие в их параметрах?
10. В чем отличие подстроечных от регулируемых резисторов переменного сопротивления?
11. Как можно защитить резистор от внешних воздействий?
12. Каков размах сопротивлений современных резисторов?
13. Что характеризует стабильность параметров сопротивления резисторов?
14. Что представляют собой шумы и чем они опасны?
15. В чем отличие теплового от токового шума?
16. Как уменьшить уровень шумов каждого типа?
17. Как определяется и в чем измеряется уровень шума?
18. Какова статистика отказов резисторов?
19. Что определяет коэффициент нагрузки?
20. Какие резисторы обладают высокой надежностью, низкой? Почему?

### 3. Типы резисторов

#### 3.1. Углеродистые и бороуглеродистые резисторы

Углеродистые резисторы – ЭРЭ поверхностного типа, проводящий элемент которых представляет собой пленку пиролитического углерода, полученную путем разложения углеводородов в вакууме или среде инертного газа при высокой температуре (940...1000 °С). Технология их производства была разработана в 1946...47 г.г. и они нашли широкое применение в РЭА.

Пиролитический углерод получают путем термического разложения паров углеводородов без доступа воздуха:



На практике разлагают гептан  $C_7H_{16}$ . Достоинства углеродистых резисторов определяются свойствами пиролитического углерода:

- высокая стабильность параметров;
- стойкость к импульсным перегрузкам;
- низкий уровень токовых шумов;
- небольшой и всегда отрицательный ТКС (однозначный);
- малая зависимость сопротивления от частоты и напряжения;
- термостойкость и химическая стойкость;
- возможность получения слоев с различной величиной сопротивления;
- относительно низкая стоимость.

Предельные номинальные сопротивления ограничены значениями 5...10 МОм. В этом состоит главное ограничение в использовании углеродистых резисторов.

Использование в качестве проводящих элементов бороуглеродистых пленок, позволило создать прецизионные резисторы с еще более лучшими значениями ТКС, чем у углеродистых.

К углеродистым резисторам общего назначения относятся резисторы типов: ВС – высокостабильные и их разновидности: ОВС – высокостабильные повышенной надежности и ВСЕ – высокостабильные покрытые эмалью. Конструкция углеродистых резисторов показана на рисунке 3.1.

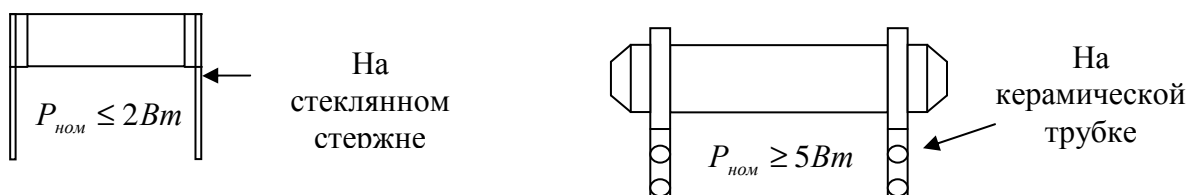


Рис. 3.1. Конструкции углеродистых резисторов

Параметры углеродистых резисторов сведены в таблицу 3.1 [3].

Таблица 3.1.

Параметры представителей углеродистых резисторов

Тип	Параметр	Значение
ВС высокостабильный	Температура окр. ср.	-60...+100 °С
	$R_{ном}$	27 Ом ... 10 МОм
	$P_{ном}$	0,25...10 Вт
	$U_{раб}$	До 1500 В
	Допуск	±5 %; ±10 %; ±20 %
	ТКС	$-(8...13) \cdot 10^{-2} 1/°C$
ВСЕ высокостабильный эмалированный	Температура окр. ср.	-60... +155 °С
	$R_{ном}$	27 Ом ... 240 кОм
	$P_{ном}$	0,25...10 Вт
С1-4	Температура окр. ср.	-55...+125 °С
	$R_{ном}$	1 Ом ... 22 МОм
	$P_{ном}$	0,125...3 Вт
	Допуск	±2 %; ±5 %; ±10 %
	$U_{раб}$	До 700 В
	ТКС	$-(2,5...15) \cdot 10^{-4} 1/°C$
С1-8	Температура окр. ср.	-60...+155 °С
	$R_{ном}$	10 Ом ... 10 МОм
	$P_{ном}$	0,125...1 Вт
	Допуск	±1 %; ±2 %; ±5 %
	ТКС	$-(5...10) \cdot 10^{-2} 1/°C$

К углеродистым резисторам специального назначения относятся: полупрецизионные, прецизионные, измерительные и высокочастотные резисторы. Технология их изготовления имеет следующие особенности:

- процесс пиролиза ведется при более высоком вакууме;
- тонкие слои углерода с пониженной стабильностью и с большим ТКС не применяются;

- снижается удельная нагрузка для уменьшения зависимости сопротивления от напряжения и нагрузки;
- улучшается контактный узел резистора;
- применяются герметизация резистора и искусственное временное старение.

Параметры и основные разновидности представлены в таблице 3.2. Резисторы типа БЛП предназначены для работы в измерительной аппаратуре, а содержание бора в проводящем элементе 2...5 % позволяет существенно снизить ТКС.

Резисторы типа УНУ изготавливаются в виде трубок, стержней, дисков, пластинок, шайб.

Таблица 3.2.

Параметры представителей углеродистых резисторов специального назначения

Тип	Параметр	Значение
УЛИ углеродистый лакированный измерительный	Температура окр. ср.	-60...+80 °С
	$R_{ном}$	0,75 Ом ... 1 МОм
	$P_{ном}$	0,1...1 Вт
	Допуск	±1 %; ±2 %; ±5 %
	ТКС	≈3·10 <sup>-2</sup> 1/°С
БЛП бороуглеродистый лакированный прецизионный	Температура окр. ср.	-60...+100 °С
	$R_{ном}$	1 Ом ... 100 кОм
	$P_{ном}$	0,1...1 Вт
	Допуск	±0,5 %; ±1 %
	$D$	Менее 5 мкВ/В
УЛМ углеродистый лакированный малогабаритный	Температура окр. ср.	-60...+100 °С
	$R_{ном}$	10 Ом ... 1 МОм
	$P_{ном}$	0,12 Вт
	Допуск	±5 %; ±10 %; ±20 %
	$U_{раб}$	До 100 В
	$D$	Менее 5 мкВ/В
УНУ углеродистый незащищенный ультравысоко- частотный	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	7,5 ... 100 Ом
	$P_{ном}$	До 100 Вт
	Допуск	±2 %; ±5 %; ±10 %;
	ТКС	-(5 ... 6)·10 <sup>-3</sup> 1/°С

### 3.2. Металлопленочные, металлоокисные и металло-диэлектрические резисторы

В металлопленочных резисторах в качестве резистивного элемента используется тонкая пленка специального сплава или металла, нанесенная на изоляционное основание методом вакуумного испарения или катодного напыления. Величина сопротивления определяется составом сплава и технологией нанесения пленки. Наиболее употребим: вольфрам (*W*), хром (*Cr*), титан (*Ti*), тантал (*Ta*) и др.

Юстировка высокоомных металлопленочных резисторов осуществляется путем нарезки спирали или создания продольных изолирующих полос. Применяется также лазерная подгонка, полирование.

Достоинства:

- повышенная термостойкость;
- малый коэффициент напряжения (изменение величины сопротивления при различных приложенных напряжениях);
- малый уровень собственных шумов;
- широкий диапазон номинальных значений сопротивления;
- хорошие частотные характеристики;
- стабильность, влагостойкость, меньшие размеры (по сравнению с углеродистыми резисторами).

Для основания металлопленочных резисторов используются различные материалы: керамика, стекла, слоистые пластики, ситаллы, обладающие хорошей адгезией с металлом.

Недостатком является сравнительно малая устойчивость к импульсным нагрузкам вследствие неоднородности проводящей пленки. В местах микронеоднородностей в импульсном режиме возникают локальные перегревы, что может привести к разрушению пленки.

Параметры основных разновидностей этого типа резисторов представлены в таблице 3.3.

Контактные узлы резисторов изготавливаются из титана. Для улучшения электрического контакта между проводящим слоем и металлическим колпачком на край проводящего слоя наносится никель.

Характерной особенностью металлопленочных резисторов является то, что они могут иметь как положительный, так и

отрицательный ТКС. Это необходимо учитывать при применении их в различных схемах.

Таблица 3.3.

Параметры представителей металлопленочных резисторов

Тип	Параметр	Значение
МТ металлопленочные термостойкие	Температура окр. ср.	-60...+200 °С
	$R_{ном}$	8,2 Ом ... 10 МОм
	$U_{раб}$	До 700 В
	$P_{ном}$	0,125...2 Вт
	$D$	1 мкВ/В
	ТКС	$\pm(0,12...16) \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
МЛТ металлопленочный лакированный термостойкий и ОМЛТ (то же повышенной надежности)	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	8,2 Ом ... 10 МОм
	$U_{раб}$	До 700 В
	$P_{ном}$	0,125...2 Вт
	$D$	1 мкВ/В
	ТКС	$\pm(0,12...16) \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
МГП металлопленочный герметизированный прецизионный	Температура окр. ср.	-40...+55 °С
	$R_{ном}$	10 кОм ... 5,1 МОм
	Допуск	$\pm 0,5 \%$ ; $\pm 1 \%$
	$U_{раб}$	До 400 В
	$P_{ном}$	0,5 Вт
	$D$	5 мкВ/В
	ТКС	$\pm(1...3) \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
МУН металлопленочный ультравысоко- частотный незащищенный	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	более 1 МОм
	$U_{раб}$	До 750 В
	$P_{ном}$	0,5...2 Вт
	ТКС	$\pm(0,12...16) \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$

**Металлоокисные** резисторы по своим свойствам близки к металлопленочным, но их технология более проста. Токопроводящий элемент – жаропрочные окислы металлов  $SnO_2$ ;  $Sb_2O_3$ ;  $ZnO_2$ . Наибольшее применение нашли резисторы на основе двуокиси олова  $SnO_2$ . Отличительными особенностями металлоокисных резисторов являются:

- более прочный контакт с основанием;
- повышенная термостойкость;
- стойкость к воздействию кислот и щелочей;



– невысокий ТКС.

Резисторы типов: МОН – металлоокисные низкоомные (см. рис. 3.1 (а)) и МОУ – металлоокисные ультравысокочастотные (см. рис. 3.1 (б) и (в)) могут работать с перегревом и перегрузкой по мощности.

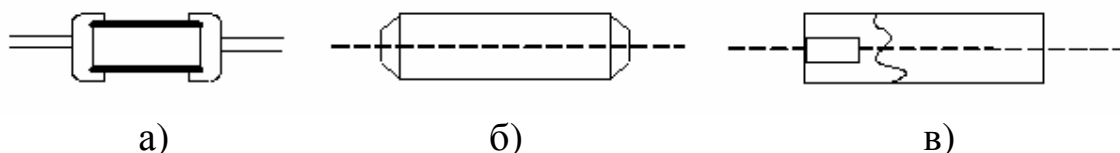


Рис. 3.1. Конструкции металлоокисных резисторов

Параметры и основные разновидности представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4.

Параметры представителей металлоокисных резисторов

Тип	Параметр	Значение
МОН металлоокисный низкоомный	Температура окр. ср.	-60...+200 °С
	$R_{ном}$	1...270 Ом
	Допуск	$\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$ ;
	$U_{раб}$	До 600 В
	$P_{ном}$	0,5...2 Вт
	ТКС	$\pm 5 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
МОУ металлоокисный ультравысоко- частотный	Температура окр. ср.	-60...+200 °С
	$R_{ном}$	10...150 Ом
	Допуск	$\pm 5\%$
	$U_{раб}$	До 17,5 кВ
	$P_{ном}$	0,1...200 Вт
	ТКС	$\pm (2...5) \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$

В металлодиэлектрических резисторах резистивный слой выполняется из сложных композиций, состоящих как из проводящих, так и диэлектрических компонентов.

Используют палладий, радий, окись кадмия, стекло, керамику, полимеры.

Металлизированные резисторы типа Сб-1...9 применяются для работы в диапазоне СВЧ вплоть до частот 26 ГГц. Они используются в аттенюаторах СВЧ, в измерительных цепях и т.д., конструктивно выполнены без выводов.

Параметры и основные разновидности представлены в таблице 3.5 [4,5].

Таблица 3.5.

Параметры представителей металлодиэлектрических резисторов

Тип	Параметр	Значение
С2-13 герметизированный С2-14 лакированный С2-15 опрессованный	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	1 Ом ...1 МОм
	Допуск	$\pm 0,1 \% \dots \pm 2 \%$
	$U_{раб}$	До 500 В
	$P_{ном}$	0,125...1 Вт
	$D$	1 мкВ/В
	ТКС	$\pm(0,25...3) \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
С6-2 Сверхвысоко- частотные специального назначения	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	10...75 Ом
	$f$	До 7 ГГц
	Допуск	$\pm 2 \%$
	$P_{ном}$	0,125...0,5 Вт
	ТКС	$\pm 3 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
С6-3 то же	Температура окр. ср.	-10...+125 °С
	$R_{ном}$	50 Ом
	$f$	До 18 ГГц
	Допуск	$\pm 1 \%; \pm 2 \%$
	$P_{ном}$	0,5 Вт
	ТКС	$\pm 2 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
Р1-1 пластинчатый неизолированный	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	50, 100 Ом
	$f$	До 4 ГГц
	Допуск	$\pm 1 \%; \pm 2 \%; \pm 5 \%$
	$P_{ном}$	5 Вт
	ТКС	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$

### 3.3. Композиционные резисторы

Проводящий слой композиционных резисторов состоит из смеси проводящего элемента, например, графита или сажи с органическими или не органическими связующими (фенольные и эфирные смолы) с наполнителем, пластификатором и отвердителем.

Технология производства композиционных резисторов позволяет получать резисторы с величиной сопротивления от долей Ом до нескольких ГОм.

Достоинства:

- возможность получения проводящего элемента любой формы;
- технология изготовления не требует сложного оборудования и дорогих материалов;
- возможность изменения величины сопротивления и значения ТКС за счет состава композиции и ее обработки;
- невысокая стоимость.

Недостатки:

- зависимость величины сопротивления от приложенного напряжения;
- значительный уровень собственных шумов;
- ограничения по частоте (при росте частоты растут диэлектрические потери);
- параметры резисторов зависят от температуры и влажности.

Большой уровень токовых шумов и частотная зависимость являются следствием зернистой структуры композиционных материалов. Поэтому композиционные резисторы не используются в высокочастотной и точной аппаратуре. Выпускаются резисторы с проводящим элементом объемного и пленочного типа. Первые получают путем прессования композиционной смеси, а вторые – нанесением суспензии на изоляционное основание. На рисунке 3.2 представлены представители КЛМ, КВМ и КИМ, а в таблице 3.6 даны их параметры.

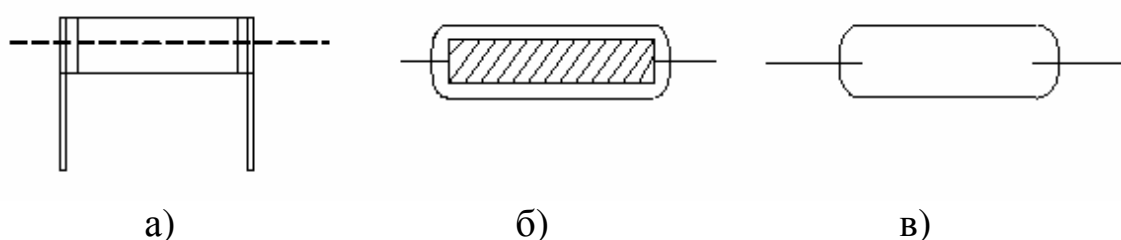


Рис. 3.2. Конструкции композиционных резисторов: а) – КЛМ; б) – КВМ; в) – КИМ

Представителями композиционных резисторов специального назначения являются КЭВ – композиционный эмалированный высоковольтный, а также ТВО и С4-1. Их параметры приведены в таблице 3.7. Резистивный элемент С4-1 объемного типа, защищен стеклокерамической оболочкой.

Таблица 3.6.

Параметры представителей композиционных резисторов

Тип	Параметр	Значение
КЛМ композиционный лакированный малогобаритный	Температура окр. ср.	-60...+100 °С
	$R_{ном}$	10 МОм ...1 ТОм
	Допуск	±5 % ... ±20 %
	$U_{раб}$	До 350 В
	$P_{ном}$	0,01 Вт
	Влажность	До 98%
	ТКС	$\pm(2,5) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$
КВМ композиционный вакуумированный малогобаритный	Температура окр. ср.	-60...+85 °С
	$R_{ном}$	15 МОм ...1 ТОм
	Допуск	±2 %; ±10 %; ±20 %
	$U_{раб}$	До 100 В
	Влажность	До 98%
	ТКС	$\pm(2) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$
КИМ композиционный изолированный малогобаритный	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	10 Ом ...1 ГОм
	Допуск	±5 %; ±10 %; ±20 %
	$U_{раб}$	До 200 В
	$P_{ном}$	0,05...0,125 Вт
	$D$	5 ... 15 мкВ/В
	Влажность	До 98%
	ТКС	$\pm(2) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$

Таблица 3.7.

Параметры представителей композиционных резисторов  
специального назначения

Тип	Параметр	Значение
ТВО композиционный теплостойкий и влагостойкий опрессованный	Температура окр. ср.	-60...+155 °С
	$R_{ном}$	3 Ом ...1 МОм
	Допуск	±5 %; ±10 %; ±20 %
	$U_{раб}$	До 750 В
	$P_{ном}$	0,125...60 Вт
	$D$	До 10 мкВ/В
	Влажность	До 98%
	ТКС	$\pm(1,2...1,8) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$

Продолжение таблицы 3.7.

Тип	Параметр	Значение
С4-1 для работы при повышенных температурах	Температура окр. ср.	-60...+350 °С
	$R_{ном}$	10 Ом ...1 МОм
	Допуск	$\pm 5\%$ ; $\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$
	$U_{раб}$	До 750 В
	$P_{ном}$	0,25...2 Вт
	$D$	До 10 мкВ/В
	Влажность	До 98%
	ТКС	$\pm(2) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$

### 3.4. Резисторы переменного сопротивления

Основным конструктивным элементом резистора типа СП (сопротивление переменное) является подковообразная пластина с нанесенным на одну из сторон проводящим слоем. Изменением положения щетки, скользящей по поверхности этого слоя, варьируют сопротивление между средним и крайними выводами (см. рис. 3.3). Кроме цилиндрических конструкций с вращательным движением подвижной системы выпускаются резисторы с поступательным движением в виде параллелепипеда. Корпуса переменных резисторов могут быть цилиндрические, квадратные, прямоугольные и фигурные.

