

2.2. Резисторы в радиосистемах и устройствах.

Маркировка и номиналы резисторов

Резистором называют элемент электронной аппаратуры, обладающий свойством электрического сопротивления, то есть принцип действия резисторов основан на использовании свойства материалов оказывать сопротивление протекающему через них электрическому току. В идеале резистор можно охарактеризовать только сопротивлением электрическому току, то есть для него в любой момент времени выполняется закон Ома (рис. 6.1): мгновенное значение напряжения на резисторе пропорционально току, проходящему через него.

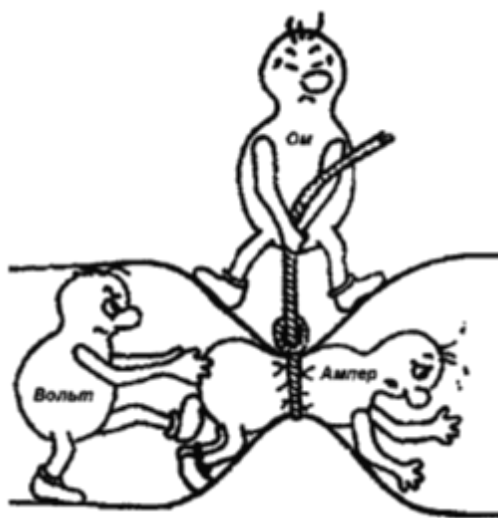


Рисунок 2.2.1 – Закон Ома

Резисторы предназначены для перераспределения и регулирования электрической энергии между элементами схемы.

Рассмотрим два основных вида применения резисторов:

а) Ограничение по току (рис. 2.2.2).

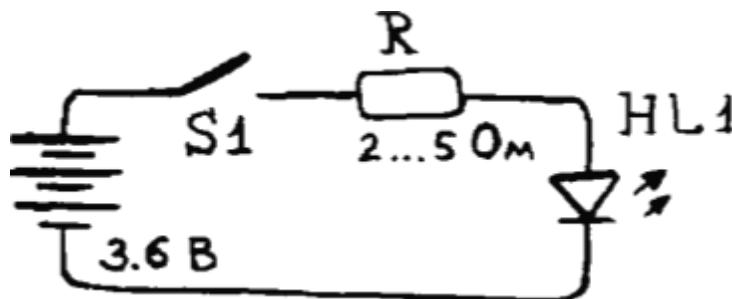


Рисунок 2.2.2 – Ограничение тока на примере лазерной указки

Лазерный диод питается примерно от 3 V и потребляет 200 мА. Лазерный диод без ограничительного резистора быстро перегорит и от батарейки от лазер-

ной указки (так как это нелинейный элемент), поэтому питать его надо не напряжением, а током, то есть нам нужны токоограничивающие элементы, в роли которых и выступает резистор. Аналогичное рассуждение можно привести и с газоразрядными лампами, где ограничивается ток, или, например, с зарядкой для мобильного телефона.

б) Деление напряжения (рис. 2.2.3).

Это устройство, в котором входное и выходное напряжение связаны коэффициентом передачи от 0 до 1. В качестве делителя напряжения обычно применяют переменные резисторы (потенциометры). Можно представить их как два участка цепи, называемые плечами, сумма напряжений на которых равна входному напряжению. Плечо между нулевым потенциалом и средней точкой называют нижним, а другое – верхним.

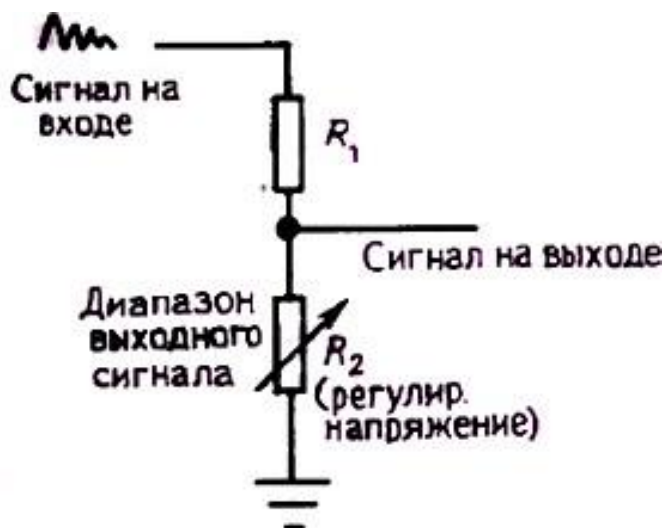


Рисунок 2.2.3 – Делитель напряжения

Простейший резистивный делитель напряжения представляет собой два последовательно включённых резистора R_1 и R_2 , подключённых к источнику напряжения U . Поскольку резисторы соединены последовательно, то ток через них будет постоянен. Падение напряжения на каждом резисторе согласно закону Ома будет пропорционально сопротивлению, тогда отношение напряжений U_1 и U_2 в точности равно отношению сопротивлений R_1 и R_2 .

Следует обратить внимание, что сопротивление нагрузки делителя напряжения должно быть много больше собственного сопротивления делителя, так, чтобы в расчетах этим сопротивлением можно было бы пренебречь.

В зависимости от применяемых материалов по виду параметров резисторы могут быть **линейными** (зависимость падения напряжения от тока представляет

собой линейную функцию, что говорит о постоянстве сопротивления) и **нелинейными** (рис. 6.4), у которых сопротивление изменяется под действием внешних факторов: протекающего тока или приложенного напряжения (варисторы), температуры (терморезисторы), освещения (фоторезисторы) и т. д.

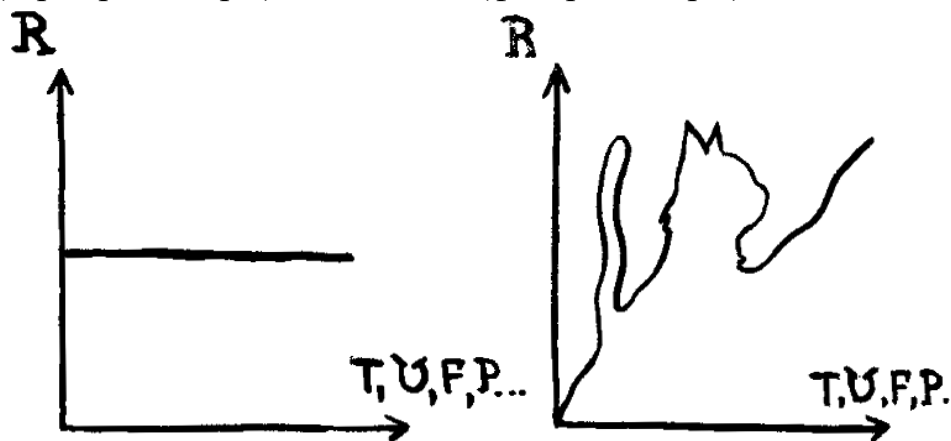


Рисунок 2.2.4 – Линейные и нелинейные резисторы

Линейные резисторы подразделяются на постоянные и переменные (рис. 2.2.5). Постоянные резисторы имеют фиксированную величину сопротивления, а у переменных резисторов предусмотрена возможность регулирования сопротивления механически (с помощью третьего подвижного контакта) или бесконтактным способом с помощью цифрового управления изменением сопротивления в процессе эксплуатации.

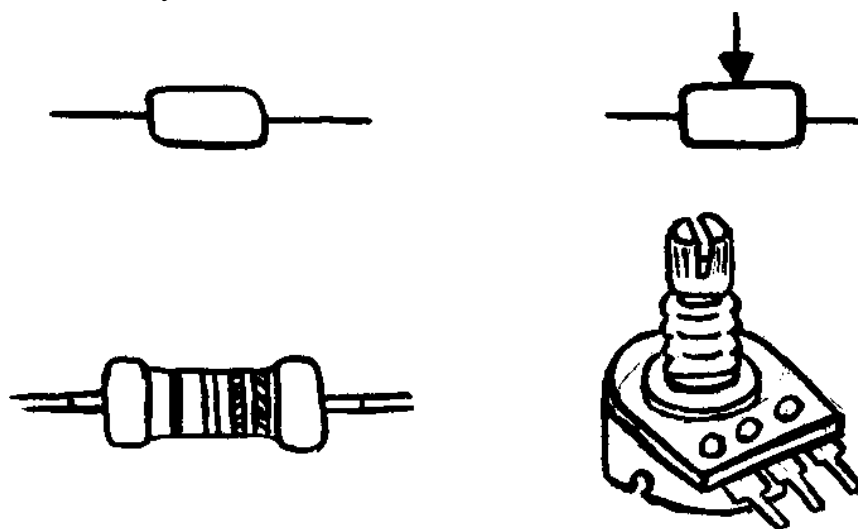


Рисунок 2.2.5 – Постоянные и переменные резисторы

По назначению дискретные резисторы делятся на:

- резисторы общего назначения;
- прецизионные;
- высокочастотные;

- высоковольтные;
- высокоомные.

По виду токопроводящего элемента резисторы делятся на:

- проволочные;
- пленочные металлические;
- пленочные металлоокисные;
- пленочные металлодиэлектрические;
- композиционные.

По эксплуатационным характеристикам дискретные резисторы делятся на:

- термостойкие;
- влагостойкие;
- вибро- и ударопрочные;
- высоконадежные;
- прецизионные и т. д.

Естественно, если мы говорим о резисторе, то его основная характеристика – это его номинальное сопротивление, которое указано в паспорте, а если резистор достаточно велик по размерам, то и на корпусе резистора. Значение номинального сопротивления гарантируется с заданным допуском во всем рабочем диапазоне температур (обычно от -55 до $+70$ °C).

Номиналы промышленно выпускаемых сопротивлений имеют отнюдь не произвольные значения, а берутся из специальных номинальных рядов (рис. 6.6). Номиналы сопротивлений стандартизованы в соответствии с ГОСТ 10318-74, а допустимые отклонения – в соответствии с ГОСТ 9664-74. Для резисторов общего назначения ГОСТ предусматривает шесть рядов номинальных сопротивлений: E6, E12, E24, E48, E96 и E192.

Точнее, номиналы деталей могут быть произвольным числом из соответствующего ряда, умноженным на произвольный десятичный множитель (десять в произвольной степени), например, резистор из ряда E12 может иметь сопротивление 1,2 Ом, 12 Ом, 120 Ом, ..., 1,2 МОм, 12 МОм, 1,5 Ом, 15 Ом и т. д.

