

Тема 2. Радиокomпоненты радиоэлектронных средств

Лекция 6. Резисторы

Вопросы:

- 6.1 Классификация элементной базы и узлов в РЭА.
- 6.2 Основные сведения о резисторах. Классификация резисторов и их назначение.
- 6.3 Параметры и свойства резисторов.
- 6.4 Система обозначений и маркировка резисторов.

Литература

1. Петров К.С. Радиоматериалы и радиокomпоненты. – М.: Питер, 2003. – 512 с.

6.1 Классификация элементной базы и узлов в РЭА.

Современная радиоэлектронная аппаратура содержит огромное количество *радиокomпонентов*, т.е. самостоятельных (*комплектующих*) изделий, соединенных между собой в соответствии с принципиальной электрической схемой, обеспечивающей необходимую обработку электрических сигналов.

Радиокomпоненты являются неделимой составной частью радиоэлектронной аппаратуры, их устанавливают при выполнении сборочно-монтажных операций. В качестве радиокomпонентов выступают резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, транзисторы и т.п. К радиокomпонентам относятся также интегральные микросхемы (ИМС), которые, в свою очередь, состоят из большого числа радиоэлементов, реализующих функции транзисторов, резисторов и т.п.

Понятия радиоэлемент и радиокomпонент во многом тождественны. Так, транзистор в полупроводниковой ИМС, выступающий как элемент интегральной микросхемы, неотделимый от нее, выполняет те же функции, что и дискретный транзистор, выступающий как компонент радиоэлектронной аппаратуры. Принцип действия радиокomпонентов основан на взаимодействии с электрическим или магнитным полем, т.е. базируется на электрофизических свойствах радиоматериалов.

Радиокomпоненты делят на две группы: активные и пассивные.

К **активным компонентам** относят транзисторы, электронные лампы, микросхемы и т.д., т.е. такие компоненты, которые способны преобразовывать электрические сигналы и усиливать мощность.

К **пассивным элементам** относят резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы, коммутационные элементы, т.е. такие компоненты, которые предназначены для перераспределения электрической энергии.

Основную долю в РЭА имеют ИМС. Доля дискретных резисторов составляет от 15 до 50% всех элементов принципиальной схемы, конденсаторов – 25%, практически все катушки индуктивности и трансформаторы являются дискретными компонентами.

6.2 Основные сведения о резисторах. Классификация резисторов и их назначение.

Одним из пассивных радиокомпонент РЭА является **резистор**, предназначенный для перераспределения и регулирования электрической энергии между элементами схемы.

Принцип действия резисторов основан на способности радиоматериалов оказывать сопротивление протекающему через них электрическому току. Особенностью резисторов является то, что электрическая энергия в них превращается в тепло.

В идеале резистор характеризуется только сопротивлением электрическому току. На практике же резисторы в той или иной степени обладают также паразитной емкостью, паразитной индуктивностью и нелинейностью вольт-амперной характеристики.

По **зависимости вольт-амперной характеристики от внешних условий** резисторы подразделяются на

- постоянные резисторы (номинал сопротивления не управляется);
- переменные управляемые резисторы (потенциометры, реостаты, подстроечные резисторы);

- специальные резисторы (терморезисторы, у которых сопротивление зависит от температуры, фоторезисторы, у которых сопротивление зависит от освещенности, тензорезисторы, у которых сопротивление зависит от деформации резистора, магниторезисторы, у которых сопротивление зависит от величины магнитного поля).

По технологии изготовления различают:

- **проволочные резисторы**, представляющие собой кусок проволоки с высоким удельным сопротивлением, намотанный на какой-либо каркас. Могут иметь значительную паразитную индуктивность. Высокоомные малогабаритные проволочные резисторы иногда изготавливают из микропровода;

- **пленочные металлические резисторы** представляют собой тонкую пленку металла с высоким удельным сопротивлением, напыленную на керамический сердечник, на концы которого надеты металлические колпачки с проволочными выводами. Иногда для повышения сопротивления в пленке прорезается винтовая канавка. Наиболее распространенный тип резисторов;

- **металлофольговые резисторы**. В качестве резистивного материала используется тонкая металлическая лента;