Все переменные резисторы различаются по номинальной мощности, конструкции и виду функциональной характеристики. (ФХ) (см. рис. 3.3). ФХ зависит от угла поворота оси  $\varphi$  и может быть линейной (а), логарифмической (б) и обратно логарифмической (в). Резисторы с линейной характеристикой применяются в различных схемах для настройки режимов работы, а оставшиеся две – в основном для регулировки тембра и громкости. Резисторы с синусоидальными и косинусоидальными ФХ используются в устройствах автоматики и вычислительной техники. Другие типы ФХ используются в электрорадиоэлементах, изготавливаемых на заказ и имеют специальное назначение.

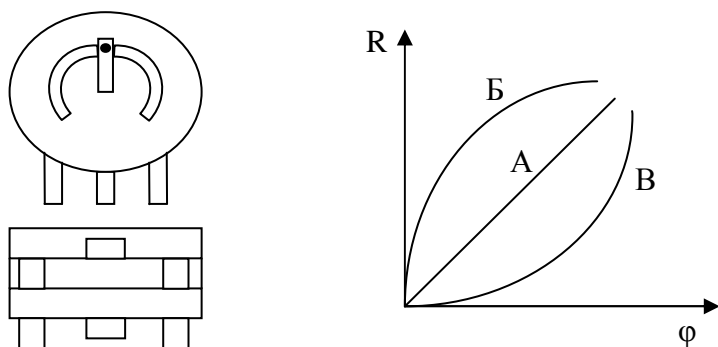


Рис. 3.3. Конструкция переменного сопротивления и его функциональная характеристика

Особыми параметрами резисторов переменного сопротивления являются следующие.

1. Шумы вращения – возникают за счет изменения переходного сопротивления, возникающего во время поворота подвижной системы и за счет возникновения термо ЭДС при быстром вращении движка из-за неоднородности структуры и дефектов в проводящем элементе и контактной щетке. Измерение шумов вращения производится на шумомере со скоростью 60...80 об/мин. Уровень шумов зависит от ряда параметров работы: состояния и структуры резистивного элемента и подвижного контакта, силы прижатия, скорости перемещения. У непроволочных переменных резисторов уровень шумов вращения значительно ниже по сравнению с проволочными конструкциями.

2. Износоустойчивость – способность сохранять свои первоначальные параметры при неоднократных вращениях подвижной системы. Износоустойчивость прецизионных резисторов составляет  $10^5 \dots 10^7$  циклов, резисторов общего назначения  $5 \cdot 10^3 \dots 10^5$  циклов, а подстроечных – не более  $10^3$  циклов [6].

По конструктивному исполнению СП делятся на группы, обозначаемые римской цифрой:

СП-I – без стопора оси;

СП-II – со стопором оси;

СП-III – без стопора, сдвоенные резисторы, состоящие из двух переменных резисторов;

СП-IV – со стопором, сдвоенные резисторы, состоящие из двух переменных резисторов;

СП-V – одинарный резистор без стопора оси и фиксаторов корпуса, для микромодульной аппаратуры.

В зависимости от допускаемых условий эксплуатации резисторы переменного сопротивления делятся на III группы (таблица

3.8). Параметры резисторов СПЗ приведены в таблице 3.9, а их разновидности – на рисунке 3.4 [3].

Таблица 3.8.

Параметры резисторов переменных сопротивлений по группам

Группа резисторов	Интервалы рабочих температур, °С	Допустимое значение относит. влажности воздуха, %	Атмосферное давление, не менее, мм. рт. ст.
I	-65...+125	98 (при +40 °С)	0,05
II	-65...+100	98 (при +40 °С)	5
III	-40...+70	85 (при +25 °С)	400

Таблица 3.9.

Параметры резистора типа СП

Тип	Параметр	Значение
СПЗ-4 регулируемый	Температура окр. ср.	-45...+70 °С
	$R_{ном}$	100 Ом ... 4,7 МОм
	Допуск	±20 %; ±30 %
	ФХ	А, Б, В
	$U_{раб}$	До 150 В
	$P_{ном}$	0,05 ... 0,25 Вт
	$D$	до 20 мкВ/В
	$U_{шумов\ перемещения}$	Не более 100 мВ
	Износостойчивость	До 25 тыс. циклов
	ТКС	До $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ 1/°С
СПЗ-25 регулируемый	Температура окр. ср.	-60 ... +100 °С
	$R_{ном}$	680 Ом ... 680 кОм
	Допуск	±20 %
	ФХ	А, Б, В
	$U_{раб}$	До 300 В
	$P_{ном}$	0,125 ... 0,5 Вт
	$D$	до 20 мкВ/В
	$U_{шумов\ перемещения}$	Не более 50 мВ
	Износостойчивость	До 20 тыс. циклов
	ТКС	До $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ 1/°С



Рис. 3.4. Разновидности резисторов СПЗ-4

Представителями переменных резисторов также являются.

СП-3 – композиционные резисторы пленочного типа. СП-3-1 до 10 применяются для печатного и объемного монтажа, для радиоприемных устройств, телевизионной аппаратуры, для микромодульных схем. СПЗ-7 – для работы в импульсных режимах и для аппаратуры со стереофоническим звучанием.  $R_{ном} = 1 \text{ кОм} \dots 4,7 \text{ МОм}$ .

СПЗ-19 и СПЗ-28 – на основе кермета, используются в цепях переменного и постоянного тока в импульсных режимах в микромодульной аппаратуре.

СПЗ-19 – корпус в виде прямоугольника или цилиндра.

СПЗ-28 – бескорпусной.

СПЗ-24, 34, 36 и 40 – многооборотные с линейными и нелинейными ФХ. Параметры некоторых резисторов указаны в таблице 3.10 [3,6].

СПЧ – проводящий элемент запрессовывается в керамику. Выпускается только с линейной характеристикой. Параметры приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10.

Параметры представителей переменных резисторов

Тип	Параметр	Значение
СПЗ-24 сопротивление переменное многооборотного типа	Температура окр. ср.	-45...+70 °С
	$R_{ном}$	4,7 Ом ...1 МОм
	Допуск	±20 %; ±30 %
	ФХ	А, Б, В
	$U_{раб}$	До 110 В
	$P_{ном}$	0,125; 0,25 Вт
	$D$	До 40 мкВ/В
	<i>Износостойчивость</i>	До 1000 циклов
ТКС	±(0,2)·10 <sup>-3</sup> 1/°С	



Продолжение таблицы 3.10.

Тип	Параметр	Значение
СПЗ-19, СПЗ-28 керметные	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	10 Ом ... 1 МОм
	Допуск	$\pm 10\%$ ; $\pm 20\%$
	ФХ	А
	$U_{раб}$	До 150 В
	$P_{ном}$	0,125... 0,5 Вт
	$D$	До 20 мкВ/В
	Износоустойчивость	До 500 циклов
	ТКС	$\pm(0,5) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$

### 3.5. Проволочные резисторы

У таких резисторов проводящий элемент в виде проволоки на основе высокоомных сплавов (манганин, нихром, константан) наматывается на какой-либо каркас [7].

Проволочные резисторы способны рассеивать значительные мощности, причем, компонент, рассчитанный на мощность 50 Вт, является достаточно распространенным, а возможно найти компоненты, рассчитанные на мощности до 1 кВт (см. рис. 3.5).



Рис. 3.5. Конструкция проволочного резистора

Высокоомная проволока или лента навивается на стержень, а затем ее концы привариваются к торцевым колпачкам, к которым впоследствии привариваются выводы резистора. Резисторы, имеющие небольшую мощность рассеяния (до 20 Вт), затем покрываются керамической глазурью, предотвращающей смещение витков проволоки, а также герметизирующей сам элемент. Резисторы,

рассчитанные на большие мощности, могут иметь навинчивающиеся торцевые колпачки и устанавливаться в прессованные алюминиевые экраны, обеспечивающие хороший теплоотвод от резистивного элемента к внешнему теплоотводящему радиатору. Однако резисторы с высокими значениями сопротивлений имеют, как правило, большое количество плотно расположенных витков из тонкого высокоомного провода, поэтому вероятность развития дугового разряда между соседними витками определяет величину рабочего напряжения.

Преимущества [8,9]:

- высокая стабильность электрических параметров;
- малый ТКС;
- незначительный собственный шум;
- повышенная точность.

Недостатки:

- сравнительно высокая стоимость;
- значительная собственная индуктивность и емкость;
- большие габариты в связи с трудностями получения тонких длинных проводов из различных металлов и сплавов.

Интересен следующий факт. Зная, что приближенно величина сопротивления проволочного однослойного резистора пропорциональна:

$$R \propto \frac{1}{d^3},$$

а индуктивность:

$$L \propto \frac{1}{d^2},$$

то отношение величин:

$$\frac{L}{R} \propto d,$$

пропорционально диаметру провода, поэтому величина соотношения  $L$  к  $R$  будет возрастать при использовании более толстого провода. Из-за этого резисторы, в которых использован низкоомный провод будут обладать более высокими значениями индуктивности. А для резисторов с сопротивлением больше 10 кОм индуктивность будет пренебрежимо мала.

Наиболее широкое применение получили проволочные резисторы типов: ПЭ – проволочный эмалированный (рис. 3.6 (а)); ПЭВ – влагостойкий; ПЭВР – регулируемый (рис. 3.6 (б)).

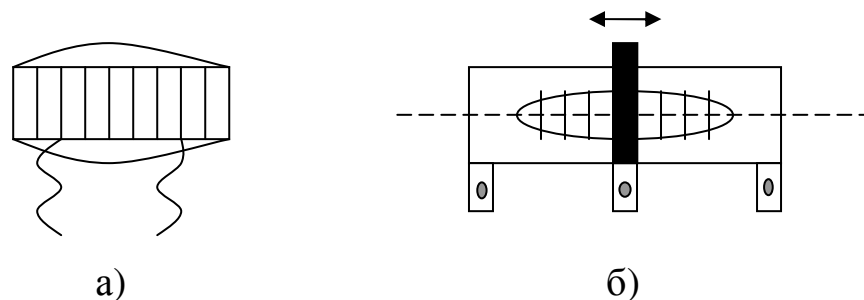


Рис. 3.6. Конструкции проволочных резисторов

Параметры представителей проволочных резисторов приведены в таблице 3.11.

Некоторые представители многослойных проволочных резисторов [10-12]:

ПТ – проволочный точный;

ПТН – проволочный точный из нихрома;

ПТМ – проволочный точный из манганина;

ПТМН – проволочный точный малогабаритный из нихрома;

СП5-5 – на керамическом основании;

СП5-6 – помещен в защитный корпус.

Параметры СП5 указаны в таблице 3.11.

Другой разновидностью проволочных резисторов являются переменные резисторы на их основе (см. рис. 3.7). Представители:

ПП 1-1...9 – низкоомные;

ПП 3-1...47 – высокоомные;

а) одинарные без выключателя;

б) одинарные с выключателем;

в) двойные, все без выключателя  $R_{ном} = 2,2 \text{ Ом} \dots 20 \text{ кОм}$ .

Для микромодульной аппаратуры используются переменные проволочные резисторы типа СП5-1...15. Параметры некоторых проволочных переменных резисторов указаны в таблице 3.12 [6].

Рис. 3.7. Проволочный переменный резистор (без кожуха):

1 – обмотка; 2 – скользящий контакт; 3 – токосъемник; 4 – вывод движка; 5 – вывод концов обмотки; 6 – каркас; 7 – ручка

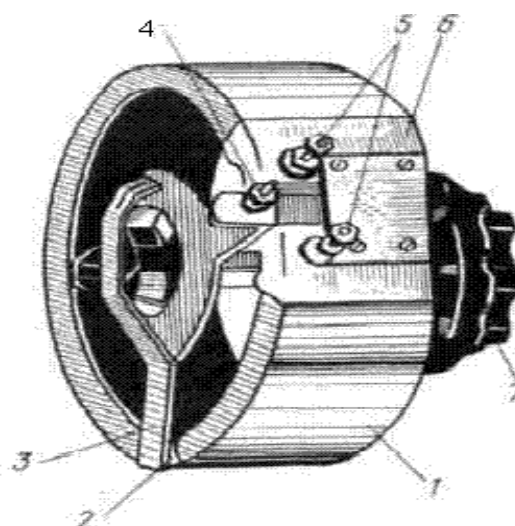


Таблица 3.11.

Параметры представителей проволочных резисторов

Тип	Параметр	Значение
ПЭ проволочный эмалированный	Температура окр. ср.	-60...+155 °С
	$R_{ном}$	3 Ом ...51 кОм
	Допуск	±5 %; ±10 %
	$P_{ном}$	3...150 Вт
	ТКС	±0,5·10 <sup>-3</sup> 1/°С
ПЭВ проволочный эмалированный влагостойкий	Температура окр. ср.	-60...+155 °С
	$R_{ном}$	1 Ом ...56 кОм
	Допуск	±5 %; ±10 %
	$U_{раб}$	До 1,4 кВ
	$P_{ном}$	7,5...100 Вт
	ТКС	±(5)·10 <sup>-4</sup> 1/°С
С5-16 проволочные прецизионные	Температура окр. ср.	-60...+155 °С
	$R_{ном}$	0,1 Ом ...10 Ом
	Допуск	±0,5%; ±1%; ±2%; ±5%
	$U_{раб}$	До 350 В
	$P_{ном}$	1...10 Вт
	ТКС	±1,5·10 <sup>-4</sup> 1/°С
С5-23 для цепей постоянного тока высоковольтный	Температура окр. ср.	+10 ...+40 °С
	$R_{ном}$	200 МОм
	Допуск	±2%
	$U_{раб}$	До 25 кВ
	ТКС	±3·10 <sup>-5</sup> 1/°С
	Масса	До 1 кг
С5-40 высоковольтные для импульсного режима работы, малоиндуктивные	Температура окр. ср.	-60 ...+300 °С
	$R_{ном}$	10 Ом ... 10 кОм
	Допуск	±5%; ±10%
	$U_{раб}$	До 35 кВ
	$P_{ном}$	10 ... 500 Вт
	$\tau$	(2 ... 100)·10 <sup>-9</sup> с
	ТКС	±2,4·10 <sup>-4</sup> 1/°С

Таблица 3.12.

## Параметры представителей проволочных переменных резисторов

Тип	Параметр	Значение
ПЭВР сопротивление переменное эмалированное, влагостойкое, регулируемое	Температура окр. ср.	-60...+155 °С
	$R_{ном}$	3 Ом ... 2,7 кОм
	Допуск	±5 %; ±10 %
	$U_{раб}$	До 1400 В
	$P_{ном}$	10 ... 100 Вт
	ТКС	±5·10 <sup>-4</sup> 1/°С
ПП2-11...22	Температура окр. ср.	-60...+85 °С
	$R_{ном}$	4,7 Ом ... 20 кОм
	Допуск	±10 %
	$U_{раб}$	До 350 В
	$P_{ном}$	2 Вт
	ФХ	А
	<i>Износоустойчивость</i>	До 2500 циклов
ПП3-1...19	Температура окр. ср.	-60...+100 °С
	$R_{ном}$	3,3 Ом ... 20 кОм
	Допуск	±5 %; ±10 %
	$U_{раб}$	До 350 В
	$P_{ном}$	3 Вт
	ФХ	А
	<i>Износоустойчивость</i>	До 5000 циклов
СП5-2,3 Подстроечные частотой до 10 кГц	Температура окр. ср.	-60...+155 °С
	$R_{ном}$	100 Ом ... 47 кОм
	Допуск	±5 %; ±10 %
	$U_{раб}$	До 300 В
	$P_{ном}$	0,5 ... 1 Вт
	ФХ	А
	<i>Износоустойчивость</i>	До 200 циклов
СП5-35,40 регулируемые	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	33 Ом ... 68 кОм
	Допуск	±10 %
	$U_{раб}$	До 500 В
	<i>Разр. способность</i>	До 0,0005%
	$P_{ном}$	0,5 ... 5 Вт
	ФХ	В виде ломаной кривой
	<i>Износоустойчивость</i>	До 10 тыс. циклов

Для переменных проволочных резисторов характерным параметром является разрешающая способность. Она зависит от числа витков резистивного элемента и определяется изменением сопротивления при перемещении подвижного контакта на один виток. Чем больше витков содержит резистивный элемент, тем выше разрешающая способность. Разрешающая способность резисторов общего применения находится в пределах 0,1...3 %, а прецизионных – до тысячных долей процента [6].

Резисторы СП5-35 и СП5-40 – специальные с повышенной электрической разрешающей способностью. В их конструкции предусмотрены две подвижные системы: при повороте вала вначале осуществляется поворот точной системы, а когда она доходит до упора, то начинает поворачиваться подвижная система грубого изменения сопротивления.

Шумы вращения проволочных переменных резисторов значительно больше, чем у пленочных и составляют величину 15...30 мВ.

### **3.6. Металлофольговые резисторы**

Резистивный элемент выполняется из фольги, прикрепленной к изоляционной подложке плоской или цилиндрической формы. Толщина фольги 0,002...0,1 мм. Материалом фольги служат высокоомные сплавы: манганин, константан, никеля с молибденом и чистый никель. Металлофольговые резисторы сочетают достоинства проволочных: низкий уровень шумов, высокая точность (до  $\pm 0,001\%$ ) и стабильность; и пленочных резисторов: технологичность, широкий частотный диапазон и диапазон номинальных значений (до десятков МОм).

С изменением температуры возможны внутренние напряжения из-за различных коэффициентов температурного расширения фольги и подложки. При правильном подборе материалов подложки и фольги, изменения сопротивлений можно скомпенсировать.

Используются в медицине, точном приборостроении, связи, компьютерной технике, автоэлектронике, для военного и космического применения и т.д.

Для использования в микросборках выпускают, например, металлофольговые прецизионные резисторы типов С5-61, 62, которые предназначены для работы в высокочастотных цепях прецизионной измерительной

аппаратуры и вычислительной техники. Резисторы С5-61 предназначены для печатного монтажа, а С5-62 – для навесного монтажа в гибридных интегральных схемах. Параметры представителей металлофольговых резисторов представлены в таблице 3.13 [13,14].

Еще одна область применения металлофольговых резисторов – в качестве тензодатчиков [15].

Тензорезисторы прямоугольного и розеточного типа, предназначены для измерения деформации деталей машин, металлоконструкций и т.д. при статических нагрузках, а также в качестве чувствительных элементов силоизмерительных датчиков в условиях макроклиматических районов с умеренным и холодным климатом. Конструкция тензорезисторов приведена на рис. 3.8. Их размер – не более 8,2x10 мм.

Таблица 3.13.