Название ряда указывает общее число элементов в нём, т. е. ряд E24 содержит 24 числа в интервале от 1 до 10, E12 – 12 чисел и т. д.

Видно, что ряд E12 получается вычёркиванием из ряда E24 каждого второго номинала, аналогично, E6 получается вычёркиванием из E12 каждого второго номинала. Каждый ряд соответствует определённому допуску в номиналах деталей,

и здесь необходимо ввести понятие допустимого отклонения сопротивления резистора.

Номинальные ряды E6, E12, E24

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

Рисунок 2.2.6 – Номинальные ряды

Это те пределы отклонения сопротивления резистора от его номинального значения (в процентах), за которые не должен выходить дрейф сопротивления в заявленных условиях эксплуатации и в течение гарантированного срока службы. Значению допуска всегда предшествует знак \pm , так как реальное значение сопротивления может оказаться выше или ниже номинального.

Так, резисторы из ряда E6 имеют допустимое отклонение от номинала $\pm 20\%$, из ряда E12 – $\pm 10\%$, из ряда E24 – $\pm 5\%$ и так далее (табл. 1.1). Собственно, ряды устроены таким образом, что следующее значение отличается от предыдущего чуть меньше, чем на двойной допуск. Указание на схемах номиналов элементов, не принадлежащих никакому ряду без особого технического обоснования, считается неграмотностью. Для более точных резисторов чаще используют международный норматив CEI62.

Таблица 2.2.1 – Коды допусков

Допуск, %	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,25$	$\pm 0,5$	± 1	± 2	± 5	± 10
Кодированное обозначение	A	B	C	D	F	G	J	K

Видно, что маркировка K соответствует ряду E12, маркировка J – ряду E24 и так далее.

Чтобы понять, какой резистор вы держите в руках, необходимо его надписать (рис.2.2.7). Все мощные, прецизионные и большинство резисторов отечественного производства имеют маркировку, из которой напрямую читаются тип, номинальные мощность и сопротивление, а также допустимое отклонение. Например, проволочный постоянный резистор типа С5-5 мощностью 8 Вт, имеющий сопротивление 68 Ом и допускаемое отклонение от номинального сопротивления $\pm 1\%$, имеет на своем корпусе следующую надпись: С5-5 – 8 – 68 Ом $\pm 1\%$.

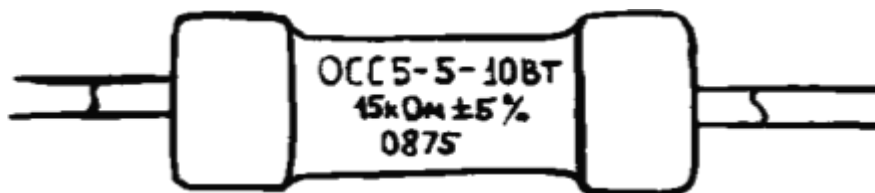


Рисунок 2.2.7 – Маркировка «напрямую» – указаны все параметры

Как следует из приведенного полного обозначения, размерность номинальной мощности в нем не указана, так как мощность принято всегда выражать в ваттах. Это также относится к маломощным резисторам, например: МЛТ – 0,25 – 10 кОм $\pm 10\%$ (резистор типа МЛТ мощностью 0,25 Вт).

Номинальное сопротивление в приведенном полном обозначении состоит из численного значения (цифра) и обозначения единицы измерения (Ом – омы, кОм – килоомы, МОм – мегаомы, ГОм – гигаомы, ТОм – тераомы). Например: 220 Ом; 150 кОм; 2,2 МОм; 8,2 ГОм; 1 ТОм.

Резисторы, в особенности малой мощности, – чрезвычайно мелкие детали, типичный резистор мощностью 0,125 Вт имеет длину несколько миллиметров и диаметр порядка миллиметра. Прочитать на такой детали номинал с десятичной запятой невозможно. Поэтому часто при указании номинала вместо десятичной точки пишут букву, соответствующую единицам измерения (рис.2.2.8).

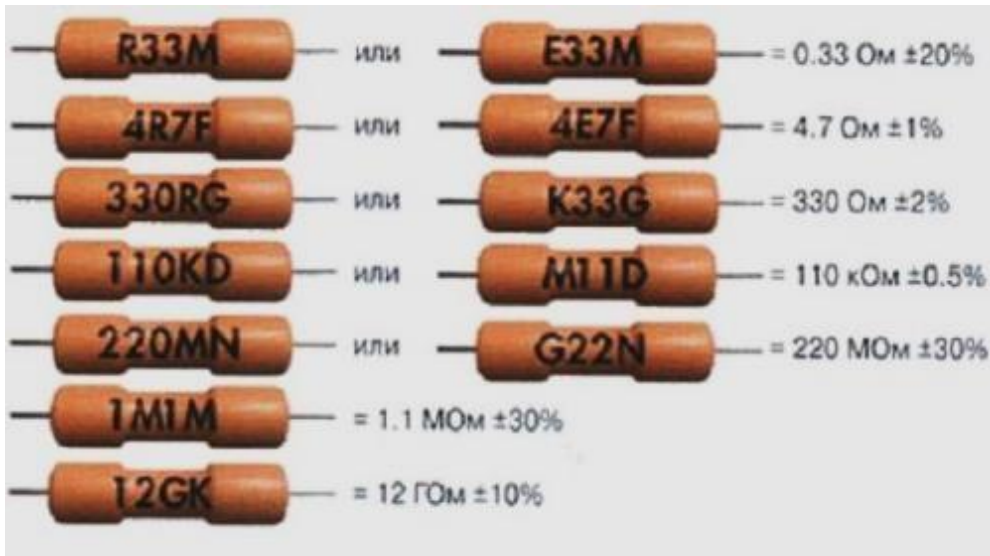


Рисунок 2.2.8 – Буквенно-цифровая маркировка

Латинские буквы *R, K, M, G, T* обозначают, соответственно, множители $1, 10^3, 10^6, 10^9, 10^{12}$ (изредка в русской транскрипции для обозначения единиц Ом вместо *R* ставят *E*, а гигаомам соответствует буква *Г*). Результат расшифровки записанного таким образом значения всегда представляется в омах. Например: $0,1 \text{ Ом} = R10$ или $E10$; $1 \text{ Ом} = 1R0$ или $1E$; $5,6 \text{ Ом} = 5R6$ или $5E6$; $330 \text{ Ом} = 330R$ или $330E$; $1 \text{ кОм} = 1K0$; $3,3 \text{ кОм} = 3K3$; $2,2 \text{ МОм} = 2M2$; $6,8 \text{ ГОм} = 6G8$ или $6Г8$.

Еще одной формой записи номинального значения сопротивления некоторых зарубежных резисторов является запись трехзначным числовым кодом (рис. 6.9).

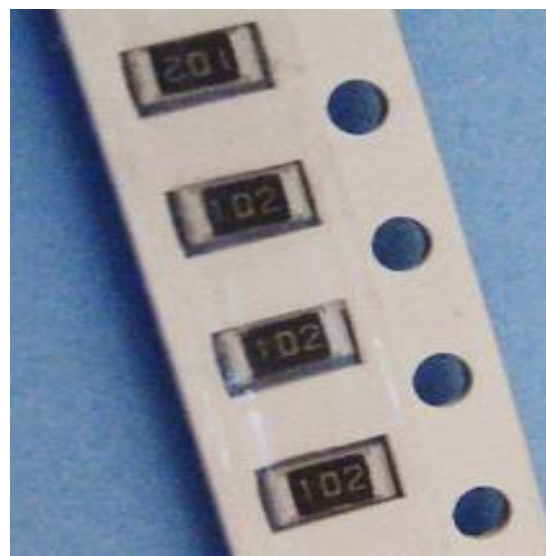


Рисунок 2.2.9 – Цифровая маркировка

В этом коде первые две цифры задают значащую часть номинала сопротивления, а третья выражает степень множителя 10, на который умножается значащая часть, чтобы получить окончательный результат в омах. Например: 332 соответствует $33 \cdot 10^2$ Ом или 3,3 кОм; 950 соответствует $95 \cdot 10^0$ или 95 Ом и т. д.

Однако и в таком виде читать номиналы трудно. Поэтому для особо мелких резисторов применяют маркировку цветными полосками – цветовое кодирование.

На резистор в этом случае наносят цветные кольца, образующие код, которым шифруют номинальное значение и допуск (кодировка 4 или 5 кольцами). Менее распространенная кодировка 6 кольцами кодирует еще и значение температурного коэффициента сопротивления (рис. 2.2.10).

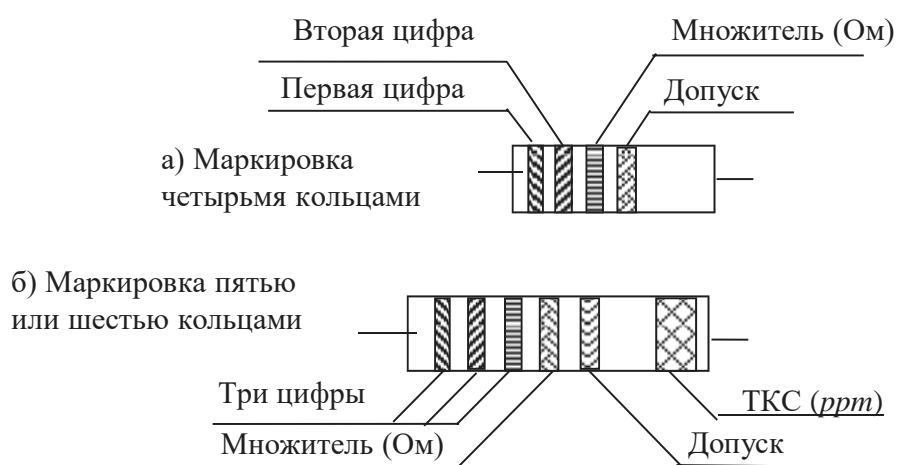


Рисунок 2.2.10 – Цветовая маркировка

Сведения о соответствии цветов значащим цифрам номинального сопротивления, значениям множителей, допусков и ТКС приведены ниже на рис. 2.2.11.