- **угольные резисторы** основываются на высоком удельном сопротивлении графита (пленочные и объемные резисторы);

- **интегральные резисторы**. Основываются на сопротивлении слаболегированного полупроводника. Представляют собой в гибридных ИМС стержень из стекловолокна с нанесенным на поверхность тонким слоем токопроводящей композиции. В полупроводниковых ИМС – тонкая (толщиной 2..3 мкм) локальная область полупроводника, изолированная от подложки и защищенная слоем окиси кремния. Могут иметь нелинейность вольт-амперной характеристики. Применяются в составе интегральных микросхем, где применить другие типы резисторов невозможно или нетехнологично.

В промышленности выпускаются резисторы постоянного и переменного номинала. Их вид представлен на рисунке 6.1. Причем на рисунках 6.1,а-в приведены конструкции постоянных проволочных резисторов, различаю-

щиеся номиналом и способом установки, а на рисунках 6.1,з-ж - переменные резисторы. На рисунке 6.1,з показана конструкция переменного непроволочного резистора круглой формы, выпускаемого Россией, общий вид которого приведен на рисунке 6.1,ж. Резистор состоит из подвижной и неподвижной частей. Неподвижная часть представляет собой пластмассовый круглый кор-



Рисунок 6.1 – Постоянные и переменные резисторы, выпускаемые промышленностью

пус 2, в котором смонтирован токопроводящий элемент 3, имеющий подковообразную форму. Посредством заклепок 6 он крепится к круглому корпусу. Эти заклепки соединены с внешними выводами 4. Подвижная часть представляет собой вращающуюся оси, с торцом которой 7 посредством чеканки

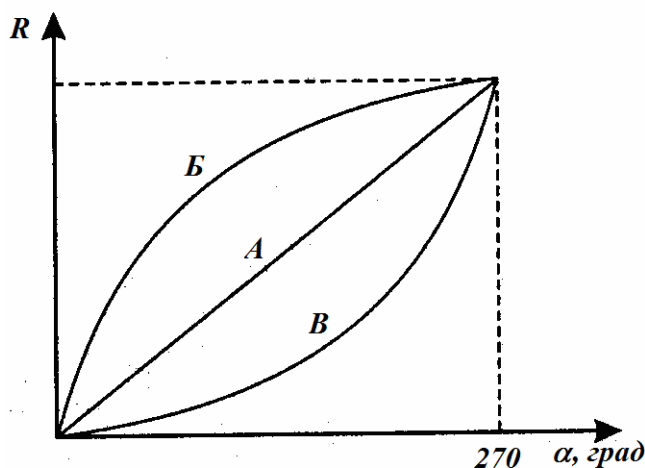


Рисунок 6.2 – Изменение сопротивления в зависимости от угла поворота для различных типов переменных резисторов

соединена изоляционная планка 8, на которой смонтирован подвижный контакт 1 (токосъемник), соединенный с внешним проводом. Угол поворота составляет 270° и ограничивается стопором 3.

Существуют и другие конструкции непроволочных переменных резисторов, показанных на рисунке 6.1,г-е. Токопроводящий элемент в них представляет собой тонкую графитовую, металлическую, металлооксидную или композиционную пленку.

Переменные резисторы могут иметь и разный закон изменения сопротивления в зависимости от угла поворота оси, как показано на рисунке 6.2. У линейных резисторов (типа *A*) сопротивление зависит от угла поворота линейно, у логарифмических резисторов (тип *B*) – по логарифмическому закону, а у резисторов типа *B* – по обратнологарифмическому закону.

6.3 Параметры и свойства резисторов.

Параметры резисторов характеризуют эксплуатационные возможности применения конкретного типа резистора в конкретной электрической схеме.

Номинальное сопротивление $R_{ном}$ и его **допустимое отклонение от номинала $\pm \Delta R$** являются основными параметрами резисторов.

Величина объемного сопротивления проволочного резистора рассчитывается с использованием соотношения:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \quad (6.1)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление материала; ℓ - длина резистивного слоя; S - площадь поперечного сечения резистивного слоя.

