

КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Урок 1. Резисторы

Основные параметры и характеристики резисторов

Резистор является наиболее распространенным электронным элементом, основное функциональное назначение которого оказывать активное сопротивление прохождению электрического тока. С помощью резисторов в электрической цепи создается требуемое сопротивление и обеспечивается необходимое распределение и регулирование электрической энергии в элементах электронных устройств.

Они широко применяются в электрических цепях для ограничения силы тока, а также при создании делителей напряжения и шунтов.

Выпускаемые промышленностью резисторы классифицируются по различным признакам.

В зависимости от области применения резисторы подразделяются на резисторы:

- общего назначения;
- специального назначения, которые в свою очередь подразделяются на высокочастотные, высоковольтные, высокоомные и прецизионные (высокоточные) резисторы.

По характеру изменения сопротивления резисторы подразделяют на резисторы

- постоянные;
- переменные.

К группе *постоянных* резисторов относят резисторы, сопротивление которых нельзя изменять в процессе настройки и во время работы электронного устройства.

К группе *переменных* резисторов относят подстроечные и регулировочные резисторы, имеющие, как правило, три вывода, причем сопротивление между двумя крайними выводами имеет фиксированное значение, как и у постоянных резисторов, а значение сопротивления между крайними выводами и центральным выводом зависит от местоположения подвижного контакта.

Переменными *подстроечными* резисторами называют резисторы, которые устанавливаются на монтажной плате и предназначенные, главным образом, для подстройки электрических режимов электронных устройств.

Переменными *регулируемыми* резисторами называют резисторы, которые в процессе эксплуатации используются для изменения входных и выходных электрических параметров электронного устройства. Регулируемые резисторы отличаются повышенной износоустойчивостью, устанавливаются, как правило, на лицевой стороне электронных устройств и предназначены для проведения многократных регулировок. По характеру изменения сопротивления при перемещении подвижной части регулировочные резисторы делятся на резисторы с линейной, логарифмической и обратнологарифмической характеристикой.

В зависимости от материала, использованного для создания проводящего слоя, резисторы подразделяются на:

- проволочные резисторы;
- непроволочные резисторы, которые, в свою очередь, подразделяются на пленочные и объемные.

В *пленочных* резисторах токопроводящий материал с высоким удельным сопротивлением наносится в виде тонкого слоя на поверхность прочного термостойкого изоляционного основания.

Токопроводящая часть *объемных* непроволочных резисторов представляет собой стержень из материала с большим удельным сопротивлением, покрытый слоем влагостойкой эмали. Каждый резистор характеризуется целым рядом параметров, основными из которых являются следующие:

- номинальное значение сопротивления;
- допустимое отклонение сопротивления от номинального значения;
- номинальная мощность рассеяния;
- предельное рабочее напряжение;
- температурный коэффициент сопротивления;
- уровень собственных шумов.

Номинальное значение сопротивления резистора – это электрическое сопротивление, значение которого обозначено на резисторе и указано заводом-изготовителем в технической документации. Номинальные значения сопротивлений стандартизованы в соответствии ГОСТ 28884-90.

Для постоянных резисторов установлено шесть рядов номинальных значений: E6, E12, E24, E48, E96 и E192. Цифра после буквы E указывает число номинальных значений в каждом десятичном интервале.

Допустимое отклонение сопротивления от номинального значения характеризует погрешность изготовления резистора. Допустимые отклонения также стандартизованы и исчисляются в процентах. Допустимые отклонения сопротивлений резисторов устанавливаются такими, чтобы возможные значения сопротивления резисторов не перекрывали значений соседних величин соответствующего ряда номинальных значений. Числовые коэффициенты номинальных значений сопротивлений резисторов наиболее широко применяющиеся на практике рядов E6, E12, E24 и соответствующие этим рядам допустимые отклонения сопротивлений от номинальных значений (погрешности) приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Числовые коэффициенты номинальных значений рядов E6, E12, E24

Ряд	Числовые коэффициенты	Погрешность
E6	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8	± 20%
E12	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8 1,2 1,8 2,7 3,9 5,6 8,2	± 10%
E24	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8 1,1 1,6 2,4 3,6 5,1 7,5 1,2 1,8 2,7 3,9 5,6 8,2 1,3 2,0 3,0 4,3 6,2 9,1	± 5%

Номинальная *мощность рассеивания* резистора – это максимальная мощность, которую резистор может рассеивать без изменения своих параметров свыше значений, указанных в технической документации, при непрерывной электрической нагрузке и определенной температуре окружающей среды. Для резисторов установлен следую-

щий ряд возможных значений номинальной мощности рассеяния, выраженной в ваттах: 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 160; 250; 500.