Цвет кольца	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель	Допустимое отклонение
серебристый	---	---	---	10^{-2}	10
золотистый	---	---	---	10^{-1}	5
черный	---	0	---	1	---
коричневый	1	1	1	10	1
красный	2	2	2	10^2	2
оранжевый	3	3	3	10^3	---
жёлтый	4	4	4	10^4	---
зелёный	5	5	5	10^5	0,5
голубой	6	6	6	10^6	0,2
фиолетовый	7	7	7	10^7	0,1
серый	8	8	8	10^8	0,05
белый	9	9	9	10^9	---

Рисунок 2.2.11 – Значения колец маркировки

Мощность резисторов

Как было сказано в самом начале, резистор – это не идеальный квадратик из основ электричества в школьном курсе физики. К сожалению или к счастью, нам необходимо учитывать вторую после его номинального сопротивления важнейшую характеристику – рассеиваемую мощность.

С одной стороны, тепло, которое рассеивается в резисторе, – это потери, которых хотелось бы избежать. С другой стороны – если рассматривать резистор, как нагревательный элемент – то это как раз та его характеристика, которую мы хотим использовать, например, в фене для сушки волос.

Итак, номинальная рассеиваемая мощность – это та мощность, которую может рассеять резистор в спокойной воздушной среде при нормальном атмосферном давлении при непрерывной электрической нагрузке без превышения объявленного допуска на значение сопротивления. Мощность P , которую рассеивает резистор в конкретной электрической цепи, определяется произведением проходящего тока I и падения напряжения U :

$$P = U \cdot I. \quad (2.2.1)$$

Выражая с помощью закона Ома напряжение или ток через сопротивление R , имеем известные формулы для расчета мощности, выделяемой резистором в виде тепла:

$$P = I^2 \cdot R \text{ или } P = U^2 / R. \quad (2.2.2)$$

Номинальная мощность рассеивания $P_{\text{ном}}$ определяет допустимую электрическую нагрузку, которую способен выдержать резистор в течение длительного времени при заданной стабильности сопротивления.

Мощность, рассеиваемая резистором, естественно, никуда не исчезает, а переходит в виде тепла в окружающую среду. Вот тут нас подстерегает тот факт, что чем выше температура – тем меньше отводится тепла. Естественно, если окружающая среда горячее, то никакого тепла отводиться не будет вообще.

Отводимая мощность пропорциональна разности температур резистора T_R и окружающей среды T_O

$$P_{\text{отв}} = \frac{T_R - T_O}{R_T} \quad (2.2.3)$$

и зависит от условий охлаждения резистора, определяемых величиной теплового сопротивления R_T , которое тем меньше, чем больше поверхность резистора и теплопроводность материала резистора. Наглядно зависимость отводимой мощности от температуры можно проиллюстрировать с помощью рис. 2.2.12:

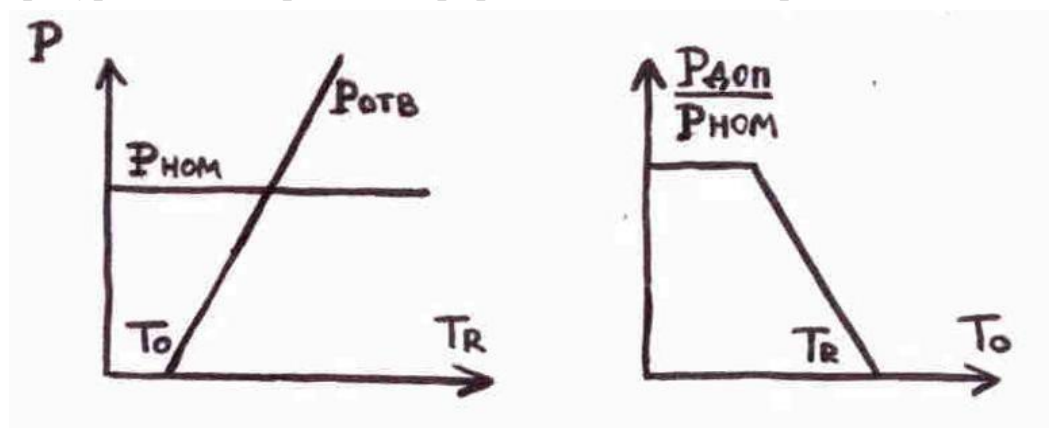


Рисунок 2.2.12 – Связь мощности и температуры

Из условия баланса мощностей можно определить температуру резистора, что наглядно показано на рисунке.

$$T_R = UIR_T + T_0. \quad (2.2.4)$$

Следовательно, при увеличении мощности, выделяемой в резисторе, возрастает его температура T_R , что может привести к выходу резистора из строя. Для того чтобы этого не произошло, необходимо уменьшить R_T , что достигается увеличением размеров резистора. Для каждого типа резистора существует определенная максимальная температура T_{max} , превышать которую нельзя.

Температура T_R , как следует из вышеизложенного, зависит также от температуры окружающей среды. Если она очень высока, то температура T_R может превысить максимальную; чтобы этого не произошло, необходимо уменьшать мощность, выделяемую в резисторе.

Кроме номинального сопротивления и рассеиваемой мощности есть и иные характеристики резистора, существенные для его эксплуатации.

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 конструкцией резистора и рассчитывается по формуле:

$$U_{пред} = \sqrt{P_{ном} * R_{ном}}. \quad (2.2.5)$$

Для остальных резисторов предельное рабочее напряжение определяется конструкцией резистора и ограничивается возможностью электрического пробоя,

который, как правило, происходит по поверхности между выводами резистора или между витками спиральной нарезки. Напряжение пробоя зависит от длины резистора и давления воздуха. При длине резистора менее 5 см оно определяется как:

$$U_{\text{проб}} = 300\sqrt{P * l}, \quad (2.2.6)$$

где P – давление в мм рт. ст.; l – длина резистора в см.

Величина $U_{\text{пред}}$ указывается в ТУ, она всегда меньше $U_{\text{проб}}$. При испытании резисторов на них подают испытательное напряжение $U_{\text{исп}}$, которое больше $U_{\text{пред}}$ и меньше $U_{\text{проб}}$.

Шумы резистора определяются тем, что электроны в резистивном элементе находятся в состоянии хаотического теплового движения, в результате которого между любыми точками резистивного элемента возникает случайно изменяющееся электрическое напряжение, и между выводами резистора появляется ЭДС тепловых шумов. Тепловой шум характеризуется непрерывным, широким, практически равномерным спектром. Величина ЭДС тепловых шумов определяется соотношением:

$$E_T = \sqrt{4KTR\Delta f}, \quad (2.2.7)$$

где $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура по шкале Кельвина; R – сопротивление, Ом; Δf – полоса частот, в которой измеряются шумы. При комнатной температуре ($T = 300$ К)

$$E_T = \frac{1}{8} \sqrt{R \cdot \Delta f}. \quad (2.2.8)$$

Если резистор включен на входе высокочувствительного усилителя, то на его выходе будет слышен характерный шум. Уменьшить уровень этих шумов можно лишь уменьшая величину сопротивления R или температуру T .

Помимо тепловых шумов, существует **токовый шум**, возникающий при протекании через резистор тока. Этот шум обусловлен дискретной структурой резистивного элемента. При протекании тока возникают местные перегревы, в результате которых изменяются контакты между отдельными частицами токопроводящего слоя, и, следовательно, флуктуирует (изменяется) величина сопротивления, что ведет к появлению между выводами резистора ЭДС токовых шумов E_i . Токовый шум так же, как и тепловой, имеет непрерывный спектр, но интенсивность его увеличивается в области низких частот.

Поскольку величина тока, протекающего через резистор, зависит от величины приложенного напряжения U , то в первом приближении можно считать, что

$$E_i = K_i \cdot U, \quad (2.2.9)$$

где 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. У металлопленочных и углеродистых резисторов величина $K_i = 1,5$ мкВ/В, у композиционных поверхностных $K_i = 40$ мкВ/В, у композиционных объемных $K_i = 45$ мкВ/В.

У проволочных резисторов токовый шум отсутствует. Токовый шум измеряется в полосе частот от 60 до 6000 Гц, и его величина значительно превышает величину теплового шума.

Наряду с рассмотренными параметрами, для резисторов также нормируется **коэффициент напряжения** K_n , характеризующий влияние величины приложенного напряжения на сопротивление. В некоторых типах резисторов при высоких напряжениях изменяется величина сопротивления. В непроволочных резисторах это обусловлено уменьшением контактного сопротивления между отдельными зернами резистивной пленки, а в проволочных – обусловлено дополнительным разогревом проволоки при повышенных напряжениях.

$$K_n = \frac{R_{100} - R_{10}}{R_{100}}, \quad (2.2.10)$$

где R_{100} – сопротивление резистора при напряжении $U_{\text{пред}}$; R_{10} – сопротивление резистора при напряжении $0,1 \cdot U_{\text{пред}}$.

На основе всего вышеперечисленного выбор типа резистора (постоянного или переменного) для конкретной схемы производится с учетом условий работы и определяется параметрами резисторов.

Резистор нельзя рассматривать как элемент, обладающий только активным сопротивлением, определяемым его резистивным элементом. Помимо сопротивления резистивного элемента, он имеет паразитную емкость, индуктивность и сопротивление (рис. 2.2.13).

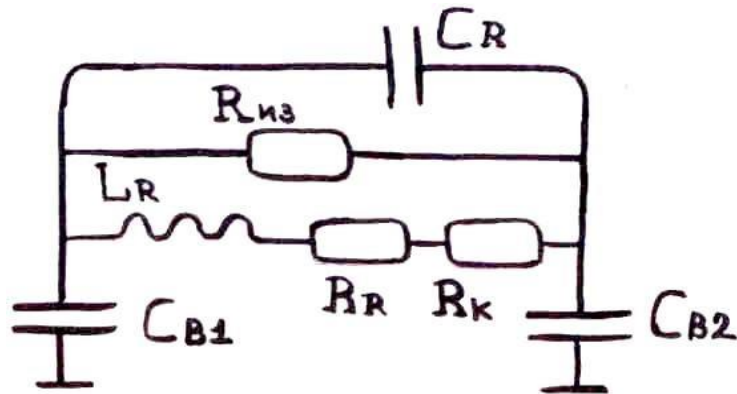


Рисунок 2.2.13 – Эквивалентная схема резистора

На схеме R_R – сопротивление резистивного элемента; $R_{из}$ – сопротивление изоляции, определяемое свойством защитного покрытия и основания; R_K – сопротивление контактов; L_R – эквивалентная индуктивность резистивного слоя и выводов резистора; C_R – эквивалентная емкость резистора; C_{B1} и C_{B2} – емкости выводов.