Для расчета сопротивления тонких пленок пользуются понятием удельного поверхностного сопротивления ρ_s , под которым понимают сопротивление тонкой пленки, имеющей в плане форму квадрата. Данная величина определяется соотношением

$$R = \rho_s \frac{\ell}{w} = \frac{\rho}{\delta} \frac{\ell}{w}. \quad (6.2)$$

Здесь δ - толщина пленки; w – ширина пленки.

Относительная частотная погрешность резистора определяется соотношением:

$$\alpha_R = \frac{Z - R}{R} 100\%, \quad (6.3)$$

где Z – комплексное сопротивление резистора на частоте ω .

Частотные свойства непроволочных резисторов значительно лучше, чем проволочных.

Резисторы, выпускаемые промышленностью характеризуются также определённым значением **максимальной рассеиваемой мощности $P_{ном}$** . Данный параметр определяет допустимую электрическую нагрузку, которую способен выдержать резистор в течение длительного времени при заданной стабильности сопротивления.

Выпускаются резисторы мощностью 0,125Вт 0,25Вт 0,5Вт 1Вт 2Вт 5Вт (Согласно ГОСТ 24013-80 и ГОСТ 10318-80 советской радиотехнической промышленностью выпускались резисторы следующих номиналов мощно-

стей, в Ваттах, Вт.: 0.01, 0.025, 0.05, 0.062, 0.125, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 500).

Предельное рабочее напряжение $U_{пред}$ определяет величину допустимого напряжения, которое может быть приложено к резистору. Для резисторов с небольшой величиной сопротивления (сотни Ом) эта величина определяется мощностью резистора и рассчитывается по формуле:

$$U_{пред} = \sqrt{P_{ном} R_{ном}} . \quad (6.4)$$

Для остальных резисторов предельное рабочее напряжение определяется конструкцией резистора и ограничивается возможностью электрического пробоя. Напряжение пробоя зависит от длины резистора и давления воздуха P (мм рт.ст.). При длине ℓ (см) резистора менее 5 оно определяется по формуле

$$U_{проб} = 300\sqrt{P\ell} . \quad (6.5)$$

Значение $U_{пред}$ всегда указывается в ТУ, оно всегда меньше $U_{проб}$.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) характеризует относительное изменение сопротивления при изменении температуры:

$$\alpha_R = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta T} . \quad (6.6)$$

Данный коэффициент может быть как положительным, так и отрицательным. Если резистивная пленка толстая, то она ведет себя как объемное тело, сопротивление которого с ростом температуры возрастает. Если же резистивная пленка тонкая, то она состоит из отдельных «островков», сопротивление такой пленки с ростом температуры уменьшается, т.к. улучшается контакт между отдельными «островками». Данная величина может изменяться в пределах $\pm (7...12) \cdot 10^{-4}$.

Коэффициент старения β_R характеризует изменение сопротивления, которое вызывается структурными изменениями резистивного элемента за счет процессов окисления, кристаллизации и т.д.

В ТУ обычно указывают относительное изменение сопротивления в % за определенное время (1000 и 10000 час).

Коэффициент напряжения K_n характеризует влияние приложенного напряжения на сопротивление. В некоторых типах резисторов при высоких напряжениях изменяется сопротивление. В непроволочных резисторах это обусловлено уменьшением контактного сопротивления между отдельными зернами резистивной пленки. В проволочных резисторах это обусловлено дополнительным разогревом проволоки при повышенных напряжениях:

$$K_n = \frac{R_{100} - R_{10}}{R_{100}}, \quad (6.7)$$

где R_{100} - сопротивление резистора при напряжении $U_{пред}$; R_{10} - сопротивление резистора при напряжении $0,1U_{пред}$.

ЭДС шумов резистора описывает наличие тепловых шумов, обусловленных хаотическим тепловым движением электронов в резистивном элементе. Величина ЭДС тепловых шумов определяется соотношением:

$$E_T = \sqrt{4k_B T R \Delta f}, \quad (6.8)$$

где $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура (К); R – сопротивление (Ом); Δf - полоса частот, в которой определяются шумы. В частном случае комнатной температуры

$$E_T = 0,125 \sqrt{R \Delta f}. \quad (6.9)$$

Если резистор включен на входе высокочувствительного усилителя, то на его выходе будут слышны характерные шумы. Снизить уровень данных шумов можно, лишь уменьшив сопротивление R или температуру T .