Параметры некоторых представителей металлофольговых резисторов

Тип	Параметр	Значение
С5-61, 62 металлофольговый прецизионный	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	до 30 кОм
	Допуск	$\pm 0,005 \% \dots \pm 1 \%$
	$P_{ном}$	0,125 Вт
	$U_{раб}$	До 250 В
	Разр. способность	До $\pm 0,005 \%$
	ТКС	$\pm (1 \dots 2) \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$
С5-25Ф и С5-53Ф металлофольговые прецизионные	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	30 Ом ... 10 кОм
	Допуск	$\pm 0,05 \% \dots \pm 1 \%$
	ТКС	$(0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$
Р2-67 металлофольговые прецизионные защищенные изолированные	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	1 Ом ... 20 кОм
	Допуск	$\pm 0,005 \% \dots \pm 1 \%$
	$U_{раб}$	До 250 В
	$P_{ном}$	0,125 ... 0,5 Вт
	ТКС	$\pm (0,5 \dots 3) \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$
2ФКП-5-200 металлофольговый тензорезистор	Температура окр. ср.	-50...+70 °С
	$R_{ном}$	200 Ом
	Допуск	$\pm 0,35 \% \dots \pm 1 \%$
	$I$	До 25 мА
	Чувствительность	1,9...2,3

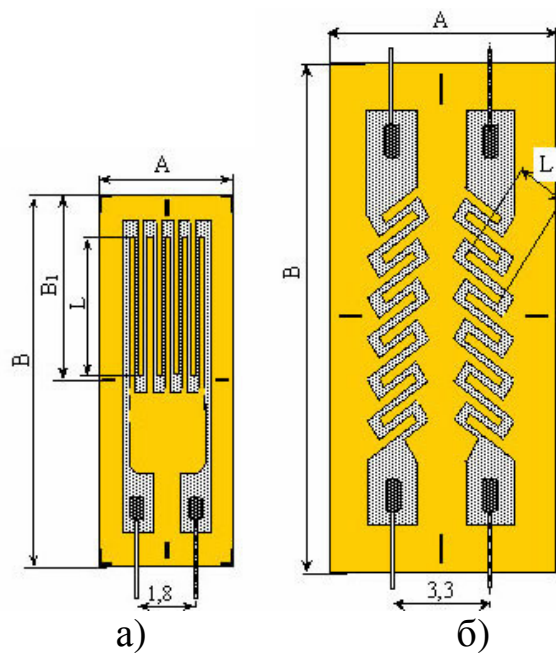


Рис. 3.8. Конструкции тензорезисторов: а) типа 2ФКП-5-200,400; б) типа 2ФКРВ-3-400



## Контрольные вопросы

1. За счет чего у углеродистых резисторов небольшой диапазон номинальных значений?
2. Для чего к углероду добавляют бор?
3. Какие достоинства у углеродистых резисторов?
4. Что входит в состав композиционных резисторов?
5. Какие достоинства и недостатки у композиционных резисторов?
6. Какие параметры переменных резисторов присущи только им?
7. Для чего служат сдвоенные, строенные и счетверенные резисторы переменного сопротивления?
8. От чего зависит уровень шумов вращения переменного резистора?
9. Почему для подстроечных резисторов переменного сопротивления параметр износоустойчивость не является критичным?
10. В чем особенность переменных проволочных резисторов?
11. Что показывает износоустойчивость переменных резисторов?
12. В чем достоинства металлофольговых резисторов?
13. Чем определяется высокая стабильность параметров фольговых резисторов?
14. Для чего служат тензодатчики?

## 4. Полупроводниковые нелинейные резисторы

Полупроводниковые нелинейные резисторы – изделия электронной техники, основное свойство которых, в отличие от линейных резисторов, заключается в способности изменять свое сопротивление под действием внешних факторов: температуры, напряжения, магнитного поля и освещения. В зависимости от воздействующего фактора они получили следующие названия: терморезисторы, варисторы, магниторезисторы и фоторезисторы, соответственно. В таких резисторах применяется полупроводник, равномерно легированный примесями. В зависимости от типа примеси и конструкции резистора удастся получить различные зависимости сопротивления от управляющих параметров.

Рассмотрим виды полупроводниковых резисторов, их свойства и параметры более подробно.

### 4.1. Терморезисторы

Терморезисторы – полупроводниковые резисторы с нелинейной ВАХ, отличительной особенностью является ярко выраженная зависимость электрического сопротивления от температуры [16]. Существуют терморезисторы как с положительным ТКС (позисторы), так и с отрицательным ТКС (термисторы).

Для термистора характерны: большое значение ТКС (в десятки раз превышающий этот коэффициент у металлов), простота устройства, способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках, стабильность характеристик во времени.

Терморезисторы используются в системах дистанционного и централизованного измерения и регулирования температуры, противопожарной сигнализации, теплового контроля, в схемах температурной компенсации ряда элементов электрических цепей и контуров, для стабилизации режимов транзисторных каскадов, измерения мощности и вакуума, как датчики расхода различных сред тепла, а также в качестве дистанционных бесконтактных переменных резисторов, стабилизаторов напряжения и т.д.

Терморезисторы находят применение в промышленной электронике и бытовой аппаратуре: рефрижераторах, автомобилях, электронагревательных приборах, телевизорах, системах центрального отопления и пр. В телевизорах часто используются

терморезисторы с положительным ТКС для размагничивания кинескопа [17].

Терморезисторы широко используются в различных устройствах не только в качестве датчиков температуры. После соответствующей модификации их можно применять в электронных устройствах задержки с достаточно широким интервалом времен задержки, в качестве конденсаторов или катушек индуктивности в низкочастотных генераторах, для защиты от выбросов напряжения в емкостных, индуктивных или резистивных схемах, в качестве ограничителей тока, напряжения, для измерения давления газа или теплопроводности.

Практически ни одна сложная печатная плата не обходится без терморезисторов. Они используются в температурных датчиках, термометрах, практически в любой, связанной с температурными режимами, электронике. В противопожарной технике используются температурные датчики. Подобный датчик содержит два терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом, которые установлены на печатной плате в белом поликарбонатном корпусе. Один выведен наружу — открытый терморезистор, он быстро реагирует на изменение температуры воздуха. Другой терморезистор находится в корпусе и реагирует на изменение температуры медленнее. При стабильных условиях оба терморезистора находятся в термическом равновесии с температурой воздуха и имеют одинаковые сопротивления. Если температура воздуха быстро повышается, то сопротивление открытого терморезистора становится меньше, чем сопротивление закрытого терморезистора. Отношение сопротивлений терморезисторов контролирует электронная схема, и если это отношение превышает пороговый уровень, установленный на заводе-изготовителе, она выдает сигнал тревоги. Если температура воздуха повышается медленно, то различие сопротивлений терморезисторов незначительно. Однако эта разница становится выше, если соединить последовательно с закрытым терморезистором резистор с высокой температурной стабильностью. Когда отношение суммы сопротивлений закрытого терморезистора и стабильного резистора к сопротивлению открытого терморезистора превышает порог, выдается режим тревоги. Датчик формирует режим «Тревога» при достижении внешней температуры 60 °С вне зависимости от скорости нарастания температуры.

К недостаткам терморезисторов относится инерционность, характеризующаяся постоянной времени  $\tau$ , а также плохая стабильность.

Зависимость сопротивления терморезистора от температуры представлена на рисунке 4.1 [18].

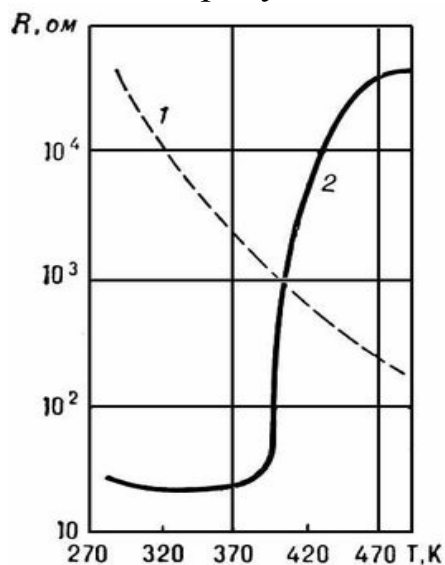


Рис. 4.1. Изменение сопротивления при увеличении температуры для: 1 – термистора; 2 – позистора

Уменьшение (увеличение) сопротивления полупроводника с увеличением (уменьшением) температуры может быть вызвано разными причинами – увеличением (уменьшением) концентрации носителей заряда, или увеличением (уменьшением) их подвижности, а также фазовыми превращениями в полупроводниковом материале.

Температурная зависимость удельного сопротивления полупроводника определяется в основном изменением концентрации носителей заряда, так как относительно слабым изменением их подвижности в большинстве случаев можно пренебречь.

Работа терморезисторов основана на следующих принципах.

При абсолютном нуле температуры все энергетические уровни валентной зоны невырожденного полупроводника заняты электронами. В этом случае валентные электроны не могут участвовать в электрическом токе, так как любое их движение связано с увеличением энергии и, следовательно, с переходом на более высокий энергетический уровень, что невозможно в пределах валентной зоны. Поэтому при  $T=0$  К полупроводник подобен изолятору, и его проводимость равна нулю. Для перехода электрона в зону проводимости беспримесного полупроводника необходимо передать ему энергию, равную ширине запрещенной зоны  $\Delta E_g$ . Такую энергию валентные электроны могут получить, если кристалл нагреть

до некоторой температуры. Благодаря наличию свободных уровней в зоне проводимости, перешедшие туда электроны, смогут двигаться под действием электрического поля. Заметим, что проводимость полупроводника в данном случае будет обусловлена не только наличием электронов в зоне проводимости, но и появлением дырок в валентной зоне.

Вероятность переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости, а, следовательно, и число образовавшихся свободных электронов и дырок значительно (по экспоненциальному закону) возрастают с увеличением температуры:

$$n_i \sim T^{3/2} e^{-\frac{DE_g}{2kT}},$$

где:  $n_i$  – концентрация свободных электронов, индекс  $i$  указывает на то, что полупроводник собственный (заметим, что в собственном полупроводнике концентрация свободных дырок  $p_i = n_i$ );

$\Delta E_g$  – ширина запрещенной зоны, которая, строго говоря, сама зависит от температуры;

$T$  – абсолютная температура;

$k$  – постоянная Больцмана.

Если в полупроводнике имеются примеси, то это приводит к образованию энергетических уровней внутри запрещенной зоны. Примесные атомы даже при относительно низких температурах могут поставлять электроны в зону проводимости (в этом случае примесь называется донорной, а полупроводник -  $n$ -типа) или дырки в валентную зону (примесь называется акцепторной, а полупроводник -  $p$ -типа), так как требуемая для этого энергия обычно значительно меньше ширины запрещенной зоны. Зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике  $n$ -типа от температуры показана на рисунке 4.2. Здесь  $ab$  – область собственной проводимости донорного полупроводника,  $bc$  – область истощения примеси,  $cd$  – область слабой ионизации примеси.

Большую часть терморезисторов, выпускаемых промышленностью, изготавливают из поликристаллических оксидных полупроводников, в которых преобладает ионная связь. Электропроводность этих материалов отличается от электропроводности рассмотренных выше полупроводников.

Как правило, полупроводниками являются оксиды переходных металлов, для которых характерно наличие незаполненных электронных оболочек и переменная валентность. При образовании такого оксида в определенных условиях (наличие примесей,

отклонение от стехиометрии) в одинаковых кристаллографических положениях оказываются ионы с разными зарядами. Электропроводность оксидных полупроводников объясняется обменом электронами между этими ионами. Так как энергия, необходимая для такого обмена, невелика, все электроны (или дырки), которые могут переходить от одного иона к другому, можно считать свободными носителями заряда, а их концентрацию постоянной при температурах в рабочем для терморезистора диапазоне.

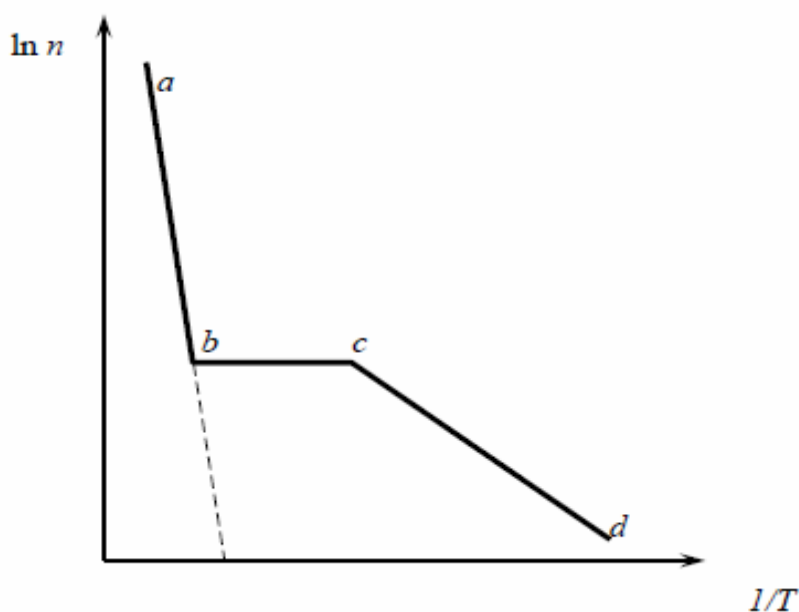


Рис. 4.2. Зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике *n*-типа: штриховая линия – собственный полупроводник, сплошная линия – донорный полупроводник.

Из-за сильного взаимодействия носителей заряда с ионами подвижность носителей заряда в оксидном полупроводнике оказывается довольно низкой и экспоненциально возрастает с ростом температуры. В результате зависимость сопротивления оксидного полупроводника от температуры оказывается такой же, как у ковалентных полупроводников, но она обусловлена не изменением концентрации свободных носителей заряда, а изменением их подвижности.

В оксидах ванадия  $V_2O_4$  и  $V_2O_3$ , в отличие от рассмотренных выше полупроводников, причиной значительного (на несколько порядков) изменения их сопротивления является фазовый переход при температурах 68 и -110 °С, соответственно. На основе этих оксидов созданы терморезисторы с очень большим ТКС [19].

В массовом производстве позисторы изготавливают на основе керамики из титаната бария ( $BaTiO_3$ ). Технология изготовления

позисторов аналогична технологии изготовления изделий из других керамических материалов. После смешивания исходных компонентов и веществ, содержащих примесные элементы, проводят первичный обжиг при температуре около 1000 °С. Полученную твердую массу измельчают, а затем формуют заготовки (обычно в виде дисков различных размеров). Вторичный обжиг производят при температуре 1300...1400 °С.

Таким образом, резистивный слой позистора состоит из большого числа контактирующих между собой зерен или кристаллитов полупроводникового титаната бария. Сопротивление позистора определяется сопротивлением обедненных поверхностных слоев на зернах соединения. Высота поверхностных потенциальных барьеров оказывается малой при температурах ниже точки Кюри, когда в зернах вещества существует спонтанная поляризация и материал обладает очень большой диэлектрической проницаемостью. При температурах, больших точки Кюри, титанат бария претерпевает фазовое превращение из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние. При этом пропадает спонтанная поляризация, резко уменьшается диэлектрическая проницаемость, растет высота поверхностных потенциальных барьеров на зернах  $BaTiO_3$  и увеличивается сопротивление позистора (см. рис. 4.3) [18].

Кроме деления на позисторы и термисторы терморезисторы делятся на низкотемпературные (рассчитанные на работу при температурах ниже 170 К), среднетемпературные (170...510 К) и высокотемпературные (выше 570 К). Кроме того, существуют терморезисторы, предназначенные для работы при 4,2 К и ниже, а также при 900...1300 К. Наибольшее применение нашли среднетемпературные терморезисторы с ТКС  $(-2,4...-8,4) \cdot 10^{-2}$  1/К и  $R_{ном} = 1...106$  Ом.

Основными параметрами терморезисторов являются:

- номинальное сопротивление;
- ТКС;
- коэффициент температурной чувствительности;
- постоянная времени;
- интервал рабочих температур;
- максимально допустимая мощность рассеяния;
- стабильность параметров.

Номинальное сопротивление для терморезисторов измеряется при определенной температуре окружающей среды (20 °С), а для элементов, работающих при высоких температурах: до 300 °С – при

150 °С. Значения номинальных сопротивлений устанавливаются в основном рядами Е6 и Е12. Другие ряды используются редко.

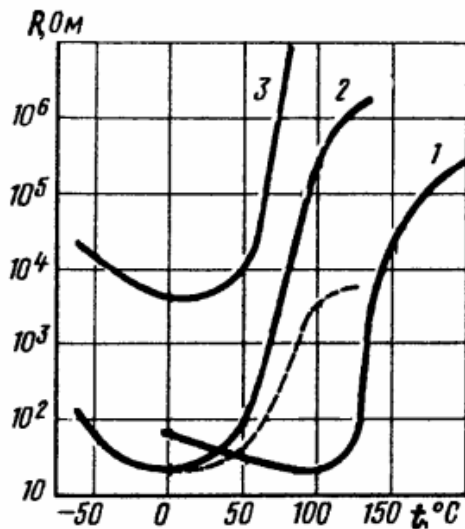


Рис. 4.3. Температурные характеристики представителей позисторов: 1 – СТ5-1; 2 – СТ6-2Б; 3 – СТ6-3Б; штрихпунктирная линия – для СТ6-2Б (самоподогрев)

ТКС для выпускаемых промышленностью термисторов составляет  $(-0,3 \dots -0,66) 1/\text{K}$ .

В зависимости от назначения и способа температурного управления рабочим телом терморезисторы подразделяются на два типа: прямого и косвенного подогрева. В терморезисторах прямого подогрева сопротивление изменяется при прохождении тока непосредственно через термочувствительный элемент или при изменении температуры окружающей среды. В терморезисторах косвенного подогрева сопротивление изменяется при прохождении тока через специальный подогреватель, расположенный вблизи термочувствительного элемента (рабочего тела), или при изменении температуры окружающей среды; при этом сопротивление рабочего тела является функцией тока нагревателя (см. рис. 4.4) [20].

Температурная зависимость сопротивления является основной характеристикой терморезистора, в значительной мере определяющей остальные характеристики этих изделий. Характер изменения сопротивления при этом определяется температурной зависимостью удельного сопротивления терморезистора. Сопротивление многих типов терморезисторов с отрицательным ТКС в интервале температур в несколько десятков градусов изменяется по экспоненциальному закону:



$$R_T = A \exp\left(\frac{B}{T}\right),$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные для данного типа терморезисторов;  
 $T$  – температура в градусах Кельвина.