Активное сопротивление резистора определяется соотношением

$$R = \frac{(R_R - R_K)R_{из}}{R_R + R_K + R_{из}}. \quad (2.2.11)$$

Сопротивление R_K имеет существенное значение только для низкоомных резисторов. Сопротивление $R_{из}$ практически влияет на общее сопротивление только высокоомных резисторов. Реактивные элементы определяют частотные свойства резистора.

Относительная частотная погрешность определяется соотношением

$$\alpha_R = \frac{Z - R}{R} \cdot 100\%, \quad (2.2.12)$$

где Z – комплексное сопротивление резистора на частоте ω .

На практике, как правило, величины L и C неизвестны. Поэтому для некоторых типов резисторов указывается значение обобщенной постоянной времени τ_{max} , которая связана с относительной частной погрешностью сопротивления уравнением:

$$\alpha_R = 50 \cdot \omega^2 \cdot \tau_{max}^2. \quad (2.2.13)$$

Температурный коэффициент сопротивления

Так как под воздействием температуры окружающей среды или из-за нагрева самого резистора удельное сопротивление его резистивного слоя может меняться,

то для обозначения термостабильности резисторов ввели такое понятие, как температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

В зарубежной документации он именуется как **TCR** (*Temperature Coefficient of Resistance*).

ТКС выражают в относительных единицах. Так как температурные изменения сопротивления резисторов очень малы, в справочниках ТКС указывают в единицах миллионных долей относительного изменения сопротивления на градус ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). В настоящее время во многих справочниках вместо 10^{-6} принято обозначение ppm (*Parts Per Million* – «частей на миллион»). Размерность ТКС записывают в этом случае в ppm/ $^{\circ}\text{C}$. Численное значение ТКС резистора (в ppm/ $^{\circ}\text{C}$) может быть определено из результатов измерения температурных зависимостей его сопротивления по формуле:

$$TCR = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{(R_1 - R_2)}{(T_1 - T_2)}, \quad (2.2.14)$$

где TCR – температурный коэффициент сопротивления (ТКС), (ppm/ $^{\circ}\text{C}$); R_1 – сопротивление при комнатной температуре $+25^{\circ}\text{C}$, (Ом); R_2 – сопротивление при рабочей температуре, (Ом); T_1 – комнатная температура ($+25^{\circ}\text{C}$); T_2 – рабочая температура, при которой производится тестовое измерение, ($^{\circ}\text{C}$).

Также стоит иметь в виду, что в документации на отечественные компоненты начальной температурой (T_1) нередко считается $+20^{\circ}\text{C}$, а не $+25^{\circ}\text{C}$, как это принято в иностранной документации.

У постоянных резисторов – то есть тех, у которых сопротивление вообще-то не должно меняться в зависимости от внешних воздействий – он все-таки может быть как положительным, так и отрицательным, что можно объяснить следующим образом. Основным элементом конструкции постоянного резистора является резистивный элемент, который может быть либо пленочным, либо объемным (рис. 2.2.14).

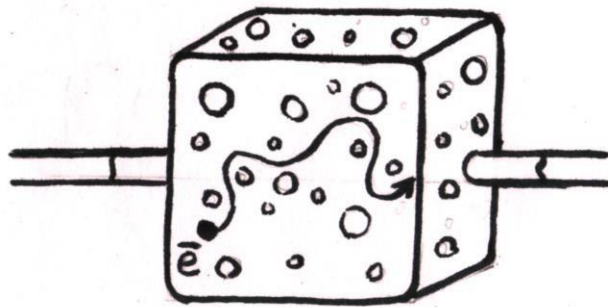


Рисунок 2.2.14 – У объемного резистора ТКС положительный

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» (рис. 2.2.15), сопротивление такой пленки с ростом температуры уменьшается, так как возрастает собственная энергия электронов и вероятность их перемещения между «островками» под действием электрического поля. У различных резисторов эта величина лежит в пределах $\pm(7-12) \cdot 10^{-4}$.



Рисунок 2.2.15 – У пленочного резистора ТКС отрицательный

Рассмотрим пример. Имеется резистор на 56 кОм. Его температурный коэффициент составляет $\pm 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. В каких пределах будет меняться его сопротивление при изменении температуры на $\pm 10^\circ\text{C}$ (диапазон изменения температуры в данном случае составит 20°C)? Как уже говорилось, стартовой температурой отсчёта считается $+25^\circ\text{C}$. Именно при такой температуре наш резистор имеет сопротивление 56 кОм. При изменении температуры на 1 градус сопротивление резистора изменится на 2,8 Ом. Соответственно, при изменении температуры на 10°C сопротивление изменится на 28 Ом. В результате получаем диапазон изменения сопротивления от 55972 Ом (при 15°C) до 56028 Ом (при 35°C). Как видим, наш резистор имеет очень хорошую термостабильность. Его сопротивление меняется незначительно, особенно, если учесть тот факт, что среди резисторов много и таких, у которых ТКС равен $100 \dots 300 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Также величина ТКС может указываться вот в таком формате: $-200 \sim +600 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Это означает, что при понижении температуры резистор ведёт себя более стабильно, и его сопротивление изменяется меньше, чем при её повышении. Величина ТКС не указывается в маркировке резисторов. Узнать его можно из технической документации на конкретную серию резисторов.

Самым большим (и плохим) температурным коэффициентом обладают резисторы с проводящим слоем на основе углерода. Их ТКС может достигать $5000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Резисторы на основе углеродной проводящей плёнки (*carbon film resistors*) имеют ТКС в диапазоне $200...500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (CF-25, CF-100 и им подобные). Именно поэтому допуск (точность) таких резисторов редко меньше 5%. Тонкоплёночные чип-резисторы (ТКС составляет $5...50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) – одни из самых термостабильных резисторов. Малым ТКС обладают тонкоплёночные прецизионные резисторы. Он может составлять всего $\pm 2-5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. В документации на такие резисторы можно встретить обозначение **Low TCR** – низкий ТКС. Постоянные резисторы с низким ТКС очень востребованы в тех приборах, где важна точность. Это измерительная, медицинская, промышленная и военная электроника, аппаратура для космоса, связи и навигации. Кроме этого резисторы с низким TCR применяются в высококачественной аудиоаппаратуре (*High End Stereo*) и прецизионных усилителях.

Постоянные резисторы

Основным элементом конструкции постоянного резистора является резистивный элемент, который может быть либо плёночным, либо объёмным.

Величина объёмного сопротивления материала определяется количеством свободных носителей заряда в материале, температурой, напряженностью поля и т. д. и определяется известным соотношением

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (2.2.15)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала; l – длина резистивного слоя; s – площадь поперечного сечения резистивного слоя.

Самый наглядный тип постоянных резисторов – **проволочный**, представляет собой изоляционный каркас, на который намотана проволока с высоким удельным электрическим сопротивлением (рис. 2.2.16).

В чистых металлах всегда имеется большое количество свободных электронов, поэтому они имеют малую величину R и для изготовления резисторов не применяются. Для изготовления проволочных резисторов применяют сплавы никеля,

хрома и т. д., имеющих высокое удельное сопротивление, хорошую теплостойкость и малый температурный коэффициент сопротивления (например, манганиновую (сплав на основе меди с добавкой марганца (11,5-13,5%) и никеля (2,5-3,5%)), нихромовую (55-78% никеля, 15-23% хрома с добавками марганца, кремния, железа, алюминия) или константановую (сплав на основе меди (Cu) (около 59%) с добавкой никеля (Ni) (39-41%) и марганца (Mn) (1-2%)) проволоку).

Снаружи резистор покрывают термостойкой силикатной эмалью, спрессовывают пластмассой либо герметизируют металлическим корпусом, закрываемым с торцов керамическими шайбами.

Эти резисторы обладают очень высокой допустимой мощностью рассеивания (десятки ватт) при относительно небольших размерах, высокой точностью и хорошей температурной стабильностью. Постоянные проволочные резисторы имеют номиналы 3 Ом – 51 кОм и номинальную мощность до 150 Вт.

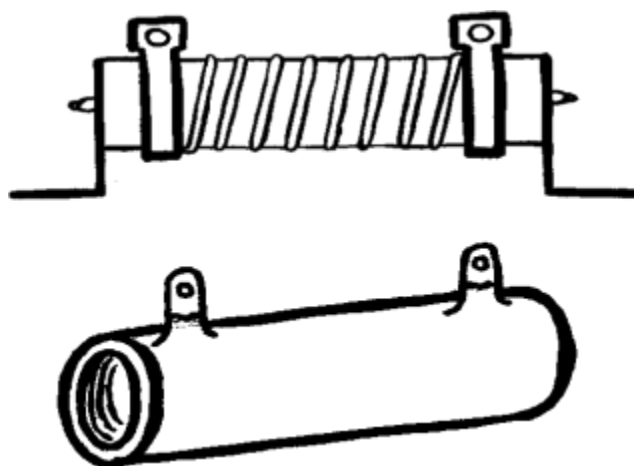


Рисунок 2.2.16 – Проволочный резистор

Различают резисторы с однослойной и многослойной намотками. Так как резисторы изготавливают путем намотки провода на каркас, то они имеют большую индуктивность и собственную емкость. Для уменьшения индуктивности применяют бифилярную намотку, при которой обмотку резистора выполняют сдвоенным проводом (рис. 2.2.17), благодаря чему поля расположенных рядом витков направлены навстречу друг другу и вычитаются.



Рисунок 2.2.17 – Бифилярная намотка

Уменьшение индуктивности достигается также путем намотки на плоский каркас. Недостатком бифилярной намотки является большая собственная емкость. Для получения малой индуктивности и емкости применяют разбивку обмотки на несколько секций, в каждой из которых поочередно меняется направление намотки. Проволочные резисторы значительно дороже тонкопленочных, поэтому применяют их в тех случаях, когда характеристики тонкопленочных резисторов не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Следующий тип объемного (или толстопленочного, в зависимости от изготовления) резистора – **композиционный (композитный)** (рис. 2.2.18).

У этих резисторов токопроводящий материал получают путем смешивания проводящей компоненты (графита или сажи) со связывающими компонентами, наполнителем, пластификатором и отвердителем. В резисторах первого типа полученная композиция наносится на поверхность изоляционного основания, в этом случае наиболее распространен метод погружения основания резистора в ванну со смесью и извлечения его из ванны с определенной скоростью, а в резисторах второго типа – спрессовывается в виде объемного цилиндра или параллелепипеда.