Токовый шум обусловлен дискретной структурой резистивного элемента. При прохождении тока возникают местные перегревы, в результате которых изменяется сопротивление контактов между отдельными частицами токопроводящего слоя и, следовательно, изменяется значение сопротивле-

ния, что ведет к появлению между выводами резистора ЭДС токовых шумов E_i . В первом приближении можно считать, что

$$E_i = K_i U. \quad (6.10)$$

В данном выражении U - приложенное напряжение; K_i - коэффициент, зависящий от конструкции резистора, свойств резистивного слоя и полосы частот. Величина K_i указывается в ТУ и лежит в пределах от 0,2 до 20 мкВ/В. Чем однороднее структура, тем меньше токовый шум. Так, у металлопленочных и углеродистых резисторов $K_i \leq 1,5$ мкВ/В, у композиционных поверхностных резисторов $K_i \leq 40$ мкВ/В, у композиционных объемных резисторов $K_i \leq 45$ мкВ/В. У проволочных резисторов токовый шум отсутствует.

Токовый шум измеряется в полосе частот от 60 до 6000 Гц. Его величина значительно превышает величину теплового шума.

6.4. Система обозначений и маркировка резисторов.

В настоящее время на рынках сбыта имеются резисторы, выпущенные в разное время. Способы маркировки изменялись несколько раз. В связи с этим рассмотрим несколько способов их обозначения.

Так, до 1968 года обозначение резисторов состояло из букв, отражающих конструктивно-технологические особенности данного типа резистора, на пример, МЛТ – металлопленочных лакированных теплостойкий.

С 1968 года в соответствии с ГОСТ 13453-68 постоянные резисторы стали обозначаться буквой С, а переменные – буквами СП. После букв стоит цифра, указывающая номер группы, на которые резисторы были разделены по конструкции токонесущей части, как показано в Таблице 6.1. Через дефис далее указывался номер конкретной конструкции.

С 1980 года стала применяться другая система обозначений, также состоящая из трех элементов:

- первый элемент – буквенный: Р – постоянный резистор, РП – переменный резистор, РН – набор резисторов;

- второй элемент – цифра: - 1 – непроволочный резистор, 2 – проволочный резистор;

- третий элемент – цифра, обозначающая разновидность конструкции.

Т а б л и ц а 6.1 – Классификации резисторов по конструкции токонесущей части в соответствии с ГОСТ 13453-68

Номер группы	Выполнение токонесущей части
1	Непроволочные углеродистые или бороуглеродистые
2	Непроволочные металлопленочные или металлооксидные
3	Непроволочные тонкопленочные композиционные
4	Непроволочные объемные композиционные
5	Проволочные
6	Резисторы для сверхвысоких частот

Выпускаемые промышленностью резисторы одного и того же номинала имеют разброс сопротивлений. Значение возможного разброса определяется точностью резистора. Выпускают резисторы с точностью 20 %, 10 %, 5 %, и т. д. вплоть до 0,01 %. Номиналы резисторов не произвольны: их значения выбираются из специальных номинальных рядов, наиболее часто из номинальных рядов E6 (20%), E12 (10%) или E24 (для резисторов с точностью до 5 %), для более точных резисторов используются более точные ряды (например, E48).

При указании номинала на резисторах мощностью 0,125Вт вместо десятичной точки пишут букву, соответствующую единицам измерения (К — для килоомов, М — для мегаомов, Е или R для единиц Ом). Например, 4K7 обозначает резистор, сопротивлением 4,7 кОм, 1R0 — 1 Ом, 120K — 120 кОм и т. д.