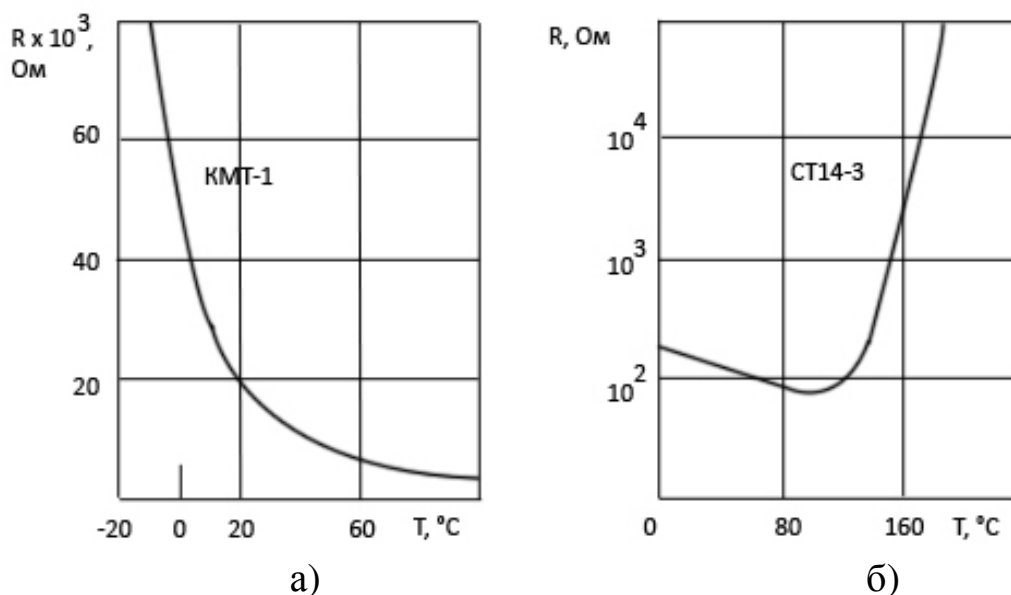


Рис. 4.4. Температурные зависимости сопротивления терморезисторов с отрицательным (а) и положительным (б) ТКС  
 Для позисторов:

$$R_T = A \exp(\alpha \cdot t),$$

где  $\alpha$  – ТКС при температуре  $t$  в  $^{\circ}\text{C}$  [20].

Важной характеристикой терморезисторов является их статическая вольтамперная характеристика. ВАХ терморезисторов – нелинейные. Они представляют собой зависимости протекающего через терморезистор тока от приложенного напряжения в условиях теплового равновесия между ним и внешней средой [21].

Вид нелинейной статической ВАХ (рис. 4.5) зависит от сопротивления термочувствительного элемента, его конструкции, габаритных размеров, степени тепловой связи с окружающей средой и внешней температуры [20].

На начальном участке характеристики терморезистора с отрицательным ТКС соблюдается линейная зависимость, так как при малых токах выделяющаяся в термочувствительном элементе мощность недостаточна для существенного изменения его температуры, сопротивление не меняется, поэтому соблюдается закон Ома. При увеличении тока нагрев становится заметным, сопротивление терморезистора начинает уменьшаться и крутизна характеристики снижается. Достигнув некоторого максимального

значения, падение напряжения на терморезисторе при дальнейшем росте тока начинает уменьшаться.

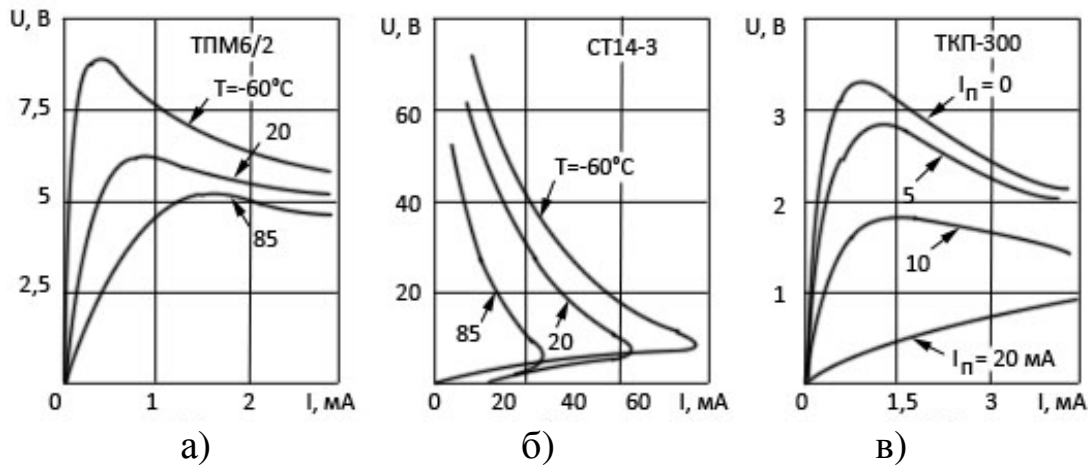


Рис. 4.5.

У позисторов на начальном участке возможен небольшой отрицательный ТКС, поэтому начало вольтамперной характеристики у них может быть аналогичным терморезисторам с отрицательным ТКС (рис.4.5 (б)).

Вид ВАХ терморезисторов косвенного подогрева в значительной степени зависит от тока, протекающего по обмотке подогрева  $I_{п}$ . Поэтому для них обычно приводятся характеристики подогрева, устанавливающие связь между сопротивлением терморезистора и мощностью, рассеиваемой на обмотке подогрева (рис. 4.6) [21].

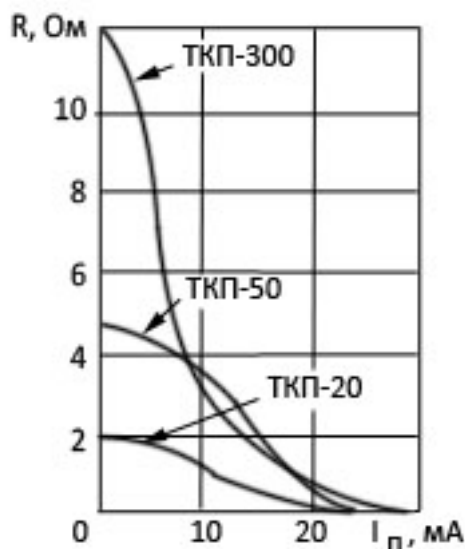


Рис. 4.6. Характеристика нагрева терморезисторов косвенного подогрева

Классификация терморезисторов приведена на рис. 4.7.

В соответствии с действующим стандартом сокращенное условное обозначение состоит из сочетания букв, обозначающих подкласс резисторов:

ТР – терморезистор с отрицательным ТКС,

ТРП – терморезистор с положительным ТКС (позистор).

Цифра, стоящая после дефиса, означает порядковый номер разработки конкретного типа.

В полное условное обозначение входят номинальное сопротивление и буквенное обозначение единицы измерения (Ом, кОм), допуск (%).

Например, терморезистор с отрицательным ТКС, порядковым номером разработки 2, номинальным сопротивлением 33 кОм, допуском  $\pm 20\%$  обозначается ТР-2-33 кОм  $\pm 20\%$ .

Наряду с новыми встречаются терморезисторы прошлых лет разработки, в основу которых был положен состав полупроводникового материала, из которого изготовлен их термочувствительный элемент. Например, ММТ – медно-марганцевые; впоследствии терморезисторы из такого материала стали обозначаться СТ2; КМТ – кобальто-марганцевые, впоследствии – СТ1.

Более поздние разработки имеют обозначения:

СТ3 – медно-кобальто-марганцевые;

СТ4 – никель-кобальто-марганцевые;

позисторы: СТ5 – на основе титаната бария, легированного германием;

СТ6 – на основе легированных твердых растворов в системе  $BaTiO_3 - BaSnO_3$ ;

СТ8 – на основе полуторокси ванадия и ряда поликристаллических твердых растворов в системах  $V_2O_3 - Me_2O_3$ , где металлом могут быть *Ti, Al, Cr*;

СТ9 – на основе двуокиси ванадия  $VO_2$ ;

СТ10 – на основе системы  $(Ba, Sr) TiO_3$ ;

СТ11 – на основе системы  $(Ba, Sr) (Ti, Sn) O_3$ , легированной церием.

Стабилизаторы напряжения обозначаются ТП2/0,5; ТП2/2; ТП6/2. Буквы ТП здесь обозначают терморезистор прямого подогрева. Цифра в числителе указывает номинальное значение напряжения в вольтах, а в знаменателе – среднюю силу рабочего тока в миллиамперах.

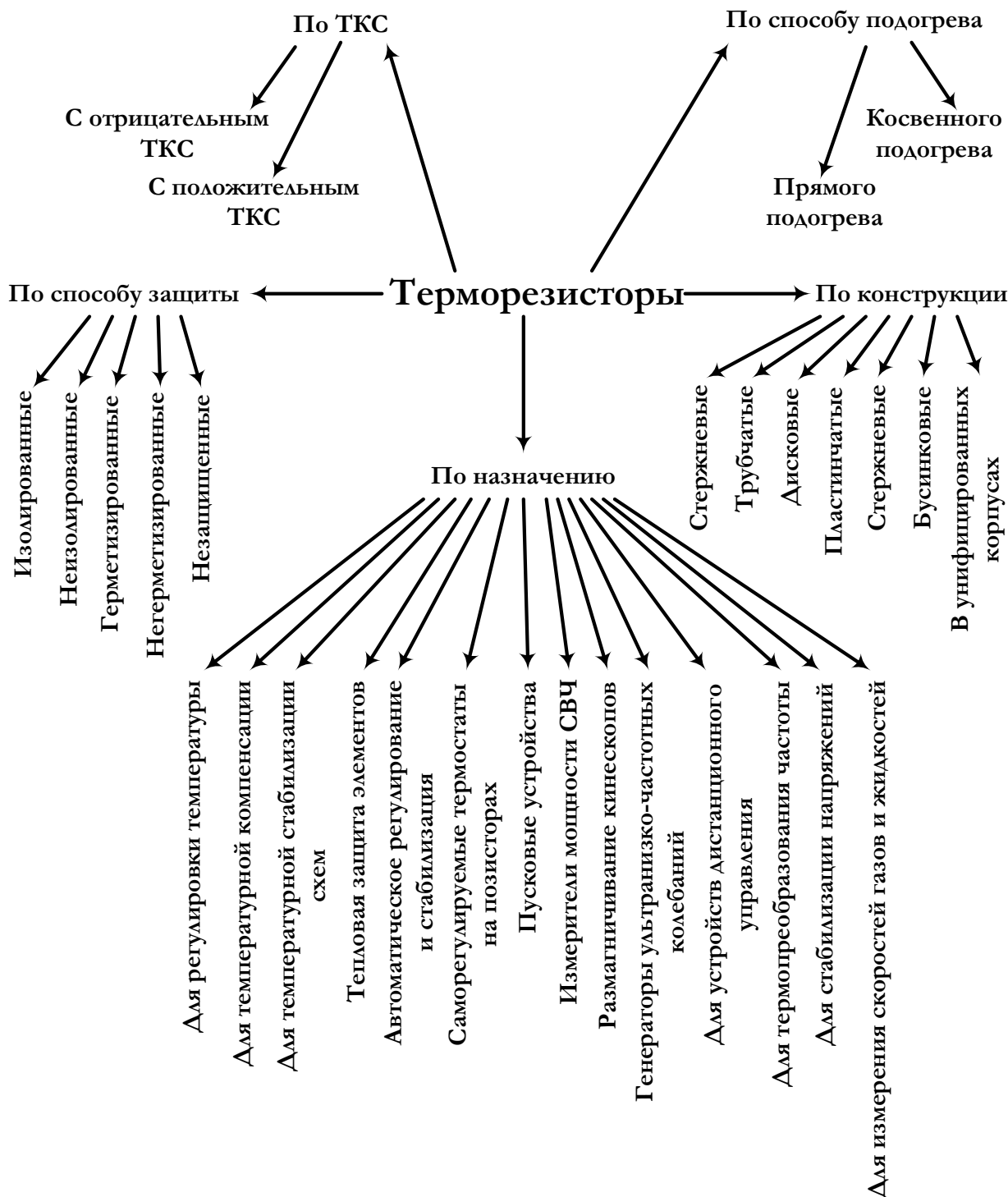


Рис. 4.7. Классификация терморезисторов

Измерители СВЧ-мощности старых разработок обозначаются Т8, Т9, ТШ-1 и ТШ-2. Буква Ш здесь обозначает малую шунтирующую емкость. Более поздние разработки обозначаются СТ-3-29 и СТ3-32.

Терморезисторы косвенного подогрева старых разработок для систем регулирования с глубокой обратной связью обозначаются ТКП-20, ТКП-50 и ТКП-350. Цифры указывают значение

сопротивления в Ом. Позднее для этих целей были разработаны терморезисторы СТ1-21, СТ3-21, СТ1-27 и СТ3-27.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) или  $\alpha_T$  – показывает (как и для линейных резисторов) относительное изменение сопротивления при изменении температуры на 1 °С:

$$\alpha_T = \Delta R_T / (R \cdot \Delta T).$$

Для терморезисторов с отрицательным ТКС:

$$\alpha_T = - B/T^2,$$

то есть, зная постоянную  $B$ , можно определить  $\alpha_T$  для любой температуры.

Коэффициент температурной чувствительности ( $\beta$ ) определяет характер температурной зависимости данного типа терморезистора и в рабочей точке показывает изменение его сопротивления при изменении мощности рассеяния на 1 мВт при температуре окружающей среды 20 °С. Коэффициент  $\beta$  зависит от физических свойств полупроводникового материала [22]. Он измеряется в градусах Кельвина или Цельсия и находится в диапазоне 700...16000 для большинства терморезисторов. Этот коэффициент может быть определен путем измерения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  при двух температурах  $T_1$  и  $T_2$ :

$$\beta = \frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \ln \frac{R_1}{R_2}.$$

Постоянная времени  $\tau$  характеризует тепловую инерционность. Она равна времени, в течение которого температура терморезистора изменяется на 63% при переносе его из воздушной среды с температурой 0 °С в воздушную среду с температурой 100 °С. Типичное значение постоянной времени 0,5...130 с [20].

Наиболее распространенные терморезисторы изготавливают на основе медно-марганцевых (ММТ и СТ3), кобальто-марганцевых (КМТ и СТ1) и медно-кобальто-марганцевых (СТ3) оксидных полупроводников.

По конструктивному исполнению терморезисторы можно разделить на следующие типы:

- в виде цилиндрических стержней (КМТ-1, ММТ-1, КМТ-4, ММТ-4) 3...40 мм (рис. 4.8. (а));
- в виде дисков (СТ1-17, СТ3-17, СТ5-1) диаметром 2,5...18 мм (рис. 4.8 (б));
- в виде миниатюрных бусинок (СТ1-18, СТ1-19 и др.) 0,1...1 мм (рис. 4.8 (в));

– в виде пленок прямоугольной формы (СТЗ-23) толщиной 0,2...1 мм.

Терморезисторы в виде пленки позволили расширить область применения и использовать такие ЭРЭ для контроля температуры потоков жидкостей и газов, корпусов микросхем и кристаллов кварца в генераторах, в системах пожарной сигнализации, в биомедицинской аппаратуре, для контроля мощности излучения лазеров, ИК-пирометрах и анализаторах [20].

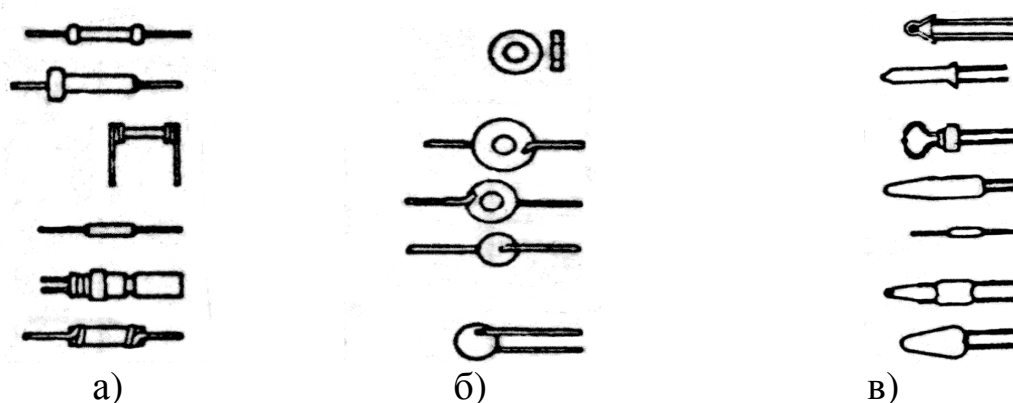


Рис. 4.8. Внешний вид терморезисторов различной конструкции

Необходимо отметить, что выпускаются бусинковые термисторы и диаметром до 0,07 мм с выводами толщиной 0,01 мм. Такие миниатюрные датчики позволяют измерять температуру внутри кровеносных сосудов или растительных клеток.

Терморезисторы ММТ-1 и КМТ-1 предназначены для работы в закрытых сухих помещениях, ММТ-4 и КМТ-4 герметизированы, работоспособны в условиях с повышенной влажностью и даже в жидкой среде.

Особенностью бусинковых терморезисторов типов СТ1-18, СТЗ-18 и СТЗ-25 является то, что термочувствительный элемент для защиты от внешних воздействий покрыт тонким слоем стекла, а тонкие платиновые контакты приварены или припаяны (у СТЗ-25) к траверсам из толстой проволоки.

Терморезисторы типов СТ1-18 и СТЗ-18 имеют бусинку диаметром 0,5 мм (выводы диаметром до 0,05 мм), терморезисторы типа СТЗ-25 – 0,3 и 0,03 мм соответственно. Терморезисторы типов КМТ-14, СТ1-19 и СТЗ-19 имеют герметичную конструкцию. Термочувствительный элемент резистора КМТ-14 – бусинка диаметром не более 0,5 мм, нанесенная на две параллельные платиновые проволоки, приваренные к платиновым выводам диаметром 0,4 мм. Бусинка герметизирована в коническом конце

стеклянной трубки, которая является корпусом терморезистора. Термочувствительные элементы терморезисторов СТ1-19 и СТ3-19 помещены в конец миниатюрной капсулы, которая защищает термочувствительный элемент и места соединения контактов с выводами. СТ1-19 и СТ3-19 имеют меньшие размеры и более стойки к механическим нагрузкам, чем КМТ-14.

Терморезисторы ТКП, СТ1-21, СТ3-21 и СТ3-27 применяются в радиотехнических устройствах и схемах автоматики как регулируемые бесконтактные резисторы. Они имеют косвенный подогрев от специальной спирали, при изменении тока в которой происходит плавное изменение сопротивления терморезистора. Используются, когда необходимо отделить управляемую цепь от управляющей.

В схемах терморезистор обозначается следующим образом:



Диапазон наилучшей стабильности термисторов – от 0 до 100 °С. Термисторы представляют особый интерес для измерения низких температур благодаря своей относительной нечувствительности к магнитным полям. Некоторые типы термисторов могут применяться до температуры минус 100 °С.