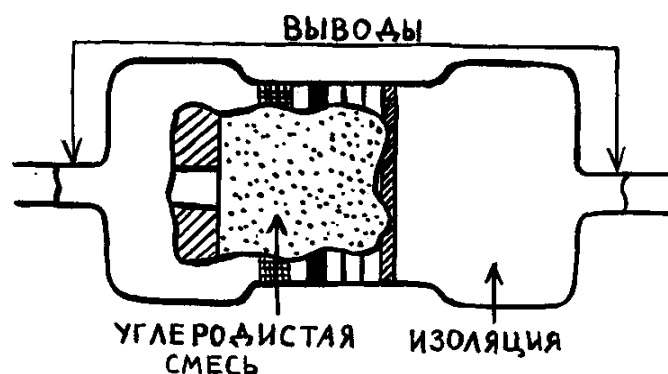


Рисунок 2.2.18 – Композитный резистор

На рис. 2.2.18 показана конструкция объемного резистора, представляющего собой стержень из токопроводящей композиции круглого или прямоугольного сечения с запрессованными проволочными выводами. Снаружи стержень защищен стеклоэмалевой или стеклокерамической оболочкой.

В зависимости от состава композиционные материалы имеют очень широкий диапазон удельных сопротивлений. Объемные композиционные резисторы имеют прямоугольную форму и предназначены для компоновки на печатных платах. Они обладают высокой термостойкостью (до 350 °С) и имеют небольшие габариты.

Эти резисторы просты в изготовлении, имеют высокую надежность и небольшую стоимость, но обладают низкой стабильностью и зависимостью сопротивления от приложенного напряжения.

Из отечественных к композиционным резисторам относят резисторы типов: КЛМ (композиционные лакированные мегаомные) и КВМ (композиционные вакуумированные мегаомные), выпускаемые на номиналы до 10^{11} Ом; КИМ (композиционные изолированные малогабаритные), имеющие номинальную мощность 0,05 и 0,125 Вт; КЭВ (композиционные эмалированные высоковольтные), предназначенные для работы в электрических цепях высокого напряжения.

Композиционные резисторы с проводящими компонентами из благородных металлов обладают улучшенными параметрами по сравнению с резисторами на лакосажевой основе. Параметры таких резисторов близки к параметрам металлопленочных резисторов.

Объемные композиционные резисторы обладают высокой перегрузочной способностью и надежностью, а также более высокой термостойкостью и влагостойкостью по сравнению с резисторами поверхностного типа. Недостатком композиционных резисторов является высокий уровень токовых шумов, что объясняется крупнозернистой структурой проводящего материала.

Разновидность объемных резисторов – **толстопленочные резисторы**. У толстопленочного резистора с квадратной пленкой сопротивление зависит только от толщины.

Следующий вид резисторов, широко распространенных в практике – **пленочные резисторы**.

Для расчета сопротивления тонких пленок пользуются понятием удельного поверхностного сопротивления ρ_s , под которым понимается сопротивление тонкой пленки, имеющей в плане форму квадрата. Величина ρ_s связана с величиной ρ и может быть получена из (6.15), если принять в ней $s = d \cdot w$, где w – ширина резистивной пленки, d – толщина резистивной пленки. Тогда

$$R = \rho_s \frac{l}{w'} \quad (2.2.16)$$

где $\rho_s = \rho/d$ – удельное поверхностное сопротивление, зависящее от толщины пленки d .

На рис. 2.2.19 представлено устройство пленочного резистора. На диэлектрическое цилиндрическое основание нанесена резистивная пленка. На торцы цилиндра надеты контактные колпачки из проводящего материала с припаянными к ним выводами. Для защиты резистивной пленки от воздействия внешних факторов резистор покрывают защитной пленкой.

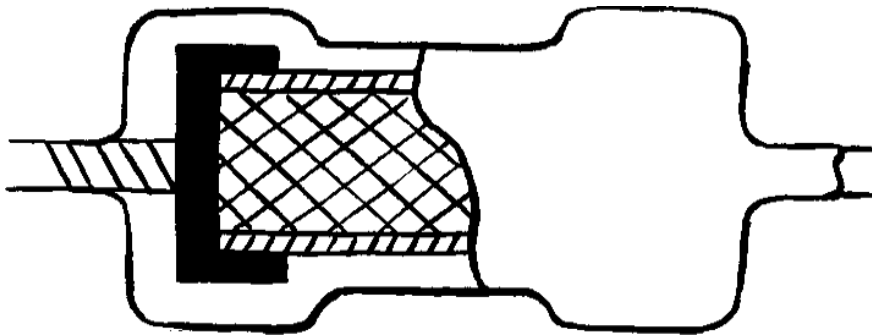


Рисунок 2.2.19 – Конструкция пленочного резистора

Из пленочных резисторов наиболее распространены резисторы с углеродной пленкой и металлопленочные.

В первом случае токопроводящий слой представляет собой пленку пироли- тического углерода. Эти резисторы являются резисторами широкого применения с допусками ± 5 , ± 10 или $\pm 20\%$ и мощностью от 0,125 до 2 Вт. Сопротивление такого резистора определяется соотношением

$$R = \rho_s \frac{l}{\pi D}, \quad (2.2.17)$$

где l – длина резистора (расстояние между контактными колпачками); D – диа- метр цилиндрического стержня резистора.

Такая конструкция резистора (рис. 2.2.20) обеспечивает получение сравни- тельно небольших сопротивлений (сотни Ом). Для увеличения сопротивления ре- зистора резистивную пленку наносят на поверхность керамического цилиндра в виде спирали.

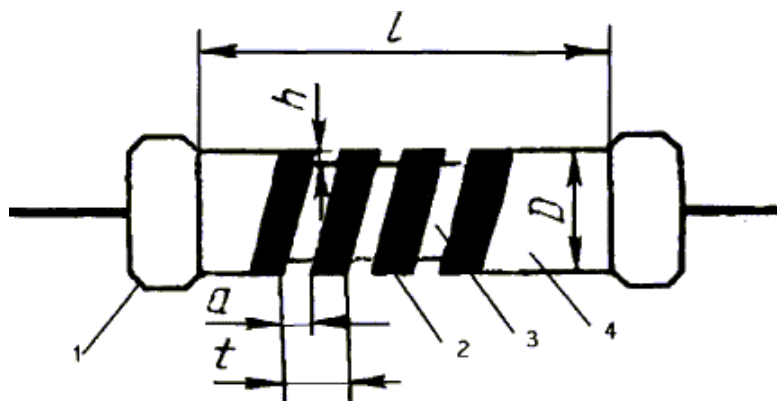


Рисунок 2.2.20 – Конструкция пленочного резистора

Сопротивление такого резистора определяется соотношением

$$R = \rho_s \frac{N\pi D}{t - a'} \quad (2.2.18)$$

где t – шаг спирали; a – ширина канавки (расстояние между соседними витками спирали); $N = l/T$ – число витков спирали.

Металлопленочные резисторы представляют собой изоляционные основания – цилиндрические трубки из керамики, стекла, слоистых пластиков, ситаллов, на которые нанесены пленки специальных сплавов или металлов толщиной 0,1 мкм. У высокоомных резисторов этот слой может иметь форму спирали.

Металлическую пленку наносят на основание резистора осаждением металла при высокой температуре в специальной камере, химическим восстановлением из растворов солей, травлением, оксидированием и др.

Основные материалы для изготовления пленочных резисторов – **титан и тантал**. Для повышения стабильности характеристик резистора плёнку напыляют на нагретое до определенной температуры основание.

Сопротивление металлических пленок обратно пропорционально их толщине. Для получения необходимой величины удельного сопротивления в процессе напыления ведётся постоянный контроль толщины наносимой плёнки.

Поскольку металл обладает более высокой теплостойкостью, чем углерод, то металлопленочные резисторы при равной мощности имеют меньшие габариты, чем резисторы с углеродной пленкой. Кроме того, они обладают более высокой стабильностью при циклических изменениях температуры. Недостатком металлопленочных резисторов является небольшая стойкость к импульсной нагрузке и меньший частотный диапазон (рис.2.2.21), чем у углеродистых. Объясняется это

тем, что токопроводящий слой толще, чем у углеродистых, поэтому увеличивается паразитная емкость между витками резистивной спирали.

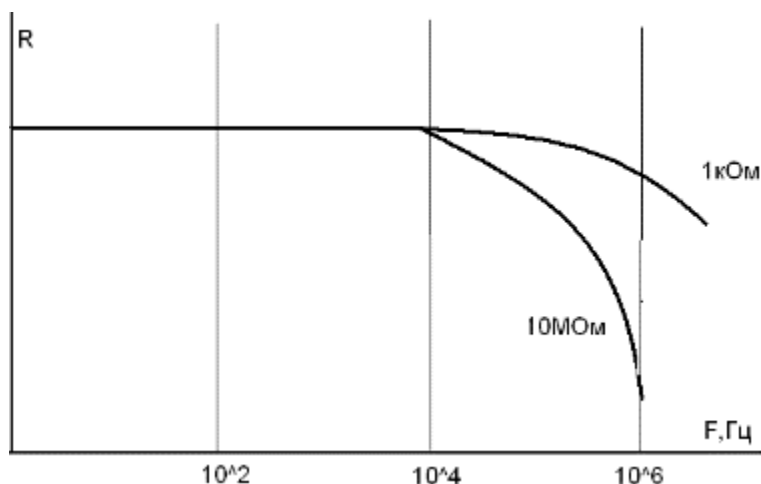


Рисунок 2.2.21 – Частотная зависимость сопротивления пленочных резисторов

На основе металлопленочных резисторов создаются также прецизионные резисторы с допусками $\pm(0,1-1)\%$. Прецизионные резисторы имеют большие габариты, чем резисторы общего применения. Это улучшает тепловые режимы и повышает стабильность свойств проводящего слоя.

В настоящее время широко распространены **SMD-резисторы** (от англ. *Surface Mounted Device*) или чип-резисторы (рис. 2.2.22). Вообще термин SMD можно отнести к любому малогабаритному электронному компоненту, предназначенному для монтажа на поверхность платы, поэтому в нашем случае речь идет о пленочных резисторах для поверхностного монтажа.