Для большинства разновидностей резисторов заводы-изготовители устанавливают диапазон рабочих температур от -55 °С до $+125$ °С. Изменение сопротивления резистора при изменении температуры характеризуется **температурным коэффициентом сопротивления ТКС**, равным относительному изменению сопротивления резистора при изменении температуры на один градус:

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t} 100\%,$$

где

R_0 – сопротивление резистора при нормальной температуре; ΔR – предельное изменение сопротивления резистора; Δt – предельное изменение температуры резистора. Если сопротивление резистора увеличивается при возрастании температуры, то его ТКС положительно. Если сопротивление резистора при возрастании температуры уменьшается, то его ТКС отрицательно.

Резисторы, имеющие достаточно большое значение ТКС, называются **терморезисторами**. Эти резисторы изготавливают с использованием специальных сплавов или на основе полупроводниковых материалов.

Предельное рабочее напряжение резистора – это максимально допустимое напряжение, при котором резистор сохраняет свою работоспособность. Величина этого напряжения не должна превышать значения, рассчитанного исходя из номинальной мощности и номинального напряжения. Кроме того, предельное рабочее напряжение ограничивается возможностью электрического пробоя, а также определяется конструкцией резистора.

Уровень собственных шумов резистора характеризует шумы, возникающие в его проводящем слое. Шумы резистора в основном складываются из тепловых и токовых шумов. Тепловые шумы связаны с флуктуационными изменениями объемной концентрации собственных электронов в проводящем слое и обусловлены их тепловым движением. Среднюю мощность тепловых шумов определяют по формуле Найквиста:

$$P_i = 4KT\Delta f,$$

где $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; Δf – полоса частот, в которой измеряется мощность.

Действующее значение напряжения теплового шума определяется выражением:

$$U_i = \sqrt{4KTR\Delta f},$$

где R – номинальное значение сопротивления резистора.

Токовый шум обусловлен дискретной структурой проводящего слоя резистивного элемента. При протекании тока возникают местные локальные 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 U_i . Поскольку величина тока, протекающего через резистор, зависит от величины приложенного напряжения $U\Delta$, то в первом приближении можно считать, что

$$U_i = k\Delta U$$

где k – коэффициент, зависящий от конструкции резистора и свойств резистивного слоя. Величина k указывается в технической документации и лежит в пределах от 0,2 до 20 мкВ/В. Чем однороднее структура, тем меньше токовый шум. У проволочных резисторов токовый шум практически отсутствует, величина k составляет менее 0,1 мкВ/В. У металлопленочных и углеродистых резисторов величина k составляет 1÷5 мкВ/В, а у композиционных резисторов величина k может достигать 50 мкВ/В. Малошумящие резисторы выделяют в специальную группу А.

Действующая в России система условных обозначений, используемая в маркировке элементов и при оформлении технической документации, предусматривает как полные, так и сокращенные условные обозначения электронных компонентов.

Сокращенное условное обозначение состоит из трех элементов: первый элемент – буква или сочетание букв, обозначающих подкласс резистора; второй элемент – цифра, характеризующий токопроводящий слой резистора; третий элемент – число, обозначающее регистрационный номер типа (разработки) резистора.

Полное условное обозначение помимо сокращенного условного обозначения включает в себя также величины основных параметров и характеристик резистора, а именно: номинальную мощность рассеяния, номинальное значение сопротивления, допустимое отклонение сопротивления от номинального значения, код собственных шумов и дату изготовления.

Значения номинальных сопротивлений и допуски (допустимое отклонение сопротивления от номинального значения) маркируются на резисторах одним из двух способов – с использованием буквенно-цифрового обозначения, или путем нанесения цветовой маркировки.

Буквенно-цифровая маркировка резисторов

В настоящее время в России при маркировке резисторов руководствуются стандартами ГОСТ 11076-69 и ГОСТ 28883-90.

Система буквенно-цифровой маркировки допускает вывод как полной, так и сокращенной информации о параметрах резисторов.