Причинами нестабильности термисторов являются:

- напряжения, возникающие в материале при термоциклировании, и образование микротрещин;
- структурные изменения в полупроводнике;
- внешнее загрязнение (водой и др. веществами) и в результате химические реакции в порах и на поверхности полупроводника;
- нарушение адгезии металлической пленки;
- миграция примесей из металлических контактов в материал термистора.

Для получения стабильного состояния термисторы подвергают старению (до 500...700 дней). Как правило, во время старения наблюдается рост сопротивления. При длительном использовании термисторов, их параметры уходят за пределы допуска. Так в большинстве случаев, термисторный термометр показывает температуру несколько заниженной.

Исследования показывают, что бусиновые термисторы могут проявлять очень высокую стабильность (дрейф до 3 мК за 100 дней при 60 °С). Дисковые термисторы менее стабильны (дрейф до 50 мК за 100 дней при 60 °С).

В настоящее время освоен выпуск терморезисторов на основе монокристаллов полупроводникового алмаза типов ТРА-1 и ТРА-2. Они имеют существенные преимущества по сравнению с ранее выпускавшимися типами:

- полное отсутствие диффузионных эффектов (работоспособность до 1000 °С);
- стойкость к агрессивным средам и радиации;
- высокая прочность;
- малая инерционность.

Параметры некоторых типов терморезисторов указаны в таблице 4.1 [6,23].

Необходимо упомянуть о релейном эффекте, возникающем в цепи из последовательно соединенных линейного резистора  $R_{Л}$  с терморезистором, заключающемся в резком возрастании или уменьшении тока через терморезистор. Возникновение релейного эффекта зависит от изменений приложенного напряжения, температуры окружающей среды, линейного сопротивления резистора  $R_{Л}$  или коэффициента рассеяния.

Таблица 4.1.

Параметры представителей терморезисторов

Тип	Параметр	Значение
ММТ-6 медно-марганцевый с отрицательным ТКС	Температура окр. ср.	-60...+125 °С
	$R_{ном}$	10 кОм ...100 кОм
	Допуск	±20 %
	$P_{ном}$	50 мВт
	$\beta$	2060...4300 К
	$\tau$	35 с
	ТКС	$-(2,4...5) \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$
ММТ-8 медно-марганцевый дисковый	Температура окр. ср.	-40...+70 °С
	$R_{ном}$	1 Ом ...1 кОм
	Допуск	±10 %, ±20 %
	$P_{ном}$	600 мВт
	$\beta$	2060...3430 К
	$\tau$	900 с
	ТКС	$-(2,4...8,4) \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$



Продолжение таблицы 4.1.

Тип	Параметр	Значение
КМТ-14 кобальто- марганцевый бусинковый	Температура окр. ср.	-10...+300 °С
	$R_{ном}$	510 Ом ...7,5 МОм
	Допуск	±20 %
	$P_{ном}$	100 мВт
	$\beta$	3600...7480 К
	$\tau$	10...60 с
	ТКС	$(2,1...4,3) \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$
СТ5-1 позистор	Температура окр. ср.	-20...+200 °С
	$R_{ном}$	20...150 Ом
	$P_{ном}$	До 0,7 Вт
	$\tau$	20 с
	ТКС	0,2 1/°С
ТРА-1,2 терморезистор на основе монокристалла полупроводникового алмаза	Температура окр. ср.	-200...+330 °С
	$R_{ном}$ (при 25°С)	10 Ом...10 МОм
	$P_{ном}$	До 0,5 Вт
	$\beta$	300...6000 К
	$\tau$	1...5 с
	ТКС	$-(0,2...2,3) \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$
ТРП2-7,8 терморезистор фольговый	Температура окр. ср.	-60 ...+300 °С
	$R_{ном}$ (при 25°С)	50 Ом...1 кОм
	Допуск	±0,5 %; ±1 %; ±2 %
	$\tau$	10 с

Например, при увеличении напряжения рабочая точка ВАХ переходит из устойчивого состояния в неустойчивое (неустойчивый режим работы – при отрицательном дифференциальном сопротивлении характеристики) и обратно в устойчивое состояние (дифференциальное сопротивление положительно) – прямой релейный эффект.

Из-за нарушения теплового равновесия между терморезистором и внешней средой (мощность, выделяемая в терморезисторе, больше рассеиваемой мощности в окружающую среду) происходят разогрев терморезистора, уменьшение его электрического сопротивления и быстрое увеличение тока в цепи. При уменьшении рабочего напряжения рабочая точка совершает обратное перемещение в первоначальное устойчивое состояние, но при этом происходит скачкообразное уменьшение тока – обратный релейный эффект.

Релейный эффект в цепи с резистором может использоваться для теплового контроля и пожарной сигнализации при повышении температуры окружающей среды. При низкой температуре положение рабочей точки ВАХ устойчиво. При повышении температуры максимум ВАХ снижается, возникает релейный эффект и ток, который может использоваться для управления реле, быстро возрастает.

Изменение коэффициента рассеяния  $H$  (его уменьшение приводит к снижению максимума ВАХ) происходит при перемещении терморезистора из одной среды в другую (например, из жидкости в воздух) или при изменении скорости движения среды и ее плотности, что также может вызывать релейный эффект и использоваться в схемах автоматического регулирования.

## 4.2. Варисторы

Варистор – полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление (проводимость) которого нелинейно зависит от приложенного напряжения, т.е. он обладает нелинейной симметричной ВАХ.

Варисторы используются для стабилизации и защиты от перенапряжений (например, высоковольтные линии передачи, линии связи, электрические приборы), преобразования частоты и напряжения, шумопоглощения радио и электромагнитных помех, а также для регулирования усиления в системах автоматики, различных измерительных устройствах, в аналоговых вычислителях – для возведения в степень, извлечения корней и других математических действий, и т.д.

Основной материал для изготовления варисторов – полупроводниковый карбид кремния  $SiC$ . Кристаллы  $SiC$  размалывают до размера 40...300 мкм, и этот порошок используют в качестве основы варистора. Электропроводность порошка имеет нелинейный характер, однако она нестабильна, зависит от степени сжатия, крупности помола, меняется при тряске и т.п., поэтому порошок скрепляют связующим веществом. Порошкообразный карбид кремния и связующее вещество запрессовывают в форму и спекают. Если в качестве связующего вещества используют глину, то полученный материал называют тирит. Для изготовления тирита смесь 74% мелкоизмельченного карбида кремния и глины прессуется и обжигается при температуре 1270 °С. Если используют жидкое

стекло ( $75\% \text{SiO}_2 + 24\% \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ , то есть силикатный клей), то полученный материал, состоящий из  $84\% \text{SiC}$  и  $16\%$  связующего, называют вилит. Смесь для изготовления вилита прессуется и обжигается при температуре  $380^\circ\text{C}$ . При использовании в качестве связующего вещества ультрафарфоровой связки получают лэтин, а прессованный углерод с кристаллическим кремнием называется силит [24,25].

После этого поверхность полученного элемента металлизуют и припаивают к ней выводы. Варисторы на основе карбида кремния имеют невысокий коэффициент нелинейности, порядка  $5\text{...}7$ , поэтому в настоящее время для изготовления варисторов применяется оксид цинка с добавками оксидов висмута, кобальта, марганца, сурьмы и хрома. Технология его приготовления сложна, она включает отдельный размол компонентов, смешение со связкой, прессование, спекание с выжиганием связки, размол, вторичное спекание, выжигание электродов. В результате получается высококачественная керамика с высокой нелинейностью, величина которой составляет  $50\text{...}70$ . Нелинейность варисторов на основе оксидных полупроводников связана не со свойствами кристаллитов (мелкие монокристаллы, не имеющие явно выраженной огранки), а со свойствами межкристаллитных прослоек и потенциальных барьеров на поверхности кристаллитов.

Явления на точечных контактах между кристаллами карбида кремния приводят к нелинейности ВАХ (рис. 4.9).

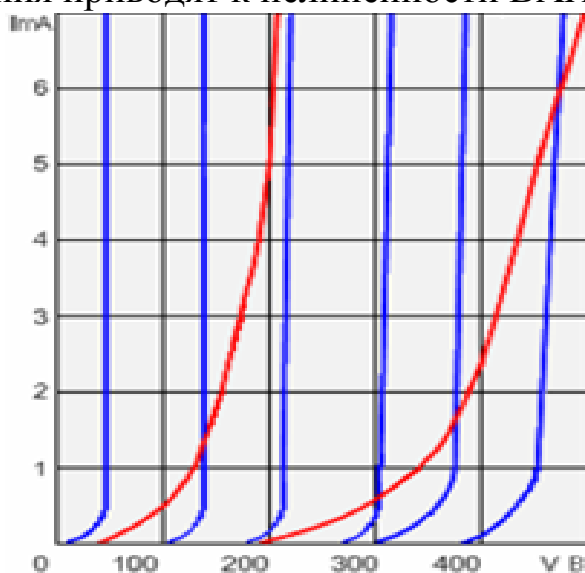


Рис. 4.9. ВАХ варисторов: синие (крутые) – на основе  $\text{ZnO}$ , красные (более пологие) – на основе  $\text{SiC}$ .

При малых напряжениях на варисторе может происходить туннелирование электронов через тонкие потенциальные барьеры,

существующие на поверхности кристаллов ( $SiO$ ). При больших напряжениях и токе, проходящих через варистор, плотность тока в точечных контактах возрастает. Напряжение, приложенное к варистору, падает на точечных контактах, и, поэтому, удельная мощность (мощность на единицу объема), выделяющаяся в местах точечных контактов увеличивается. Происходит разогрев точечных контактов и уменьшение сопротивления. ВАХ становится нелинейной.

Сопротивление точечных контактов определяется сопротивлением растекания, т.е. сопротивлением малых активных областей полупроводника под точечными контактами. Из-за малости активных областей их разогрев практически не приводит к повышению температуры всего варистора. Кроме того, малые объемы активных областей обеспечивают малую инерционность тепловых процессов – разогрева и охлаждения этих областей ( $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-8}$  с).

Варисторы на основе оксида цинка менее стабильны при работе и хранении, в них относительно легче получить большую нелинейность ВАХ, чем в варисторах из карбида кремния. Конструктивное исполнение варисторов различное – диски, таблетки, стержни, бусиновые или пленочные [26-28].

Варистор включается параллельно защищаемому оборудованию (см. рис. 4.10), последовательно с внутренним сопротивлением источника помех (имеется в виду сопротивление линии передачи данных с учетом омического импеданса кабеля), т.е. при нормальной эксплуатации он находится под действием рабочего напряжения защищаемого устройства.

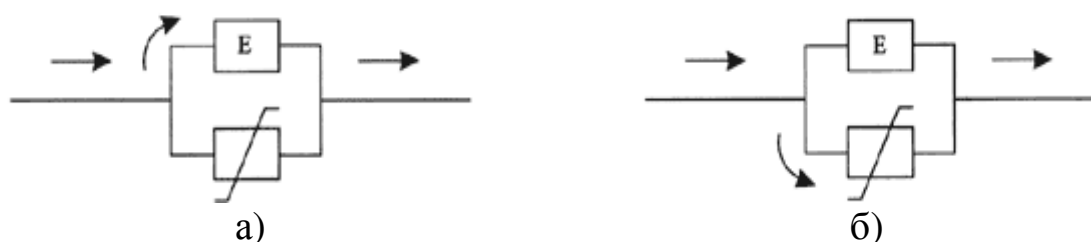


Рис. 4.10. Защита схемы с помощью варистора: а) – состояние покоя; б) – режим защиты

При отсутствии перенапряжения ток, проходящий через варистор, очень мал. В рабочем режиме (при отсутствии импульсных напряжений) ток через варистор пренебрежимо мал, и поэтому варистор в этих условиях представляет собой изолятор.

При возникновении импульса напряжения варистор в силу нелинейности своей характеристики резко уменьшает свое

сопротивление до долей Ом и шунтирует нагрузку, защищая ее, и рассеивая поглощенную энергию в виде тепла (см. рис. 4.11). В этом случае через варистор кратковременно может протекать ток, достигающий нескольких тысяч ампер, защищая устройство  $E$ . Так как варистор практически безынерционен, то после гашения импульса напряжения, он вновь приобретает прежнее большое сопротивление.

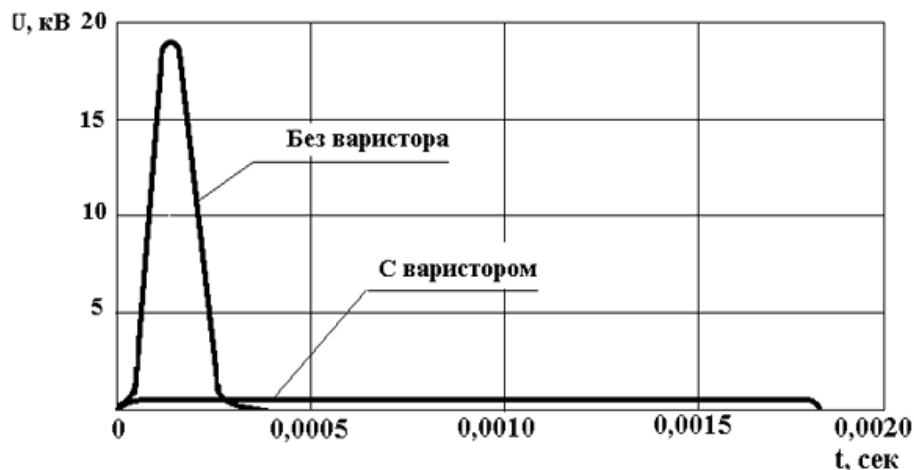


Рис. 4.11

Таким образом, включение варистора параллельно электрооборудованию не влияет на его работу в нормальных условиях, но "срезает" импульсы опасного напряжения, что полностью обеспечивает сохранность даже ослабленной изоляции.

Основными характеристиками и параметрами варисторов являются [29]:

- статическое сопротивление, т.е. сопротивление при определенном значении приложенного напряжения ( $U_{кл}$ ) – классификационном напряжении (обычно  $U_{кл}$  указывают при токе 1 мА);

- динамическое сопротивление:

$$R_{д} = \frac{\Delta U}{\Delta I};$$

- отношение двух вышеприведенных величин называется коэффициентом нелинейности  $\beta$  в данной точке ВАХ. В широком диапазоне напряжений:

$$I = BU^{\beta},$$

где  $B$  – константа;

- рабочее напряжение (для постоянного тока и переменного) – диапазон от нескольких вольт до нескольких десятков кВ;

- рабочий ток от 0,1 мА до 1 А;
- максимальный импульсный ток;
- поглощаемая энергия, Дж;
- максимальное напряжение ограничения – это максимальное напряжение между выводами варистора в течение длительности импульса тока (0,4 мкс – предполагается, что это грозовой импульс);
- допустимая мощность рассеивания – характеризует возможность рассеивать поглощаемую электрическую энергию в виде тепла. Этот показатель в основном определяется геометрическими размерами варистора и конструкцией выводов. Для увеличения мощности рассеивания применяют массивные выводы, которые играют роль своеобразного радиатора;
- ток перегрузки – максимальный пиковый ток варистора при изменении напряжения варистора на 10% при стандартном импульсе тока (0,4 мкс) приложенный один или два раза с интервалом 5 мин;
- температурные коэффициенты статического сопротивления, напряжения и тока. В связи с нелинейностью ВАХ различают температурные коэффициенты статического сопротивления варистора, измеренные при постоянных напряжении или токе, а также температурные коэффициенты напряжения и тока;
- частотные свойства варисторов могут определяться либо инерционностью процессов, приводящих к нелинейности ВАХ, либо собственной емкостью варистора. Инерционность разогрева и охлаждения активных областей под точечными контактами между кристаллами очень мала. Поэтому частотные свойства варисторов определяются временем перезаряда их собственной емкости [30];
- коэффициент защиты варистора – это отношение напряжения на варисторе при токе 100 А к напряжению при токе 1 мА (т.е. к классификационному напряжению). Коэффициент защиты характеризует способность варистора ограничивать импульсы перенапряжения. Для варисторов на основе оксида цинка коэффициент находится в диапазоне 1,4...1,6.

Низковольтные варисторы изготавливают на рабочее напряжение 3...200 В и ток от 0,1 мА до 1 А, а высоковольтные варисторы – на рабочее напряжение до 20 кВ [31].

Обозначение варистора на схемах следующее:



В старой системе маркировка варисторов состояла из букв и цифр. Буквы СН означали сопротивление нелинейное; первая цифра – материал (1 – карбид кремния); вторая цифра, написанная через дефис, – вид конструкции (1 – стержневые; 2 – дисковые); третье число – номинальное напряжение (в вольтах) и четвертое число – допусковое отклонение от номинального напряжения (в процентах). Например, запись СН1-2-1300 В ± 10% означает варистор из карбида кремния, дисковый, номинальное напряжение 1300 В и допусковое отклонение ±10%.

Параметры некоторых представителей варисторов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2.

Параметры представителей варисторов

Тип	Параметр	Значение
СН1-1	Температура окр. ср.	-40...+100 °С
	$U_{кл}$	560 ...1500 В
	$I_{кл}$	10 мА
	Допуск	±10 %
	$P_{ном}$	1 Вт
	$\beta$	3,5...4,5
СН1-9	Температура окр. ср.	-60...+70 °С
	$U_{кл}$	240 ...360 В
	$I_{кл}$	0,05 мА
	Допуск	±5 %
	$P_{ном}$	0,01 Вт
	$\beta$	5

Как электронные компоненты, варисторы дешёвы и надёжны, способны выдерживать значительные электрические перегрузки, могут работать на высокой частоте (до 500 кГц). Среди недостатков – значительный низкочастотный шум и старение – изменение параметров со временем и при колебаниях температуры. В последние 5 лет появились на рынке так называемые "нестарящиеся" варисторы, имеющие улучшенные электрические характеристики.

### 4.3. Магниторезисторы

Магниторезисторы – это электронные компоненты, действие которых основано на изменении электрического сопротивления материала при воздействии на него магнитного поля (магниторезистивный эффект). Регулируя напряженность магнитного поля, или перемещая резистор в поле постоянного магнита, можно управлять сопротивлением [32,33,45]. Наиболее сильно магниторезистивный эффект проявляется в полупроводниковых материалах, при этом относительное изменение сопротивления может достигать 10 000 раз и больше.

Магниторезисторы применяются в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и положения, линейного перемещения, расхода жидкости и газа, электрического тока и напряжения и т.п. Их используют в бесконтактной клавиатуре ПЭВМ, бесконтактных переменных резисторах, вентильных электродвигателях, электронных модуляторах и преобразователях, измерителях магнитного поля, металлоискателях, электронных навигаторах, в бытовой электронной аппаратуре, системах автоматического управления, устройствах считывания информации ЭВМ, определителях подлинности банкнот, электронных и электрифицированных игрушках и др.

Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе тонкопленочных магниторезисторов, которые могут формироваться как в линейные, так и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации. Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т.п.) [34].

Работа магниторезисторов основана на магниторезистивном эффекте, или эффекте Гаусса [45]. Впервые этот эффект был обнаружен в 1856 году Уильямом Томсоном.

Если поместить образец прямоугольного сечения из полупроводникового материала в магнитное поле и пропускать по нему электрический ток, направление которого перпендикулярно вектору индукции магнитного поля (поперечный эффект Гаусса), или параллельно направлению тока (продольный эффект Гаусса), сопротивление образца будет возрастать. Но благодаря силе Лоренца,



происходит закручивание траекторий движения носителей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, и, поэтому, поперечное действие магнитного поля на полупроводник намного сильнее продольного. По этой причине приборы на основе продольного эффекта Гаусса не получили распространения.

Изменение удельного сопротивления вызвано тем, что носители заряда, перемещаются в полупроводнике под действием электрического поля с разной скоростью. Скорости носителей заряда различны и подчиняются распределению, отвечающему статистике Ферми-Дирака. В результате этого поперечное поле Холла компенсирует влияние силы Лоренца только на носители заряда, имеющие среднюю скорость  $V$ . Поэтому траектория носителей заряда со скоростью большей или меньшей скорости  $V$  будет искривлена, что приведет к увеличению числа столкновений (уменьшению длины свободного пробега) и тем самым – к повышению удельного сопротивления полупроводника.

Зависимость удельного сопротивления от магнитной индукции в большом диапазоне изменения индукции можно описать формулой:

$$\rho(B) = \rho_0 \left( 1 + \frac{AB^2}{1 + \mu^2 B^2} \right),$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $B=0$ ;  
 $A$  – постоянная.

Из формулы следует, что при малых магнитных полях (когда  $\mu B \ll 1$ ) удельное сопротивление  $\rho(B)$  квадратично зависит от индукции  $B$ , а при больших значениях индукции удельное сопротивление достигает насыщения.

Качественно магниторезистивный эффект можно объяснить следующим образом. При отсутствии магнитного поля  $B$  носители заряда в полупроводнике движутся прямолинейно между двумя столкновениями вдоль электрического поля  $E$ . Если приложено магнитное поле  $B$ , то траектория носителей изменяется и представляет циклоиду, а столкновения носителей будут происходить чаще, так как время и длина свободного пробега носителей уменьшится. А это равносильно уменьшению скорости дрейфа, или подвижности носителей, и, в итоге, проводимости.

Магниторезистивный эффект зависит не только от направления магнитного поля, но и от размеров и формы образца.

Эффект наиболее ярко выражен у пластин, имеющих форму диска Корбино (см. рис. 4.12), а также у некоторых сложных конфигураций, например, в форме меандра [46].

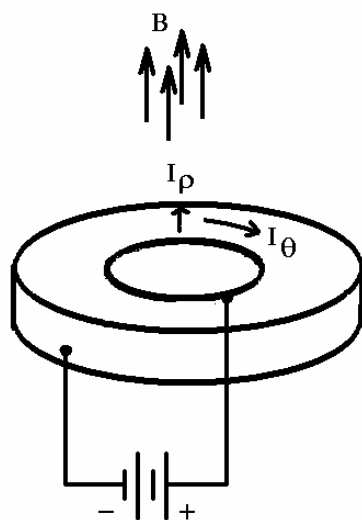


Рис. 4.12. Конструкция диска Корбино

Диск Корбино (назван в честь О.М. Корбино, 1911 год) представляет собой полупроводниковый диск с отверстием в центре и двумя контактами: к внутренней стенке отверстия и к торцу диска. Если плоскость диска перпендикулярна внешнему магнитному полю  $B$ , то тогда при пропускании электрического тока из-за осевой симметрии диска электрическое поле имеет только радиальную составляющую  $I_\rho$ , а холловское поле отсутствует, из-за чего не происходит частичной компенсации искривления траекторий носителей заряда холловским полем, и относительное изменение сопротивления у диска Корбино оказывается значительно большим, чем у длинной нитевидной формы образца. Например, для полупроводника  $n\text{-InSb}$  при 300 К и  $B=1$  Тл относительное изменение сопротивления для нитевидной формы составляет 0,48, а для диска Корбино 17,7.

Следует также отметить, что при увеличении сопротивления элемента в форме диска Корбино, величина относительного изменения сопротивления не стремится к насыщению, что делает возможным использование таких структур для измерения сильных магнитных полей в магнитометрах.

Магниторезисторы характеризуются такими параметрами, как:

- номинальное сопротивление;
- магнитная чувствительность;
- рабочий ток;

- термостабильность;
- быстроедействие;
- диапазон рабочих температур.

Основным параметром магниторезисторов является начальное сопротивление  $R_0$  при отсутствии магнитного поля ( $B=0$ ). Для оценки магниторезисторов используется магниторезистивное отношение  $R_B/R_0$ , представляющее собой отношение сопротивления магниторезистора  $R_B$  при определенном значении магнитной индукции (обычно 0,3 или 1,0 Тл) к начальному сопротивлению  $R_0$ .

Магнитная чувствительность  $\gamma_{mp}$ , определяется как частное относительного приращения сопротивления, к соответствующему приращению магнитной индукции:

$$\gamma_{mp} = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta B}.$$

Нагрузочная способность определяется предельным значением температуры перегрева, который допускается для магниторезистора. Нагрузочная способность указывается в паспорте либо в виде значений рассеиваемой мощности  $P$ , либо в виде предельно допустимого тока  $I_{max}$ , либо как тепловое сопротивление:

$$G_{th} = \frac{P}{t_{max} - t_{окр.ср.}},$$

где  $P$  – мощность, выделяемая в магниторезисторе;

$t_{max}$  – максимально допустимая температура резистора;

$t_{окр.ср.}$  – температура окружающей среды.

При определении нагрузочной способности магниторезистора при постоянном токе исходят из максимального значения сопротивления  $R_b$  (т.е. при  $B_{max}$ ), а при постоянном питающем напряжении – из минимального значения сопротивления  $R_0$  при  $B=0$ . При работе на переменном токе магниторезистивный эффект не зависит от частоты вплоть до значений 10 ГГц. В случае наклейки магниторезисторов на металлическую подложку возможно возникновение токов Фуко, поэтому при высоких частотах применяется подложка из феррита.

ТКС магниторезисторов зависит от состава материала, магнитной индукции и температуры. Чем больше чувствительность магниторезистора, тем больше его ТКС.

В России и за рубежом выпускается широкая номенклатура магниторезисторов, отличающихся типом конструкции и технологией изготовления магниточувствительного элемента и магнитной цепи.

Основные требования к полупроводниковым материалам следующие:

- сочетание большой подвижности носителей тока с минимальными температурными изменениями;
- высокое удельное сопротивление;
- близкая к линейной зависимость сопротивления магниторезистора от напряженности магнитного поля и тока при возможно меньших значениях индукции подмагничивающего поля;
- отсутствие выпрямляющего эффекта на контактах полупроводника с металлическими токоподводами;
- технологичность изготовления и механическая прочность преобразователей;
- стабильность свойств полупроводникового материала.

Ни один из известных материалов не отвечает в полной мере всем перечисленным выше требованиям. Поэтому выбор материала в значительной степени определяется областью применения магниторезисторов.

Высокую подвижность носителей зарядов имеют: антимонид индия (*InSb*) и арсенид индия (*InAs*), эвтектические сплавы типа *InSb – NiSb* и *InSb – GaSb*, а также германий (*Ge*), теллурий (*HgTe*) и селенид (*HgSe*) ртути, антимонид (*GaSb*) и арсенид (*GaAs*) галлия. Увеличение концентрации носителей зарядов ведет к уменьшению ТКС. Антимонид индия является одним из лучших полупроводниковых материалов для изготовления магниторезисторов. Подвижность электронов у этого материала достигает  $100\ 000\ \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Благодаря этому наблюдается сильная зависимость сопротивления магниторезистора от величины магнитного поля. Из-за высокой подвижности электронов магнитные поля с индукцией выше 0,3 Тл для антимонида индия являются сильными, и кривая зависимости удельного сопротивления полупроводника в полях с более высокой индукцией становится линейной. При соответствующем подборе материалов могут быть изготовлены магниторезисторы с высокой чувствительностью к магнитному полю и малой температурной зависимостью. Эвтектические сплавы на основе антимонида индия обладают свойствами, аналогичными свойствам *InSb*. Так, например, магниторезисторы в форме меандра из *InSb* с  $n=1,5\cdot 10^{17}\ \text{см}^{-3}$  и начальным сопротивлением  $R_0=20\ \text{Ом}$  имеют относительное изменение сопротивления около 6 в поле с индукцией  $B=1\ \text{Тл}$  и ТКС  $(2\dots 5)\cdot 10^{-4}\ \text{1/град}$ . Изменение сопротивления меандра из антимонида

индия с высокой подвижностью носителей тока при комнатной температуре в указанном выше поле может достигать 25...28.

Арсенид индия обладает подвижностью носителей тока до  $36\ 000\ \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  и соответственно меньшей зависимостью сопротивления от магнитного поля. Достоинством арсенида индия является слабая зависимость электропроводности от температуры. Подвижности носителей тока остальных полупроводниковых материалов ниже  $15\ 000\ \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , и эти материалы используются при создании магниторезисторов, работающих в специфических условиях, как, например, при низких или высоких температурах и т. д. Эффект Гаусса максимален у полупроводниковых материалов с большими подвижностями носителей тока, но такие материалы, как правило, обладают малым удельным сопротивлением, поэтому, чтобы повысить омическое сопротивление ЭРЭ, их выпускают в виде тонких нитей. Примером могут быть «висмутовые спирали» магниторезисторов, используемых для измерения сильных магнитных полей.

Полупроводниковый магниторезистор состоит из изоляционной подложки толщиной 0,1...0,5 мм, на которую наклеена пластина толщиной около 20 мкм. К полупроводниковой пластине подпаиваются или привариваются токоподводы. Для увеличения активного сопротивления и уменьшения габаритов магниторезисторов полупроводниковая пластина изготавливается в форме меандра. Такая конструкция магниторезистора представлена на рисунке 4.13 (а) [35]. При такой конструкции можно путем изменения геометрических размеров меандра и путем выбора полупроводникового материала варьировать сопротивление магниторезистора при отсутствии магнитного поля в широких пределах – от десятых долей Ом до десятков кОм.

Так как коэффициент формы длинного полупроводникового магниторезистора очень мал из-за разности потенциалов Холла, возникающих на боковых гранях, то, поэтому полупроводниковую пластину разделяют рядом поперечных проводящих полос. Это равносильно последовательному соединению ряда коротких магниторезисторов. Расстояние между нанесенными проводящими полосами должно быть в 4...5 раз меньше ширины полупроводниковой пластины. Общий вид магниторезистора с поперечными полосами показан на рисунке 4.13 (б). Коэффициент формы у такого магниторезистора равен 0,9...0,95. В настоящее время разработаны эвтектические сплавы полупроводниковых материалов

*InSb–NiSb*. В таких полупроводниках полосы образуются в процессе роста кристалла. Так, например, эвтектический сплав *InSb–NiSb* содержит 1,8 % по весу *NiSb* в форме параллельных иголок диаметром около 1 мкм и длиной 50 мкм. При изготовлении из таких сплавов магниторезисторов отпадает необходимость пайки проводящих поперечных полос. Процесс изготовления преобразователя становится более технологичным. На рис. 4.13 (в) изображен эвтектический сплав *InSb–NiSb* в разрезе при 200-кратном увеличении. Слева показан разрез параллельно иголкам, справа – перпендикулярно. Иголки из *NiSb* в пластине магниторезистора надо располагать перпендикулярно вектору магнитного поля, действующего на преобразователь. Это необходимо учитывать при вырезании полупроводниковой пластины из кристалла. Смысл сказанного ясен из рис. 4.13 (г), где изображены магниторезисторы, изготовленные из эвтектического сплава. Силовые линии измеряемых магнитных полей направлены параллельно плоскости пластины магниторезистора и перпендикулярно ей. Первый тип преобразователей служит для измерения осевых полей в электрических катушках. Коэффициент относительного изменения сопротивления таких магниторезисторов лишь на несколько процентов меньше, чем для диска Корбино. В ряде случаев практического использования эффекта Гаусса, например при измерении градиента поля, необходимы многоэлектродные магниторезисторы. Принципиальный вид преобразователя с тремя электродами изображен на рис. 4.13 (д). У него две полупроводниковые пластины наклеены на подложку параллельно друг другу на расстоянии 0,1...0,2 мм. Один электрод общий.

На рис. 4.13 (е) показана дифференциальная мостовая схема на магниторезисторах. Схема изготовлена на одной подложке, что уменьшает температурную погрешность и разброс параметров материала плеч моста. Площадь изоляционной подложки 30 мм<sup>2</sup>. Такие преобразователи используются в измерителях малых перемещений.

Магниторезисторы, рассчитанные на большие токи нагрузки, имеют полупроводниковую пластину толщиной до нескольких миллиметров. Пластина чаще всего спаивается из отдельных секций по торцевым плоскостям. По существу это равносильно последовательному соединению нескольких коротких магниторезисторов. Часто между секциями впаиваются медные

пластины, что способствует лучшему теплоотводу. Подложка у мощных магниторезисторов применяется редко.

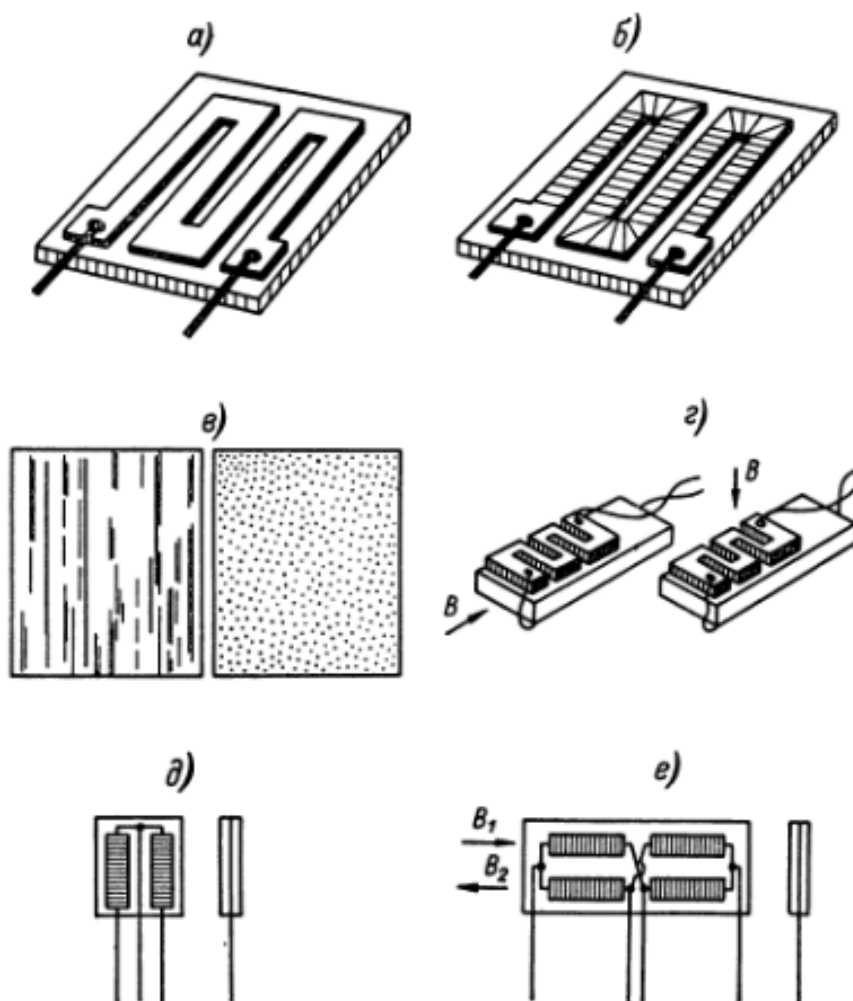


Рис. 4.13. Конструкция магниторезисторов: а) – магниторезистор с полупроводниковой пластиной в форме меандра; б) – магниторезистор с поперечными проводящими полосами на полупроводниковой пластине; в) – эвтектический сплав InSb—NiSb в разрезе при 200-кратном увеличении; г) – магниторезисторы из эвтектического вещества для измерения осевых полей в электрических катушках и в зазорах магнитопроводов; д) – дифференциальный преобразователь; е) – дифференциальная мостовая схема на магниторезисторах

Для увеличения абсолютного изменения сопротивления используют последовательно соединенные магниторезисторы. Компактная конструкция при последовательном соединении дисков Корбино получается, если первую пару дисков, разделенную тонким диэлектриком, соединить общим кольцевым электродом, припаянным к окружности дисков. Связь с третьим диском осуществляется с помощью центрального электрода. Для использования в

магнитопроводах с кольцевым зазором магниторезистор изготавливают трубчатой формы с электродами, расположенными на торцах.

Сопротивление и чувствительность магниторезисторов зависят от температуры. На рис. 4.14 приведены типичные зависимости параметров магниторезисторов на основе *InSb–NiSb* (от температуры окружающей среды и магнитной индукции).

Основные параметры некоторых моделей магниторезисторов представлены в таблице 4.3.

Тот факт, что электроны обладают собственным магнитным моментом – спином, используется в новом направлении науки – магнитоэлектронике или спинтронике [45]. Оно изучает магнитные и магнитооптические явления в металлических и полупроводниковых структурах, а также квантовые магнитные явления в тонких структурах. Отдельное направление спинтроники исследует многослойные структуры, состоящие из чередующихся тонких пленок магнитных и немагнитных материалов. Варьируя структуру и состав слоев, а также получая ультратонкие слои магнитных и немагнитных материалов с резкими границами раздела, получают кардинально новые магнитные и электрические свойства.

В таких материалах возникает ряд уникальных физических явлений [45], обусловленных тем, что магнитные моменты в трехслойной пленке могут быть параллельны: ферромагнитная конфигурация (ФМ), или антипараллельны – антиферромагнитная конфигурация (АФМ) (см. рис. 4.15).