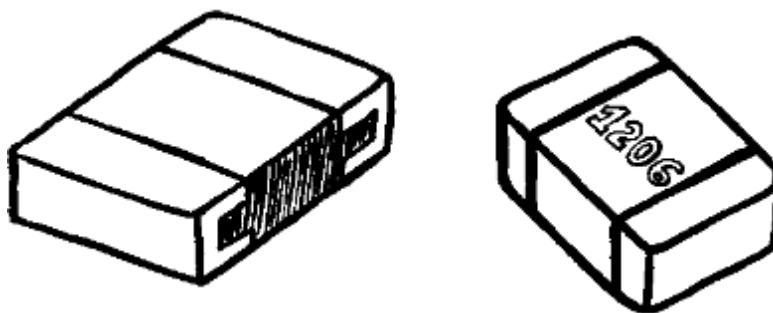


Рисунок 2.2.22 – SMD-резисторы

Типовой SMD-резистор состоит из керамической подложки, на которую нанесён резистивный слой. Сопротивление этого слоя зависит от его толщины, формы и материала, из которого он изготовлен. Для окончательной «подгонки» до номинального сопротивления используется лазерный тримминг. Толстоплёночные SMD-резисторы изготавливают печатным методом. В них резистивный

слой, который представляет собой пасту, наносят на поверхность подложки с помощью трафаретов. Затем производят термообработку (вжигание) получившегося отпечатка при температуре 700-900 °С в конвейерной печи, благодаря чему образуется крепкая монолитная структура.

В качестве резистивного слоя чип-резисторов используются различные материалы – нихром, нитрид тантала, оксид свинца и другие. Наиболее используемый материал подложки SMD-резисторов – это чистая керамика на основе 94...96% поликристаллического оксида алюминия Al_2O_3 , которая обладает хорошей адгезией. Чтобы привести сопротивление резистивного слоя к заданному номиналу, используется лазерная подгонка или тримминг. Суть её заключается в удалении части топологического рисунка из плёнки за счёт лазерного излучения. На рис. 1.23 показан пример обрезки (L-Cut), сделанный с помощью лазерного тримминга.

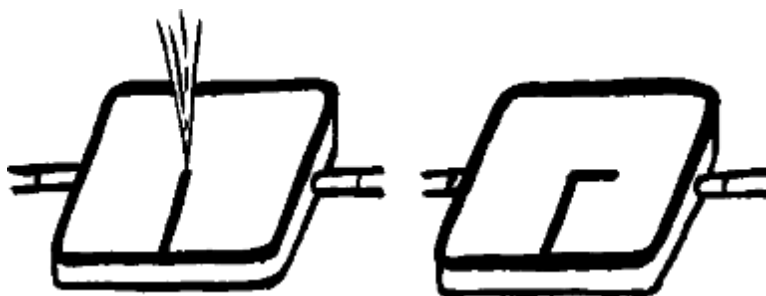


Рисунок 2.2.23 – Тримминг SMD-резистора

Переменные резисторы

В отличие от постоянного резистора, сопротивление которого неизменно в ходе эксплуатации, переменный резистор – это делитель напряжения с плавным регулированием сопротивления, устройство (в простейшем случае в виде проводника с большим омическим сопротивлением, снабженного скользящим контактом), при помощи которого на вход электрической цепи может быть подана часть данного напряжения. Такие делители применяются в радиотехнике и электротехнике, в аналоговой вычислительной и в измерительной технике, а также в системах автоматики, например в качестве датчиков линейных и угловых перемещений.

Очень часто вместо термина «переменный резистор» используют термин «потенциометр». Однозначного подхода к использованию терминов нет. Так, ряд производителей в кодировке своих изделий потенциометров используют термин «переменный резистор» и первые символы кода представляют «RV» от слов

«*Resistor Variable*», но в технической документации (спецификации, чертежах, описании и т. д.) используют термин «потенциометр».

Конструкции переменных резисторов гораздо сложнее, чем постоянных. На рис. 6.24 представлена конструкция переменного резистора круглой формы.

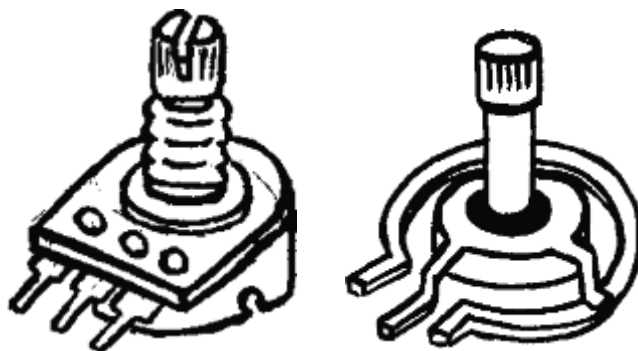


Рисунок 2.2.24 – Потенциометр

Он состоит из подвижной и неподвижной частей. Неподвижная часть представляет собой пластмассовый корпус, в котором смонтирован токопроводящий элемент, имеющий подковообразную форму. Посредством заклепок он крепится к круглому корпусу. Эти заклепки соединены с внешними выводами. Подвижная часть представляет собой вращающуюся ось, с торцом которой посредством чеканки соединена изоляционная планка, на которой смонтирован подвижный контакт (токосъемник), соединенный с внешним выводом. Угол поворота оси ограничивается стопором. Существуют и другие конструкции переменных непроволочных резисторов. Токопроводящий элемент в них бывает тонкослойным металлическим (металлоксидным) или пленочным композиционным (например, резисторы типа СП4). Некоторые типы переменных резисторов состоят из двух переменных резисторов, объединенных в единую конструкцию, в которой токосъемники расположены на общей оси.

Одной из основных характеристик переменного резистора является его функциональная зависимость (кривая регулирования). Это кривая, которая показывает зависимость величины сопротивления между подвижным контактом и одним из неподвижных контактов проводящего элемента от угла поворота.

По характеру функциональной зависимости (рис. 2.2.25) переменные резисторы разделяются на линейные и нелинейные. Характер зависимости определяется схемными задачами, для решения которых предназначен резистор.

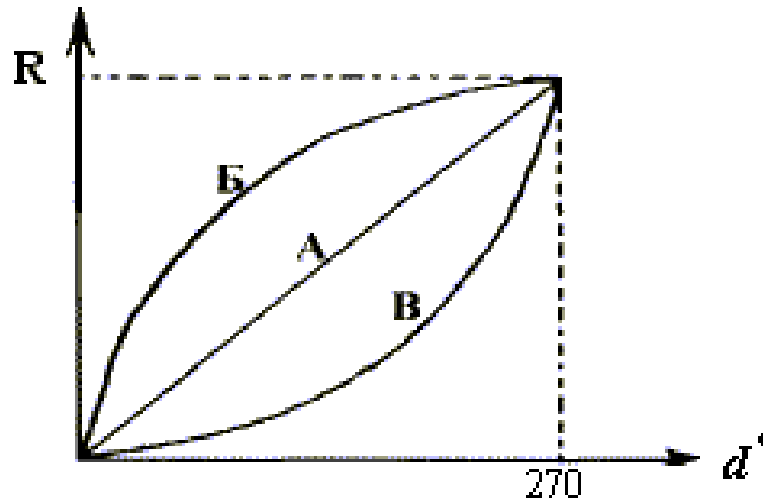


Рисунок 2.2.25 – Функциональная зависимость

При **линейной (А)** зависимости сопротивление меняется равномерно при повороте ручки на один и тот же угол. То есть при повороте ручки, например, на угол 10° сопротивление меняется на 10 Ом. Повернули ещё на 10° , и сопротивление опять изменилось ровно на 10 Ом. Поэтому такие резисторы имеют линейную или нормальную зависимость. Резисторы с линейной функциональной характеристикой можно применять, например, в качестве регулятора напряжения в самодельном блоке питания. В таком случае изменение выходного напряжения при регулировке будет равномерным, а шкала для прибора будет более удобной.

При повороте ручки резистора с **логарифмической (Б)** характеристикой сопротивление сначала изменяется сильно, а потом все меньше и меньше.

Резисторы с показательной или **обратнологарифмической (В)** характеристикой часто применяются в аудиоаппаратуре в качестве регуляторов громкости. Дело в том, что человеческое ухо с ростом громкости хуже воспринимает звук (закон Вебера-Фехнера). В результате, если в качестве регулятора громкости поставить переменный резистор с линейной зависимостью, то шкала регулировки громкости будет нелинейной. На средней и большой громкости нам придётся выкручивать ручку регулятора на больший угол, чтобы ощутить значительное изменение уровня звука.

Существуют резисторы, у которых сопротивление изменяется по закону синуса или косинуса.

К другим важным характеристикам переменных резисторов можно отнести следующие.

1. **Разрешающая способность**, показывающая, какое наименьшее изменение угла поворота подвижной системы резистора может быть различимо. Ее характеризуют минимально допустимым изменением сопротивления при весьма

малом перемещении подвижного контакта. У непроволочных резисторов разрешающая способность теоретически не ограничена и лимитируется дефектами и неоднородностями проводящего слоя, контактной щетки и величиной переходного контактного сопротивления.

2. Шумы вращения. При вращении подвижной системы резистора помимо тепловых и токовых шумов на выходное напряжение, зависящее от угла поворота, накладывается еще одна составляющая – напряжение шумов вращения. Их уровень значительно превышает тепловые и токовые шумы в резисторе и достигает 30-40 дБ. Шумы вращения особенно характерны для непроволочных потенциометров. Источниками шумов вращения могут быть: шумы переходного сопротивления, возникающие в результате появления контактной разности потенциалов между щеткой и резистивным элементом; термоэлектродвижущая сила, возникающая от нагрева проводящего элемента при быстром вращении подвижной системы.

3. Износоустойчивость – число циклов передвижения подвижной системы переменного резистора, при котором его параметры остаются в пределах нормы.

Для особо точных и важных (прецизионных) переменных резисторов износоустойчивость может достигать 10^5 - 10^7 циклов. Правда, устойчивость к ударам и вибрации у таких изделий ниже. Регулировочные резисторы более устойчивы к механическим воздействиям, но их износостойкость меньше, чем у прецизионных, от 5000 до 100000 циклов. Для подстроечных эта величина заметно меньше и редко превышает 1000 циклов.

Нелинейные резисторы

Нелинейными называют резисторы, у которых сопротивление меняется при каком либо внешнем воздействии.

Наиболее часто используются резисторы, сопротивление которых зависит от температуры, приложенного напряжения, освещенности или давления.

Терморезисторами называются полупроводниковые резисторы, у которых сопротивление сильно зависит от температуры токопроводящего элемента.

Терморезисторы с отрицательным ТКС (*Negative Temperature Coefficient*) называются NTC-термисторы или просто термисторы, а с положительным ТКС (*Positive Temperature Coefficient*) – PTC-термисторы или позисторы.