Полная буквенно-цифровая маркировка резисторов состоит из нескольких позиционных элементов.

Первый позиционный элемент – буква или сочетание букв, которые обозначают подкласс резистора. Используются следующие обозначения:

- Р – резистор постоянный;
- РП – резистор переменный;
- НР – набор постоянных резисторов;
- ТР – терморезистор с отрицательным ТКС;
- ТРП – терморезистор с положительным ТКС.

Второй позиционный элемент – цифра, которая указывает марку материала токопроводящего слоя:

- 1 – непроволочный;
- 2 – проволочный или металлофольгированный.

Третий позиционный элемент – цифра, обозначающая регистрационный номер конструктивной разработки резистора. Третий позиционный элемент отделяется от второго дефисом.

Четвертый позиционный элемент – число, обозначающее номинальную мощность, выраженную в ваттах.

Пятый позиционный элемент – номинальное сопротивление и буквенное обозначение единицы измерения. Кодированное обозначение номинала состоит из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву (русского или латинского алфавита). Буква обозначает множитель, на который умножается цифровое обозначение, и определяет положение запятой десятичного знака значения сопротивления резистора.

То есть если сопротивление резистора выражено не целым числом, а целым числом с дробью или просто дробью, то вместо запятой в маркировке резистора ставится множитель один из тех, что приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Коды множителей номинальных значений резистора

Множитель	1	10^3	10^6	10^9	10^{12}
Буква русского алфавита	Е	К	М	Г	Т
Буква латинского алфавита	R	K	M	G	T

Шестой позиционный элемент – буква (русского или латинского алфавита), обозначающая величину допустимого отклонения сопротивления резистора от указанного номинального значения. В табл. 1.3 приведены возможные варианты кода допустимых отклонений.

Таблица 1.3. Коды допустимых отклонений номинальных значений компонентов

Допустимое отклонение, %	±20	±10	±5	±2	±1	±0,5	±0,25	±0,1
Буква русского алфавита	В	С	И	Л	Р	Д	У	Ж
Буква латинского алфавита	M	K	J	G	F	D	C	B

При необходимости далее может быть установлены коды, характеризующие шумовые свойства, ТКС и дату изготовления резистора.

Сокращенная буквенно-цифровая маркировка резисторов обязательно должна содержать пятый и шестой позиционные элементы полной маркировки, т.е. представлять информацию о номинальном значении и допустимом отклонении. Остальные позиционные маркировочные элементы устанавливаются, если для них имеется достаточно места.

На практике могут применяться резисторы, разработанные и промаркированные в соответствии с более ранними стандартами. В частности, ГОСТ 13453-68 устанавливает, что в качестве первого позиционного элемента полной буквенно-цифровой маркировки резисторов используют следующие обозначения:

- С – резистор постоянный;
- СП – резистор переменный;

СТ – терморезистор;

СФ – фоторезистор.

При этом в качестве второго позиционного элемента используется цифровой код, который также определяет марку материала токопроводящего слоя, но с другой кодировкой:

- 1 – углеродистый или бороуглеродистый;
- 2 – металлодиэлектрический или металлоокисный;
- 3 – композиционно-пленочный;
- 4 – композиционно-объемный;
- 5 – проволочный.

Остальные позиционные элементы данной маркировки в основном соответствуют действующей буквенно-цифровой маркировке.

Тип резисторов, разработанных до 1968 года, обозначается в виде букв, отражающих конструктивно-технологические особенности резисторов. Первая буква в маркировке резистора обычно обозначает материал резистивного элемента (У – углеродистые, М – металлопленочные, П – проволочные и т.д.). Вторая буква обозначает вид защиты (Л – лакированные, Г – герметизированные, Э – эмалированные и т.д.). Третья буква – особые свойства или назначение резистора (Т – теплостойкие, П – прецизионные, В – высоковольтные и т.д.). Далее через дефис указываются цифры номинальной мощности, выраженной в ваттах. После этого приводится номинальное значение сопротивления с указанием единицы номинала и допустимым отклонением номинала. Например, маркировка МЛТ – 2 47 Ом $\pm 10\%$ означает металлизированный лакированный теплостойкий постоянный резистор, номинальной мощностью 2 Вт, номинальным сопротивлением 47 Ом и допустимым отклонением $\pm 10\%$.