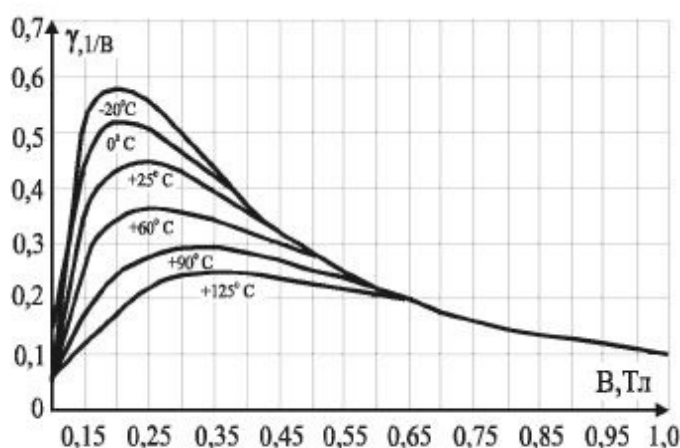


Рис. 4.14. Зависимость магнитной чувствительности магниторезисторов на основе сплава *InSb–NiSb* от индукции управляющего магнитного поля для ряда температур



Таблица 4.3.

Параметры представителей магниторезисторов

Тип	Параметр	Значение
MR 1...3	$R_o$	50...100 Ом
	Допуск	$\pm 20\%$
	$P_{ном}$	5...20 (с теплоотводом) мВт
	$R_B/R_o$ (при 0,5/1,0 Тл)	3,5/7
CM 1-1	Температура окр. ср.	-60...+85 °С
	$R_o$	22...220 Ом
	Допуск	$\pm 20\%$
	$P_{ном}$	До 0,5 (с теплоотводом) мВт
	$R_B/R_o$ (при 1,0 Тл)	6...10
CM 4-1	Температура окр. ср.	-60...+85 °С
	$R_o$	47 Ом
	Допуск	$\pm 20\%$
	$P_{ном}$	До 6 мВт
	$R_B/R_o$ (при 0,5 Тл)	3,3
	ТКС	$(0,55) \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$

В ферромагнитных материалах выделяют два типа электронов в зависимости от ориентации их спина: "спин-вверх" и "спин-вниз". На рисунках 4.15 (а) и (б) эти два случая обозначены цифрами 1 и 2. Оказалось, что если ориентация спина не совпадает с магнитным моментом слоя в АФМ-конфигурации, то электрон не может попасть в этот слой, и электрическое сопротивление становится больше (случай 2 рис. 4.15 (а)). После перехода конфигурации из АФМ в ФМ при возрастании внешнего магнитного поля электрон способен перескочить в смежный слой, и сопротивление значительно уменьшается (переход 1 рис. 4.15 (б)). Этот эффект называется гигантским магнитосопротивлением (ГМС).

Результатом совершенствования структур с ГМС стали спиновые вентили, состоящие из двух магнитных слоев, разделенных немагнитным слоем, а магнитный момент одного из слоев "закреплен" антиферромагнитным слоем (АФМ) с фиксированным направлением магнитного момента. Эффект ГМС наблюдается и в структурах типа пермаллой (*NiFe*)-медь(*Cu*)-кобальт(*Co*)-АФМ. Если поместить такую структуру в магнитное поле, верхний слой изменяет конфигурацию магнитных моментов, направление которых изменяется относительно направления поля нижнего слоя АФМ и электрическое сопротивление структуры растет.

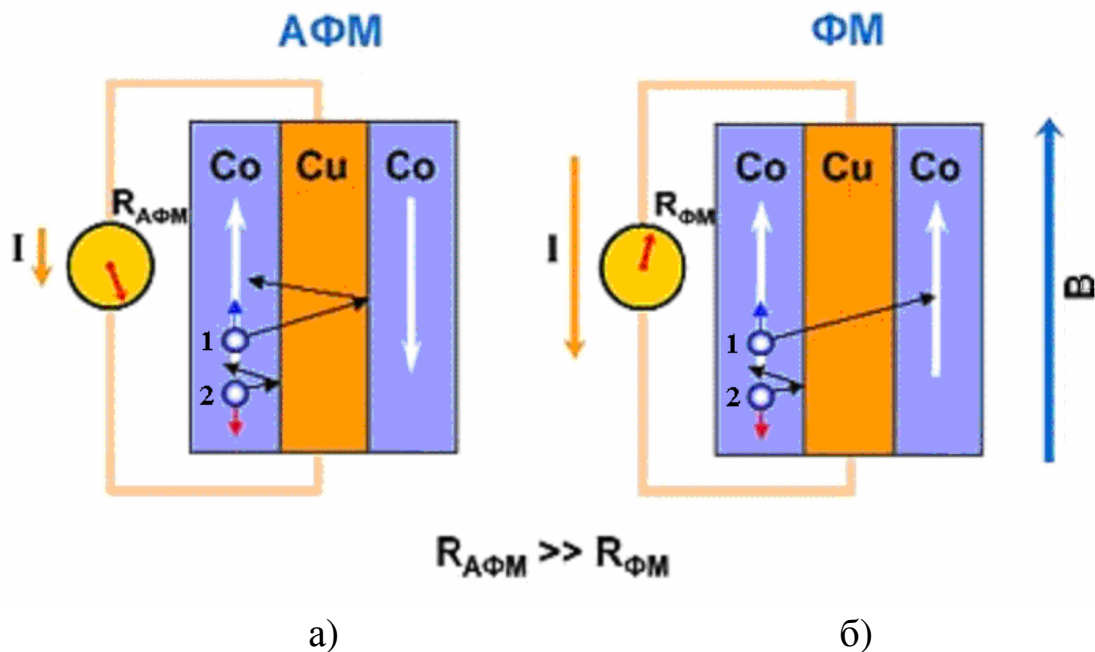


Рис. 4.15. Антиферромагнитная – (а) и ферромагнитная – (б) конфигурации

Подобный эффект используется в считывающих головках жестких дисков с плотностью записи более 100 ГБ/дюйм<sup>2</sup>. Подбором материалов, толщины и последовательности слоев в структурах, добиваются требуемых магнитных и электрических свойств.

Другим направлением исследования является так называемый туннельный магнитный переход в структурах типа ферромагнетик-диэлектрик-ферромагнетик, в котором возникает большое туннельное магнитосопротивление (ТМС). В качестве диэлектрика используется оксид алюминия  $Al_2O_3$ . Туннелирование электрона через диэлектрик происходит вследствие малой толщины слоя – менее 2 нм. Вероятность туннелирования изменяется в зависимости от проводимости структуры, которая зависит, в свою очередь, от направления магнитных моментов верхнего слоя ферромагнетика, которое может меняться относительно нижнего слоя ферромагнетика. Если магнитные моменты ферромагнитных слоев направлены параллельно, то проводимость магнитного туннельного перехода велика, а в противном случае: вероятность туннелирования мала и электрическое сопротивление структуры велико.

Структуры с магнитным туннельным переходом нашли применение в считывающих головках жестких дисков и для создания элементарных ячеек энергонезависимой магниторезистивной памяти – MRAM (Magnetic Random Access Memory). MRAM – перспективная энергонезависимая память, время выборки данных

которой может составлять 10 нс (в 5 раз меньше, чем у Flash-памяти), время записи – 2 нс (на 3 порядка меньше, чем у Flash-памяти). При этом энергопотребление – в 2 раза меньше по сравнению с Flash-памятью.

#### 4.4. Фоторезисторы

Фоторезисторы – полупроводниковые приборы с однородной (гомогенной) структурой, которые принципиально отличаются от других типов фотоприемников.

Принцип действия основан на эффекте фотопроводимости, т.е. на изменении проводимости полупроводника при его освещении.

Полупроводниковые фоторезисторы работают в цепях как постоянного, так и переменного тока. Техническими условиями допускается так же использование фоторезисторов в импульсных режимах, при средней мощности рассеяния, не превышающей максимально-допустимого значения. Фоторезисторы могут работать при больших интенсивностях света, при условии не превышения предельного значения фототока и мощности рассеяния.

Благодаря высокой чувствительности, простоте и разнообразию конструкций фоторезисторы имеют широкое применение в радиоэлектронике. Основными областями применения являются: системы фотоэлектрической автоматики и телемеханики, измерительные приборы, экспонетрические приборы и фотодатчики, системы теле контроля, а так же тепловизионная аппаратура промышленного, медицинского и оборонного назначения [36].

Обладая повышенной допустимой мощностью рассеивания по сравнению с некоторыми типами фотоэлементов, фоторезисторы позволяют создавать простые и надежные фотореле без усилителей тока. Такие фотореле незаменимы в устройствах для телеуправления, контроля и регулирования, в автоматах для разбраковки, при сортировке и счете готовой продукции, для контроля качества и готовности самых различных деталей. Широко используются фоторезисторы в полиграфической промышленности для обнаружения обрывов бумажной ленты и контроля за количеством листов, подаваемых в печатную машину. В измерительной технике фоторезисторы применяются для измерения высоких температур, для регулировки температуры в различных технологических процессах. Контроль уровня жидкости и сыпучих тел, защита персонала от входа

в опасные зоны, контроль за запыленностью и задымленностью самых различных объектов, автоматические выключатели уличного освещения и турникеты в метрополитене – вот далеко не полный перечень областей применения фоторезисторов.

Фоторезисторы обладают высокой чувствительностью, стабильностью, экономичны и надежны в эксплуатации. В целом ряде случаев они с успехом заменяют вакуумные и газонаполненные фотоэлементы.

Для изготовления серийных фоторезисторов используются различные типы материалов: сернистый кадмий ( $CdS$ ), селенистый кадмий ( $CdSe$ ), сернистый свинец ( $PbS$ ) и селенид свинца ( $PbSe$ ). Фоторезисторы чувствительные к инфракрасному излучению длинноволнового диапазона изготавливают на основе соединения кадмий-ртуть-теллур и антимонида индия ( $InSb$ ) [37].

Светочувствительный элемент в некоторых типах фоторезисторов выполнен в виде круглой или прямоугольной таблетки, спрессованной из порошкообразного сульфида или селенида кадмия, корпусированного и имеющего штыревые выводы, или он представляет собой тонкий слой полупроводника, нанесенного на стеклянное основание с токонесущими выводами.

Конструкция монокристаллического и пленочного фоторезисторов показана на рисунках 4.16 и 4.17 [38].

Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения (см. рис. 4.18) и не освещен, то в его цепи будет протекать темновой ток:

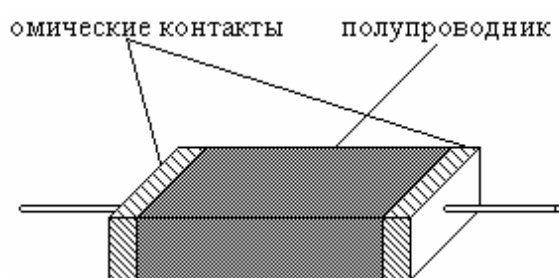


Рис. 4.16. Структура монокристаллического фоторезистора

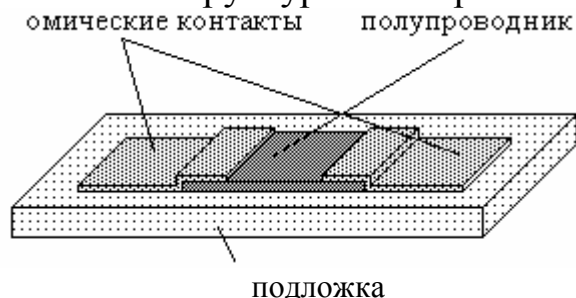


Рис. 4.17. Структура пленочного фоторезистора

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

где:  $E$  – э.д.с. источника питания;

$R_T$  – величина электрического сопротивления фоторезистора в темноте, называемая темновым сопротивлением;

$R_H$  – сопротивление нагрузки.

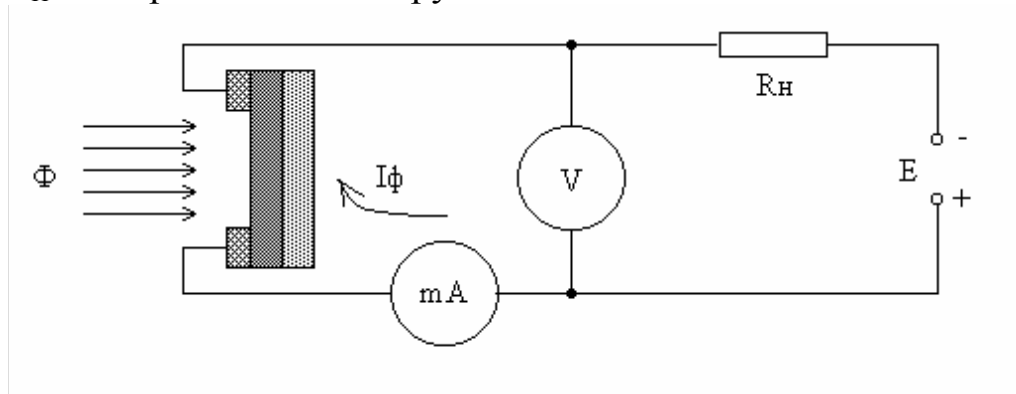


Рис. 4.18. Схема включения для измерения параметров и характеристик фоторезисторов

При освещении фоторезистора энергия фотонов расходуется на перевод электронов в зону проводимости. Количество свободных электронно-дырочных пар возрастает, сопротивление фоторезистора падает и через него течет световой ток:

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

где  $R_C$  – величина электрического сопротивления фоторезистора при наличии света.

Разность между световым и темновым током дает значение тока  $I_\phi$ , получившего название первичного фототока проводимости:

$$I_\phi = I_C - I_T.$$

Когда лучистый поток мал, первичный фототок проводимости практически безынерционен и изменяется прямо пропорционально величине светового потока, падающего на фоторезистор. По мере возрастания величины потока фотонов увеличивается число электронов проводимости. Двигаясь внутри вещества, электроны сталкиваются с атомами, ионизируют их и создают дополнительный поток электрических зарядов, получивший название вторичного фототока проводимости. Увеличение числа ионизированных атомов тормозит движение электронов проводимости. В результате этого изменения фототока запаздывают во времени относительно

изменений светового потока, что определяет достаточно большую инерционность фоторезистора.

К основным характеристикам фоторезисторов относятся:

- ВАХ;
- световая;
- спектральная;
- частотная.

ВАХ характеризует зависимость фототока (при постоянном световом потоке  $\Phi$ ) или темнового тока от приложенного напряжения (см. рис. 4.19).

Закон Ома нарушается в большинстве случаев только при высоких напряжениях на фоторезисторе. Эта характеристика линейна в довольно широких пределах. Для некоторых типов фоторезисторов при напряжениях меньше рабочего наблюдается нелинейность.

Световая (люксамперная) характеристика показывает зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава (рис. 4.20).

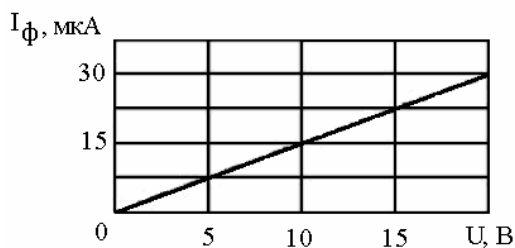
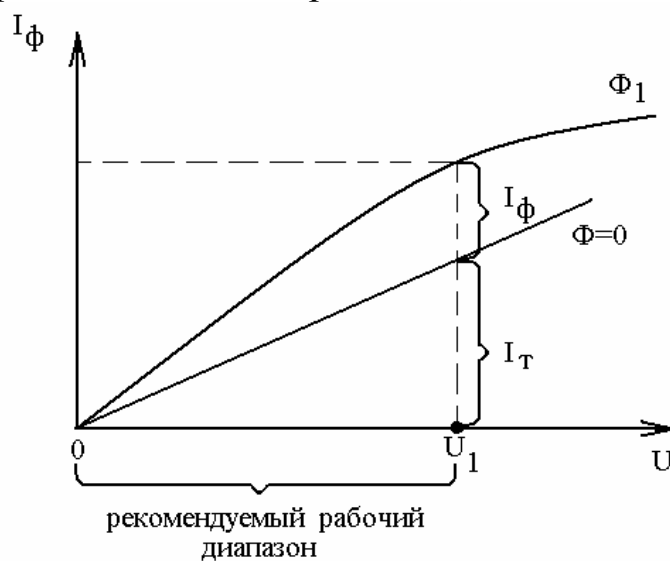


Рис. 4.19. Вольтамперная характеристика фоторезистора

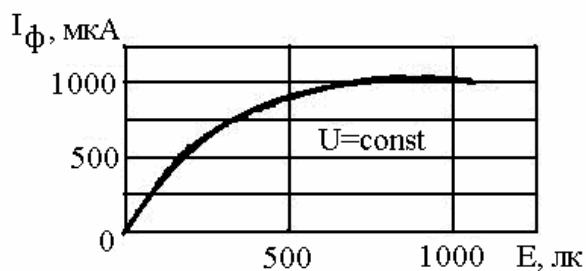


Рис. 4.20. Световая характеристика фоторезистора

Полупроводниковые фоторезисторы имеют нелинейную люксамперную характеристику. Наибольшая чувствительность получается при малых освещенностях. Это позволяет использовать фоторезисторы для измерения очень малых интенсивностей излучения. При увеличении освещенности световой ток растет примерно пропорционально корню квадратному из освещенности. Наклон световой характеристики зависит от приложенного к фоторезистору напряжения.

Спектральная – характеризует чувствительность фоторезистора при действии на него потока излучения постоянной мощности определенной длины волны (рис. 4.21). Спектральная характеристика определяется материалом, используемым для изготовления светочувствительного элемента.

Как видно из этих характеристик, фоторезисторы с сернисто-кадмиевым светочувствительным элементом имеют максимальную чувствительность в видимой части спектра, фоторезисторы, выполненные на основе селенистого кадмия, наиболее чувствительны к красной и инфракрасной части спектра, а сернисто-свинцовые – имеют максимум чувствительности в инфракрасной области спектра.

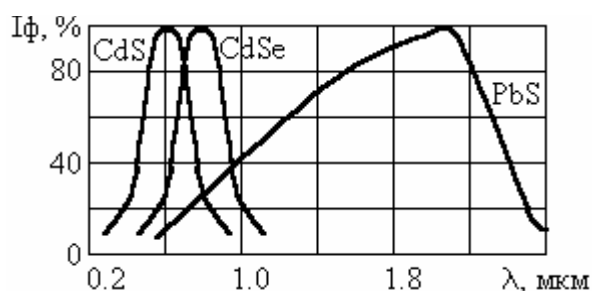


Рис. 4.21. Спектральные характеристики фоторезисторов из различных материалов

Частотная характеристика показывает чувствительность фоторезистора при действии на него светового потока, изменяющегося с определенной частотой. Наличие инерционности у фоторезисторов приводит к тому, что величина их фототока зависит

от частоты модуляции падающего на них светового потока – с увеличением частоты светового потока фототок уменьшается (см. рис. 4.22).

Инерционность ограничивает возможности применения фоторезисторов при работе с переменными световыми потоками высокой частоты.