Термисторы характеризуются сильно падающей монотонной зависимостью сопротивления от температуры (рис. 2.2.26). Эта зависимость хорошо изучена и описывается следующим эмпирическим выражением:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.2.19)$$

где R_T – сопротивление термистора при текущей температуре T ; R_0 – номинальное сопротивление термистора, указываемое в справочнике для температуры T_0 , равной $+25\text{ }^\circ\text{C}$ или 298 K ; B – постоянная, зависящая от материала резистора (значение B обычно лежит в пределах от 1000 до 6000 K).

По определению температурный коэффициент сопротивления любого резистора находится по формуле (1.14). Если подставить выражение (1.14) в формулу (1.19) и взять производную, то получим следующее выражение для ТКС NTC-термистора:

$$\alpha_T = -\left(\frac{B}{T^2}\right). \quad (2.2.20)$$

Из формулы (2.2.20) следует, что α_T NTC-термистора не является константой, а зависит от температуры.

В области рабочих температур (обычно от -55 до $+155\text{ }^\circ\text{C}$) абсолютное значение α_T NTC-термисторов оказывается в десятки раз большим, чем у линейных постоянных резисторов.

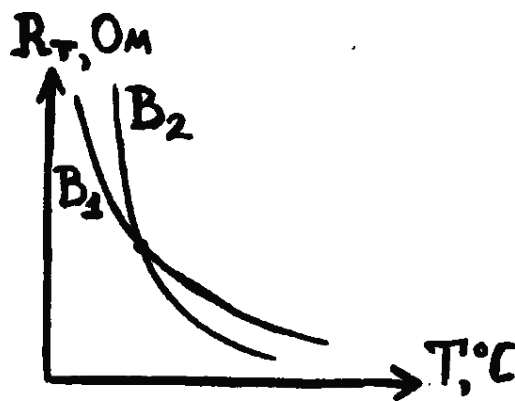


Рисунок 2.2.26 – Температурные зависимости сопротивления для двух NTC-термисторов с номинальным сопротивлением 100 Ом и с разными постоянными B ($B_2 > B_1$)

Терморезисторы применяются для компенсации ТКС различных электрических цепей стабилизации токов и напряжений, теплового контроля, измерения температуры, измерения мощности и т. д.

Вследствие нелинейности температурной характеристики вольтамперная характеристика (ВАХ) будет также нелинейной (рис. 2.2.27). При малых токах ВАХ практически линейна (участок OM), поскольку мощность, выделяемая в терморезисторе, недостаточна для того, чтобы заметно нагреть его.

При больших токах сопротивление резистора уменьшается, что сопровождается уменьшением напряжения на нем.

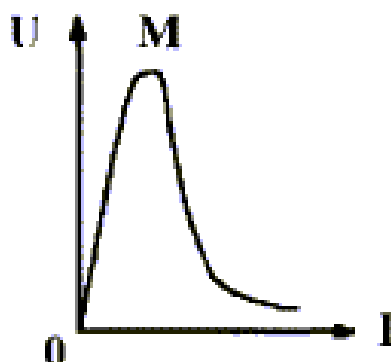


Рисунок 2.2.27 – Вольт-амперная характеристика термистора

Терморезисторы изготавливают из полупроводниковых материалов на основе окислов металлов. Наиболее распространены медно-марганцевые терморезисторы (ММТ), кобальто-марганцевые терморезисторы (КМТ). Нагрев может быть прямой, проходящим через резистор током, и косвенный, от другого теплового источника. Параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, температурный коэффициент сопротивления, максимально допустимая мощность рассеивания, постоянная времени t , которая характеризует тепловую инерцию терморезистора. Обычно постоянная времени лежит в пределах 30-130 секунд.

NTC-термисторы широко используются в системах автоматики в качестве датчиков температуры, в устройствах компенсации температурного дрейфа выходных сигналов усилителей и в качестве ограничителей пусковых токов электродвигателей, галогенных ламп и т. д.

Позистором называется полупроводниковое сопротивление с положительным температурным коэффициентом. Позисторы изготавливаются на основе поликристаллической керамики из титаната бария (BaTiO_3), легированной различными примесями. Сопротивление позисторов резко (на несколько порядков) возрастает после превышения их температуры над некоторым пороговым значением, что связано с фазовым переходом из сегнетоэлектрического состояния в параэлектрическое.

Сегнетоэлектрики (названы по первому материалу, где был открыт сегнетоэлектрический эффект – сегнетова соль) – твёрдые диэлектрики (некоторые ионные кристаллы и пьезоэлектрики), обладающие в определённом интервале температур собственным электрическим дипольным моментом, который может быть

переориентирован за счёт приложения внешнего электрического поля. Сегнетоэлектрические материалы обладают гистерезисом по отношению к электрическому дипольному моменту.

Температура, при которой исчезает спонтанная поляризация (то есть собственный дипольный момент) и происходит перестройка кристаллической структуры, носит название температуры (точки) Кюри (ещё одна аналогия с ферромагнетиками). Переход через точку Кюри означает фазовый переход (рис. 2.2.28), а соответствующие фазы обозначаются как полярная (сегнетоэлектрик) и неполярная (параэлектрик – нелинейный диэлектрик, не обладающий спонтанной поляризацией, относительная диэлектрическая проницаемость которого уменьшается с ростом температуры).

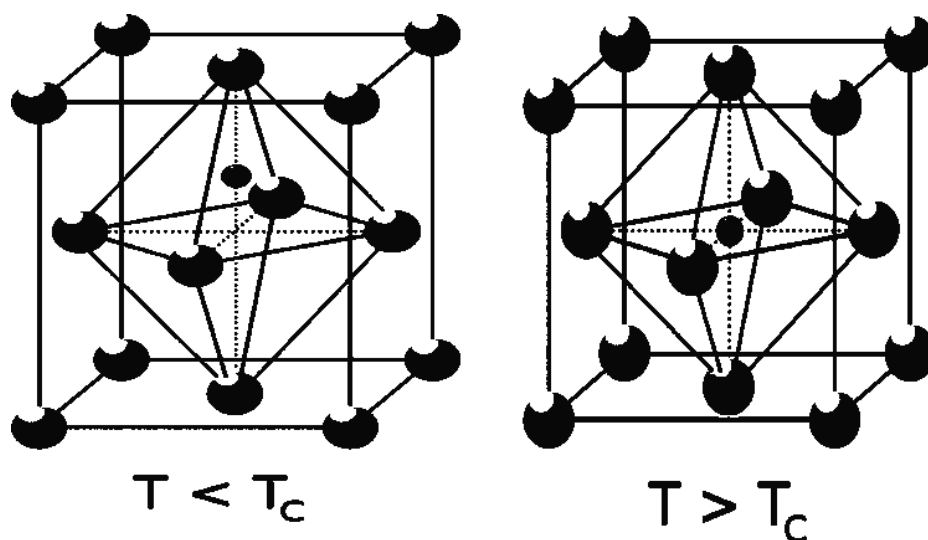


Рисунок 2.2.28 – Титанат бария при температуре меньше точки Кюри (слева) и больше точки Кюри (справа)

Спонтанная поляризация в сегнетоэлектриках в точке Кюри меняется либо непрерывно (переход второго рода, сегнетова соль), либо скачком (переход первого рода, титанат бария). Другие характеристики сегнетоэлектриков, такие как относительная диэлектрическая проницаемость, могут достигать в точке Кюри очень больших значений (10^4 и выше).

Механизм приобретения дипольного момента в полярной фазе (фазе сегнетоэлектрика) может также различаться: возможен вариант как со смещением ионов (титанат бария; соответствующий фазовый переход называется переходом типа смещения), так и с упорядочиванием ориентации уже существующих в веществе диполей (дигидрофосфат калия, триглицинсульфат).

Рассмотрим типовую температурную зависимость сопротивления позистора (рис. 2.2.29).

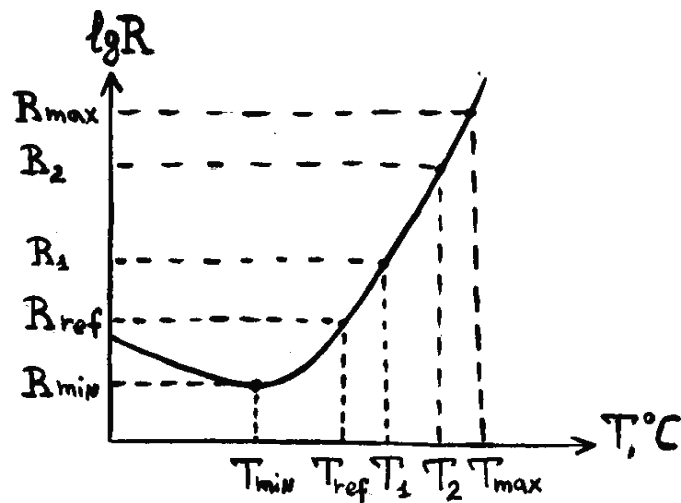


Рисунок 2.2.29 – Типовая температурная зависимость сопротивления позистора

На этом рисунке R_{\min} – минимальное сопротивление (сопротивление при $T = T_{\min}$); T_{\min} – температура, при которой ТКС из отрицательного становится положительным; R_{ref} – опорное сопротивление ($R_{\text{ref}} = 2R_{\min}$, считается, что с R_{ref} начинается быстрый рост зависимости $R = f(T)$); T_{ref} – характеристическая температура, при которой $R = R_{\text{ref}}$; (для ряда позисторов вместо T_{ref} и R_{ref} указываются пороговая температура T_{NAT} и соответствующее ей значение сопротивления R_{NAT} , лежащие немного выше T_{ref} и R_{ref}); T_{\max} – максимально допустимая температура термистора; R_{\max} – сопротивление при T_{\max} .

В области резкого увеличения сопротивления α_T позистора приблизительно постоянен. Если на участке от R_{ref} до R_{\max} известны два значения сопротивления, например R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$), которые соответствуют двум температурам T_1 и T_2 ($T_2 > T_1$), то для α_T будет справедливо:

$$\alpha_T = \frac{\ln(R_2/R_1)}{T_2 - T_1}. \quad (2.2.21)$$

В пределах этого температурного диапазона, зная сопротивление для некоторой температуры, можно рассчитать, каким станет сопротивление при другой температуре:

$$R_2 = R_1 \cdot \exp(\alpha_T(T_2 - T_1)). \quad (2.2.22)$$

С помощью этой формулы может быть рассчитано сопротивление позистора для выбранной температуры на основании его справочных данных.