Для особо мелких резисторов применяют маркировку цветными полосками, как показано на рисунке 6.3. Для резисторов с точностью 20 % используют маркировку с тремя полосками, для резисторов с точностью 10 % и 5 % маркировку с четырьмя полосками, для более точных резисторов с пятью или шестью полосками. *Первые две* полоски всегда означают первые два знака номинала. Если полосок 3 или 4, *третья* полоска означает десятичный

множитель, то есть степень десятки, которая умножается на двузначное число, указанное первыми двумя полосками. Если полосок 4, последняя указывает точность резистора. Если полосок 5, третья означает третий знак сопротивления, четвёртая — десятичный множитель, пятая — точность. Шестая полоска, если она есть, указывает

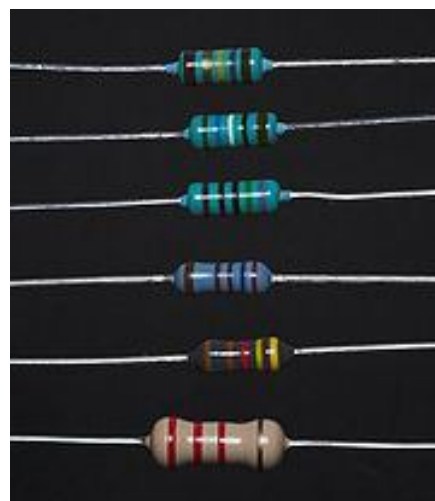


Рисунок 6.3 – Маркировка номиналов резисторов с помощью цветовой схемы

температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Если эта полоска в 1,5 раза шире остальных, то она указывает надёжность резистора (% отказов на 1000 часов работы). Следует отметить, что иногда встречаются резисторы с 5-ю полосами, но стандартной (5 или 10 %) точностью. В этом случае первые две полосы задают первые знаки номинала, третья — множитель, четвёртая — точность, а пятая — температурный коэффициент. Одной чёрной полоской по центру обозначаются перемычки нулевого сопротивления


Направление чтения полосок. Для четырёхполосной маркировки обычных резисторов с точностью 5 и 10 % вопрос решается просто: золотая или серебряная полоска всегда стоит в конце. Для трёхполосочного кода первая полоска стоит ближе к краю резистора, чем последняя. Для других вариантов важно, чтобы получалось значение сопротивления из номинального ряда, если не получается, нужно читать наоборот. Для резисторов МЛТ-0,125 производства СССР с 4-мя полосками, первой является полоска, нанесённая ближе к краю; обычно она находится на металлическом стаканчике вывода, а остальные три — на более узком керамическом теле резистора.

Цветовая кодировка резисторов приведена в Таблице 6.2. *Пример.* Допустим на резисторе видим 4 полоски: коричневую, черную, красную и золо-

тую. Первые две полоски дают 10, третья 100, четвёртая даёт точность 5 %, итого резистор сопротивлением $10 \cdot 100 \text{ Ом} = 1 \text{ кОм}$, с точностью $\pm 5 \%$.

Т а б л и ц а 6.2 – Цветовая кодировка резисторов

Цвет	как число	как десятичный множитель	как точ- ность в %	как ТКС ppm/°C	как % отка- зов
серебристый	-	$10^{-2} = 0,01$	10	-	-
золотой		$10^{-1} = 0,1$	5	-	-
черный	0	$10^{-0} = 1$	-	-	-
коричневый	1	$10^1 = 10$	1	100	1
красный	2	$10^2 = 100$	2	50	0.1
оранжевый	3	$10^3 = 1000$	-	15	0.01
желтый	4	$10^4 = 10000$	-	25	0.001
зеленый	5	$10^5 = 100000$	0.5	-	-
синий	6	$10^6 = 1000000$	0.25	10	-
фиолетовый	7	$10^7 = 10000000$	0.1	5	-
серый	8	$10^8 = 100000000$	-	-	-
белый	9	$10^9 = 1000000000$	-	1	-
отсутствует	-	-	20	-	-

Условно-графические обозначения резисторов в России и США различаются, что надо иметь в виду при использовании графических пакетов, например, *Visio*. Так, если в США резистор обозначается , то в России условные графические обозначения (УГО) резисторов на схемах должны соответствовать ГОСТ 2.728-74, как показано в Таблице 6.3.

Т а б л и ц а 6.3 – Обозначение резисторов в соответствии с ГОСТ 2.728-74

Обозначение в России	Описание
	Постоянный резистор без указания номинальной мощности рассеивания
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0,05 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0,125 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0,25 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0,5 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 1 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 2 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 5 Вт
	Подстроечный резистор
	Подстроечный резистор, у которого использованы только два вывода
	Подстроечный резистор в реостатном включении