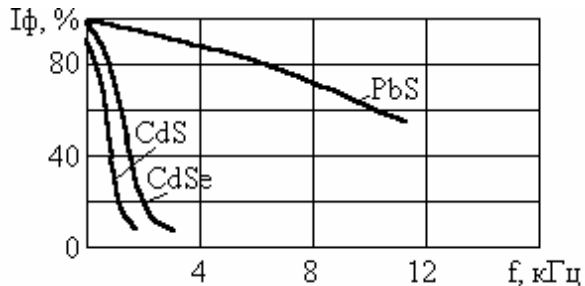


Рис. 4.22. Частотные характеристики фоторезисторов

К основным параметрам фоторезисторов относятся [39].

1. Темновое сопротивление  $R_T$  – сопротивление фоторезистора в отсутствие падающего на него излучения в диапазоне его спектральной чувствительности. У некоторых типов фоторезисторов темновое сопротивление может иметь значительный разброс.

2. Световое сопротивление  $R_C$  – сопротивление фоторезистора, измеренное через определенный интервал времени после начала воздействия излучения, создающего на нем освещенность заданного значения.

3. Кратность изменения сопротивления  $K_R$  – отношение темнового сопротивления фоторезистора к сопротивлению при определенном уровне освещенности (световому сопротивлению). Это один из важнейших параметров, характеризующий чувствительность фоторезистора. С увеличением освещенности кратность возрастает по линейному закону, с уменьшением – снижается.

Наименьшей чувствительностью обладают сернисто-свинцовые фоторезисторы, у которых кратность при освещенности 200 лк не ниже 1,2. У остальных типов фоторезисторов чувствительность значительно выше.

4. Допустимая мощность рассеяния – мощность, позволяющая длительную эксплуатацию фоторезистора при температуре +20 °С в окружающей среде без опасности появления необратимых изменений в светочувствительном слое.

5. Общий ток фоторезистора – ток, состоящий из темнового тока и фототока:

$$I = I_T + I_\phi .$$



6. Фототок – ток, протекающий через фоторезистор при указанном напряжении на нем, обусловленный только воздействием потока излучения с заданным спектральным распределением.

7. Удельная чувствительность – отношение фототока к произведению величины падающего на фоторезистор светового потока и приложенного к нему напряжения, мкА/(лм·В):

$$K_0 = \frac{I_\phi}{\Phi U},$$

где  $I_\phi$  – фототок, равный разности токов, протекающих через фоторезистор в темноте и при определенной освещенности (200 лк), мкА;  $\Phi$  – падающий световой поток, лм;

$U$  – напряжение, приложенное к фоторезистору, В.

8. Интегральная чувствительность – произведение удельной чувствительности на предельное рабочее напряжение:

$$S_{инт} = K_0 U_{max}.$$

Чувствительность фоторезисторов меняется (уменьшается) в первые 50 часов работы, оставаясь в дальнейшем практически постоянной в течение всего срока службы, измеряемого несколькими тысячами часов.

9. Постоянная времени  $\tau_\phi$  – время, в течение которого фототок изменяется на 63%, т.е. в  $e$  раз. Постоянная времени характеризует инерционность прибора и влияет на вид его частотной характеристики.

При включении и выключении света фототок возрастает до максимума и спадает до минимума не мгновенно (см. рис. 4.23).

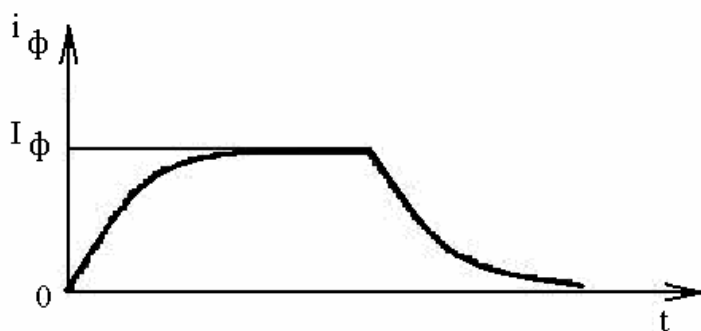


Рис. 4.23. Кривая релаксации фототока

Здесь  $I_\phi$  – стационарное значение фототока при освещении. Характер и длительность кривых нарастания и спада фототока во времени существенно зависят от механизма рекомбинации неравновесных носителей в данном материале, а также от величины интенсивности света. При малом уровне инжекции нарастание и спад

фототока во времени происходит по экспоненте с постоянной времени, равной времени жизни носителей в полупроводнике.

10. Рабочее напряжение  $U_{\text{раб}}$  – постоянное напряжение, приложенное к фоторезистору, при котором обеспечиваются номинальные параметры при длительной его работе в заданных эксплуатационных условиях (гарантирующее продолжительную работу фоторезистора). При работе в импульсном режиме у сернисто-кадмиевых и селенисто-кадмиевых фоторезисторов допустимое напряжение может в 2...3 раза превышать рабочее. У сернисто-свинцовых фоторезисторов рабочее напряжение можно принять равным  $0,1 \cdot R_T$ , где  $R_T$  – сопротивление в кОм.

11. Максимально допустимое напряжение фоторезистора  $U_{\text{max}}$  – максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к фоторезистору, при котором отклонение его параметров от номинальных значений не превышает указанных пределов при длительной работе в заданных эксплуатационных условиях.

12. Интервал рабочих температур для сернисто-кадмиевых фоторезисторов составляет от  $-60$  до  $+85$  °С, для селенисто-кадмиевых – от  $-60$  до  $+40$  °С и для сернисто-свинцовых – от  $-60$  до  $+70$  °С.

13. Для каждого типа фоторезисторов в справочных данных указываются область спектральной чувствительности и максимум спектрального распределения fotocувствительности. Фоторезисторы, изготовленные из кадмиевых соединений ( $CdS$  или  $CdSe$ ), имеют чувствительность в видимой области спектра от  $0,3$  до  $1,1$  мкм. Приборы на основе соединений свинца ( $PbS$ ,  $PbSe$ ) обладают чувствительностью к инфракрасному излучению в диапазоне от  $0,5$  до  $4,6$  мкм.

14. Промышленные типы фоторезисторов достаточно стабильны при хранении в темноте. В процессе эксплуатации стабильность параметров фоторезисторов, в основном, определяется выделяемой мощностью рассеивания и значением освещенности: при незначительной освещенности и мощности рассеивания фотопроводимость мало изменяется, а при больших значениях, близкой к допустимой, фотопроводимость уменьшается, в основном в начальный период работы. Уменьшение может достигать 20...30 %. Изменение фотопроводимости вызвано двумя причинами: разогревом светочувствительного слоя – усталостью и происходящими необратимыми физико-химическими процессами – старением. После длительного пребывания фоторезисторов в темноте в нерабочем

состоянии фотопроводимость обычно возрастает. Восстанавливается та часть, которая была вызвана усталостью.

Для стабилизации работы фоторезисторов применяют искусственное старение, которое осуществляется на предельной допустимой мощности рассеивания.

15. Фоторезисторам присущи собственные шумы. Они зависят от напряжения, освещенности, температуры и конструкции фоторезистора. Фоторезисторы с электродами, выполненными из индия и золота, имеют наименьший уровень шума [37].

Старое обозначение фоторезисторов расшифровывается следующим образом:

ФС □□□□.

За буквами ФС, указывался материал фоточувствительного элемента: К –  $CdS$ , Д –  $CdSe$ , А –  $PbS$ . Далее шли цифры – указание на конструктивное оформление фоторезистора, иногда перед цифрой стояла буква Г (герметизированный) или П (пленочный), т.е. характеризующие конструктивное исполнение, и означающие, что конструкция герметизирована для условий тропического климата и повышенной влажности.

Новое обозначение фоторезисторов состоит из букв ФР и номера разработки.

Например, ФР-193Д означает: фоторезистор с номером разработки 193, группы Д.

Название типа фоторезисторов складывается из букв и цифр, причем в старых обозначениях буквы А, К и Д обозначали тип использованного светочувствительного материала, в новом же обозначении эти буквы заменены цифрами.

В таблице 4.4 приведены наименования наиболее распространенных обозначений фоторезисторов, а в таблице 4.5 – параметры некоторых моделей фоторезисторов.

Среди фоторезисторов следует особо отметить конструкцию ФСК-6, приспособленную для работы от отраженного света, для чего его корпус имеет в центре отверстие для прохождения света к отражающей поверхности. Выпускаются фоторезисторы в металлическом корпусе с цоколем, напоминающим ламповый, или в корпусе, как у герметизированных конденсаторов или транзисторов. Малогабаритные пленочные фоторезисторы выпускаются в пластмассовых и металлических корпусах с влагозащитным покрытием светочувствительного элемента прозрачными эпоксидными смолами [39].

Таблица 4.4.

## Типовые обозначения фоторезисторов

Вид фоторезисторов	Обозначение
Сернисто-свинцовые	ФСА-0; ФСА-1; ФСА-6; ФСА-Г1; ФСА-Г2
Сернисто-кадмиевые	ФСК-0,1,2,4,5,6,7; ФСК-Г1; ФСК-Г2; ФСР-Г7; ФСК-П1; СФ2-1, 2, 4, 9, 12
Селенисто-кадмиевые	ФСД-0; ФСД-1; ФСД-Г1; СФ3-1,8

Таблица 4.5.

## Параметры представителей фоторезисторов

Тип	Параметр	Значение
ФР-764,765 селенисто-кадмиевые, герметизированные	Температура окр. ср.	-60...+85 °С
	$R_T$	2 ... 3,3 МОм
	$U_{раб}$	До 50 В
	$P_{ном}$	До 350 мВт
	$I_T$	10 мкА
	$R_T/R_{CB}$	Не менее 150
ФСА-0,1 сернисто-свинцовые	Температура окр. ср.	-60...+70 °С
	$R_T$	40 кОм ... 1 МОм
	$U_{раб}$	До 100 В
	$P_{ном}$	До 10 мВт
	$R_T/R_{CB}$	Не менее 1,2
СФ2-5А герметичный	$R_T$	1 МОм
	$U_{раб}$	До 1,3 В
	$P_{ном}$	До 25 мВт
	$I_T$	До 3 мкА
	$I_{\Phi}$ (200 лк)	До 500 мкА
	$D$	До 10 мкВ/В
	$\lambda_{max}$	0,55 мкм
	$\tau_{\Phi}$	2 с
	$R_T/R_{CB}$	Не менее 384
ФСК-0,1 сернисто-кадмиевые	Температура окр. ср.	-60...+40 °С
	$R_T$	5 МОм
	$U_{раб}$	До 50 В
	$P_{ном}$	До 125 мВт
	$I_T$	До 10 мкА
	$I_{\Phi}$	До 2000 мкА
	$R_T/R_{CB}$	Не менее 200

Фоторезисторы выпускаются в пластмассовом или металлическом корпусе, а так же в бескорпусном варианте. Большинство приборов являются неохлаждаемыми, т.е. предназначены для работы при температуре окружающей среды. Но выпускается целый ряд приборов охлаждаемых, работа которых возможна только после заливки в специальный сосуд хладагента, предназначенного для охлаждения фоточувствительного элемента.

Таким образом, при простоте конструкции, малых габаритах и массе, больших значениях фоточувствительности, фоторезисторы обладают небольшим быстродействием порядка  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  с.

## Контрольные вопросы

1. Какова структура терморезистора?
2. Как проконтролировать сопротивление терморезистора?
3. При каких условиях срабатывает пожарная сигнализация, датчиком которой служит терморезистор?
4. Каков температурный рабочий диапазон терморезисторов?
5. Какие недостатки у терморезисторов? Какова их физическая причина?
6. Для чего служат варисторы?
7. Как измерить сопротивление варистора?
8. В чем сложность изготовления варисторов?
9. Какие материалы используются при производстве варисторов?
10. Какой параметр характеризует интенсивность теплоотдачи варистора при перенапряжении?
11. На что влияет собственная емкость варистора?
12. Чем определяется нагрузочная способность магниторезистора?
13. Что такое тензодатчики и каков их принцип действия?
14. Что определяет подвижность электронов в материале магниторезистора?
15. Для чего магниторезисторы изготавливаются в виде меандра?
16. Для чего служат многоэлектродные магниторезисторы?
17. Что характеризуют темновые характеристики фоторезистора?
18. На каком фотоэффекте работает фоторезистор и в чем особенности его работы?
19. Почему быстродействие фоторезистора невелико по сравнению с другими полупроводниковыми нелинейными резисторами?
20. Чем объясняется нелинейность световой характеристики фоторезистора?
21. Для чего необходимо охлаждение некоторых моделей фоторезисторов?

## Литература

1. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Дукельский К.В. Электрорадиоэлементы и передача данных в компьютерных системах: Методические указания к лабораторным работам. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 35с.
2. ГОСТ 28883-90 (МЭК 62-74) Коды для маркировки резисторов и конденсаторов.
3. [www.promelec.ru](http://www.promelec.ru) – резисторы постоянного сопротивления.
4. Резисторы: Справочник/В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Пратусевич и др.; Под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с. ISBN 5-256-00374-7.
5. Свитенко В.И. Электрорадиоэлементы – М: Высшая школа, 2000.
6. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы . - М.: Радио и связь, 1999. - 352с.
7. Волгов В.А. «Детали узлы радиоэлектронной аппаратуры».- М. Энергия, 1967.
8. К. С. Петров «Пассивные компоненты радиоэлектронной аппаратуры» <http://dvo.sut.ru/libr/eqp/031/index.htm>.
9. <http://www.audiomania.ru/rezistor/>.
10. Проволочные резисторы. М., 1970 Иванов Д.М. и др. Переменные резисторы. М., 1981 Зайцев Ю.В. и др. Полупроводниковые резисторы в электротехнике. М., 1988.
11. <http://www.i-electric.ru/content.html?cid=136>.
12. С.С. Боровик, М.А. Бродский. «Ремонт и регулировка бытовой радиоэлектронной аппаратуры». Минск; «Высшая школа», 1989г.
13. [http://ukrsk.com.ua/rezistory\\_R2-67.html](http://ukrsk.com.ua/rezistory_R2-67.html).
14. [www.radiocomp.net](http://www.radiocomp.net).
15. <http://www.tenzo-pribor.ru/production/tenzo/1/>.
16. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Термистор>.
17. Шашков А.Г. Терморезисторы и их применение. М.1967.
18. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. 5-е изд., исправленное. – СПб.: Издательство «Лань», 2001.–480с.
19. [http://window.edu.ru/window\\_catalog/files/r20155/rsu459.pdf](http://window.edu.ru/window_catalog/files/r20155/rsu459.pdf).
20. МРБ 1203. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры (конденсаторы, резисторы)- Справочник.

21. Резисторы Справочник. Четвертков И.И. (1987).
22. <http://www.electrosad.ru/Electronics/termSpr.htm>.
23. Гендин Г.С. Все о резисторах. Справочник. – М.: Горячая линия-Телеком, 1999. ППЗУ–192с.
24. <http://www.proton-impuls.ru/stati/opvv.htm>.
25. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Варистор>.
26. ТУ 11-85. Варисторы постоянные СН2-1. Технические условия. ОЖО.468.171.
27. ТУ 11-85. Варисторы постоянные ВР-1. Технические условия. ОЖО.468.227.
28. ТУ 11-85. Варисторы постоянные СН2-2. Технические условия. ОЖО.468.205.
29. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб.: Лань. – 2006. – 479 с.
30. Квасков В.Б. Полупроводниковые приборы с биполярной проводимостью.-М : Энерго- атомиздат. 1988.-128 с.: ил.
31. Пантелеев В.А. Вольтамперные характеристики силовых варисторов. В кн.: Проблемы освоения природных ресурсов Европейского Севера. Ухта: Изд. УИИ, 1996. с. 12 – 17.
32. P. S. Kireev Semiconductor physics, 2nd ed.. — Moscow: Mir Publishers, 1978. — С. 696.
33. В. М. Askerov Electron Transport Phenomena in Semiconductors, 5-е изд.. — Singapore: World Scientific, 1994. — С. 416.
34. Бараночников М.Л. «Микромагнитоэлектроника» ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
35. Г. И. Котенко «Магниторезисторы» Л., «Энергия», 1972. 80 с.
36. Микроэлектроника. Оптимизация маскирования фоторезисторами в технологии КМОП - интегральных схем. т. 31, №4 2002.
37. Электроника. Известия вузов. №3 2001.
38. Гершунский Б. С. Основы электроники и микроэлектроники. – К.: Вища школа. 1989. – 423 с.
39. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. Т.3– М.; Радио Софт , 2000. – 512 с.
40. [www.chipdip.ru](http://www.chipdip.ru).
41. <http://www.elbase.ru/products/index/684>.
42. [http://www.giricond.ru/production/resistors/folder\\_1282851641](http://www.giricond.ru/production/resistors/folder_1282851641).



43. [http://www.giricond.ru/production/resistors/thermoresistors\\_negative\\_tcr/](http://www.giricond.ru/production/resistors/thermoresistors_negative_tcr/)].

44. <http://www.electricalschool.info/main/59-klassifikacija-rezistorov-po.html>.

45. Самардак А., Огнев А. Эпоха гигантских эффектов// Компьютерра, №10 от 16 марта 2006 года.

46. Э.М. Эпштейн. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. – М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А.М. Прохоров. 1988.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

## КАФЕДРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

### ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ

**1945-1966 РЛПУ** (кафедра радиолокационных приборов и устройств). Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленаведение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д.т.н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. – радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б.С. Мишин, доцент И.П. Захаров, доцент А.Н. Иванов.

**1966–1970 КиПРЭА** (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры). Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А.Н. Иванов.

**1970–1988 КиПЭВА** (кафедра конструирования и производства

электронной вычислительной аппаратуры). Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям – автоматизация конструирования ЭВА и технология микроэлектронных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д.т.н., проф. В.В. Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г.А. Петухов.

**1988–1997 МАП** (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования). Кафедра выпускала инженеров-конструкторов-технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф. С.А. Арустамов, затем снова проф. Г.А. Петухов.

С **1997 ПКС** (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, дизайна и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996 г. кафедрой заведует д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

За время своего существования кафедра выпустила более 4264 специалистов, бакалавров и магистров в области информационной безопасности компьютерных систем и проектирования электронно-вычислительных средств.

С **2011 ПБКС** (кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем). Готовит бакалавров и магистров по направлениям 090900 "Информационная безопасность" и 211000 "Конструирование и технология электронных средств".

В 2009 и 2010 кафедра заняла второе, а в 2011 году – почетное первое место в конкурсе среди кафедр университета.

На кафедре защищено 67 кандидатских и 7 докторских диссертаций.

Бондаренко Игорь Борисович

## **Электрорадиоэлементы. Резисторы**

**Учебное пособие**

В авторской редакции дизайн обложки И.Б. Бондаренко

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского национального исследовательского  
университета информационных технологий, механики и оптики

Зав. РИО Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национального  
исследовательского университета  
информационных технологий, механики  
и оптики

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