Из-за резкого изменения сопротивления масштаб по оси ординат данного графика принято иметь логарифмическим. На участке от R_{ref} до R_{max} логарифм сопротивления позистора растет линейно с увеличением температуры. Это указывает на экспоненциальный рост функции $R = f(T)$.

На рис. 2.2.30 представлена вольтамперная характеристика позистора.

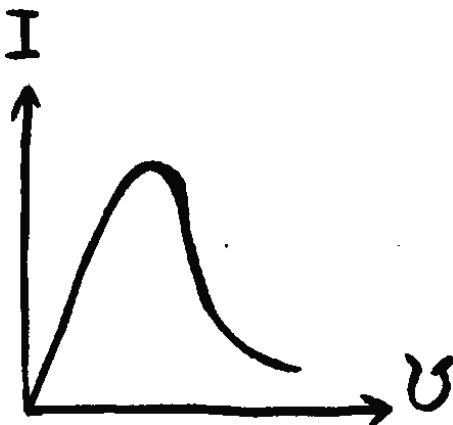


Рисунок 2.2.30 – Вольтамперная характеристика позистора

Позисторы нашли широкое применение в схемах ограничения тока, в качестве пускового реле двигателей компрессоров холодильников, в качестве нагревательных элементов фумигаторов, зеркал автомобилей и других устройств, а также как высокочувствительный датчик температуры.

Варисторы представляют собой полупроводниковые резисторы, сопротивление которых начинает резко падать, если приложенное напряжение увеличивается сверх определенного значения.

Для изготовления варистора применяют порошкообразный карбид кремния (полупроводник) или оксид цинка ZnO и связующее вещество (глину, жидкое стекло, лаки, смолы и др.), которые запрессовывают в форму и спекают в ней при температуре около $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем поверхность образца металлизуют и припаивают к ней выводы (рис. 2.2.31).

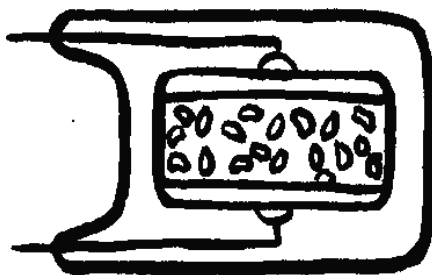


Рисунок 2.2.31 – Конструкция варистора

Конструктивно варисторы выполняются обычно в виде дисков, таблеток, стержней; существуют бусиновые и плёночные варисторы.

Вольтамперная характеристика варистора (рис. 2.2.32) симметрична относительно начала осей координат.

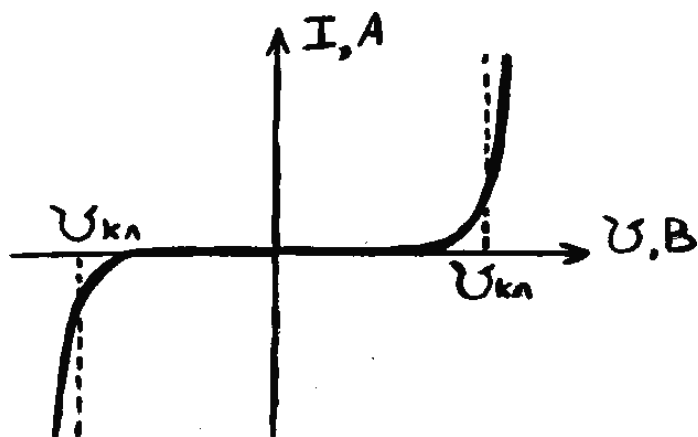


Рисунок 2.2.32 – Вольтамперная характеристика варистора

Нелинейность характеристик варисторов обусловлена локальным нагревом соприкасающихся граней многочисленных кристаллов карбида кремния (или иного полупроводника). При локальном повышении температуры на границах кристаллов сопротивление последних существенно снижается, что приводит к уменьшению общего сопротивления варисторов.

Уменьшение сопротивления с ростом напряжения связано с падением сопротивления контактов между зёрнами SiC или оксида цинка. Это происходит вследствие нелинейного роста тока через $p - n$ -переходы, образующиеся на этих контактах, в результате автоэлектронной эмиссии из острых участков зёрен.

Один из основных параметров варистора – коэффициент нелинейности λ – определяется отношением его статического сопротивления R к динамическому сопротивлению R_d :

$$\lambda = \frac{R}{R_d}. \quad (2.2.23)$$

Коэффициент нелинейности лежит в пределах 2-10 у варисторов на основе SiC и 20-100 у варисторов на основе ZnO. Другими основными параметрами варисторов являются классификационное напряжение $U_{кн}$, максимально допустимая выделяемая энергия W и средняя рассеиваемая мощность $P_{ср}$.

Напряжение $U_{кн}$ соответствует току через варистор, равному 1 мА. Варисторы всегда работают при напряжениях выше $U_{кн}$, т. к. основное применение варисторов – защита от кратковременных перенапряжений своим шунтирующим воздействием.

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

Варисторы применяются для стабилизации и регулирования низкочастотных токов и напряжений, в аналоговых вычислителях – для возведения в степень, извлечения корней и других математических действий, в целях защиты от перенапряжений (например, высоковольтные линии электропередачи, линии связи, электрические приборы) и др.

Фоторезистор – это полупроводниковый резистор, который при облучении светом уменьшает свое сопротивление.

Конструкция разных моделей фоторезисторов (рис. 1.33) может отличаться по форме и материалу корпуса. Но в основе каждого такого прибора лежит подложка, чаще всего керамическая, покрытая слоем полупроводникового материала. Поверх этого полупроводника наносится тонкий слой золота, платины или другого коррозиестойкого металла. Слои наносятся методом напыления. Напыленные слои соединяют с электродами, на которые поступает электрический ток. Всю эту конструкцию покрывают прозрачным пластиком и помещают в корпус с окошком для попадания света.

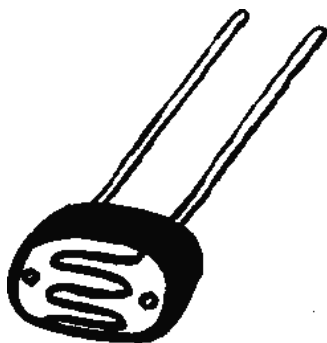


Рисунок 2.2.33 – Конструкция фоторезистора

В неактивном состоянии полупроводник проявляет свойства диэлектрика. Для того чтобы он проводил ток, необходимо внешнее воздействие – свет. Под действием квантов света образуются свободные носители заряда, в результате чего он становится способным проводить электрический ток. Чем больше электронов образуется, тем меньшее сопротивление току оказывает полупроводниковый материал. Путем подбора легирующих добавок можно создавать фоторезисторы для работы в разных спектральных диапазонах.

Сильными сторонами фоторезисторов оказывается их высокая надежность и низкая цена. Достоинством является низкий порог чувствительности.

К недостаткам можно отнести инерционность. Запаздывание сигнала понижает быстродействие устройств на базе терморезисторов, что часто бывает неприемлемым.

Еще одним типом резистора, сопротивление которого сильно изменяется от внешнего воздействия, является **тензорезистор**. Его работа основана на изменении внутреннего сопротивления при физической деформации чувствительного элемента.

Тензоэлемент представляет собой тонкую металлическую проволоку или полосу фольги (из медно-никелевого или хромо-никелевого сплава), сложенную в спиральную «гармошку» и наклеенную на изолирующую подложку (рис. 2.2.34). При её деформации происходит удлинение материала относительно исходного размера. Следовательно, изменяется омическое сопротивление проводника (как известно, оно пропорционально длине проводящей части).

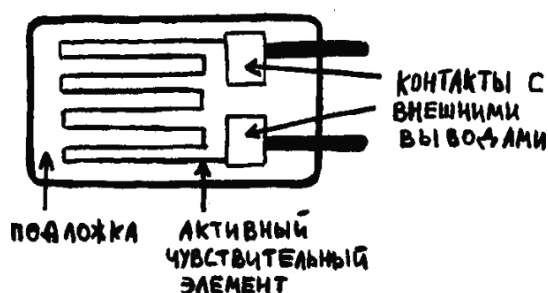


Рисунок 2.2.34 – Конструкция тензорезистора

В процессе градуировки для каждого тензорезистора вычисляется коэффициент чувствительности (отношение базового электрического сопротивления к сопротивлению в деформированном состоянии). Для корректного функционирования элемента при его калибровке нужно тщательно соблюдать условия крепления на испытуемом материале (вплоть до применения специального, стандартизированного клея) и температурный диапазон.

В современной промышленности вместо металлической фольги чувствительные элементы тензодатчика могут представлять собой тонкие полупроводниковые плёнки, наносимые методом напыления. Их чувствительность к деформации намного выше.

При деформации чувствительного элемента изменение сопротивления очень незначительно. Для его надёжного определения внешнее напряжение подключают к тензорезистору через мостовую схему (рис. 2.2.35).

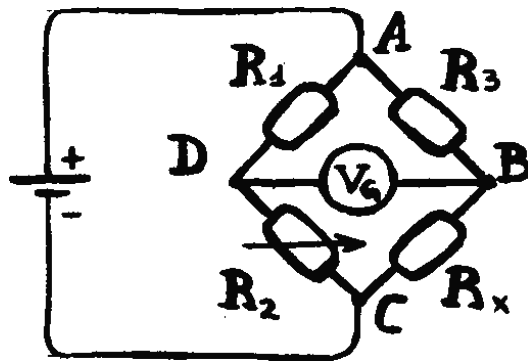


Рисунок 2.2.35 – Схема измерений с помощью тензорезистора

При этом тензорезистор устанавливается вместо одного из плеча моста. Как известно, мостовая схема очень чувствительна и позволяет определять даже малейшие изменения проводимости каждого резистора. Выходной сигнал с мостовой схемы можно усилить: для непосредственной записи (аналоговой) или преобразования в цифровую форму с последующей индикацией.

Посредством измерения напряжения, приложенного к резистору, можно оценивать напряжения в материале (если резистор контактирует с деформируемой поверхностью). Подобная методика измерений, как и сами датчики, находит широкое применение в промышленности и научно-исследовательских работах.

Помимо этих областей, тензорезисторы выступают как составная часть многих приборов (для контроля давления, ускорения, перемещения, биений, крутящего момента и пр.).