Примеры буквенно-цифровой маркировки резисторов приведены на рис. 1.1.

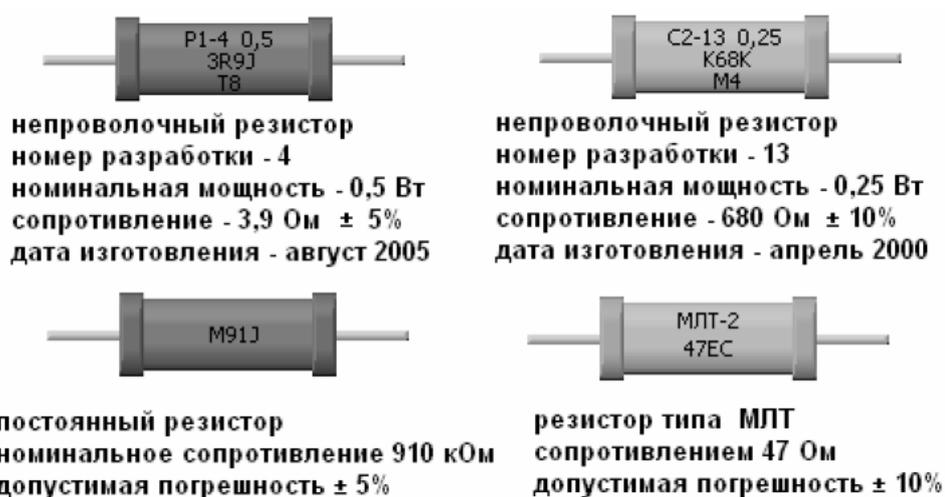


Рис. 1.1. Примеры буквенно-цифровой маркировки резисторов

Цветовая маркировка резисторов

В соответствии с действующим в России ГОСТ 28883-90 и требованиями Публикации МЭК 62-74 допускается маркировка постоянных резисторов цветным кодом. Ее наносят знаками на корпус резистора в виде цветных колец, полос или точек. Для однозначного считывания кода цветные знаки сдвигают к одному из выводов резистора и располагают слева направо от торца. Если размер резистора, вследствие его малости, не обеспечивает необходимого отступа от его торцевых частей, то ширина последнего кольца (полосы или точки) делается в полтора-два раза больше (шире) других.

Число маркировочных знаков на резисторе может колебаться от трех до шести. Каждому цвету маркировочного кольца (полосы, точки) соответствует определенное числовое значение, как это показано в табл. 1.6.

Таблица 1.6. Цветовой код маркировки параметров резисторов

Цвет	Цифра номинала	Десятичный Множитель	Допустимое отклонение, %	ТКС $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
серебристый	—	10^{-2}	10	—
золотой	—	10^{-1}	5	—
черный	0	10^0	—	250
коричневый	1	10^1	1	100
красный	2	10^2	2	50
оранжевый	3	10^3	—	15
желтый	4	10^4	—	25
зеленый	5	10^5	0,5	20
синий	6	10^6	0,25	10
фиолетовый	7	10^7	0,1	5
серый	8	10^8	—	—
белый	9	10^9	—	1
отсутствует	—	—	20	—

При маркировке цветным кодом номинальное сопротивление резисторов в Омах выражается двумя или тремя цифрами (в случае трех цифр последняя цифра не равна нулю) и десятичным множителем 10^n , где n – любое число от -2 до +9. Таким образом, первые две полоски всегда означают первые два знака номинала. Если полосок 3 или 4, третья полоска означает десятичный множитель, то есть степень десятки, которая умножается на двузначное число, указанное первыми двумя полосками. Если полосок 4, последняя указывает точность резистора. Если полосок 5, третья означает третий знак сопротивления, четвертая — десятичный множитель, пятая — точность. Шестая полоска, если она есть, указывает величину температурного коэффициента сопротивления.

Цветовое кодирование температурного коэффициента сопротивления применяют только для резисторов с номинальным значением сопротивления, выраженным тремя значимыми цифрами. При этом для обозначения цветовым кодом температурных коэффициентов сопротивления применяют следующие методы:

- наносят цветовую полоску в качестве шестой и более широкой полосы;
- наносят прерывистую цветную полосу в качестве шестой полосы;
- наносят цветную спиральную линию в качестве шестой полосы.

Особый случай цветовой маркировки резисторов — переключки нулевого сопротивления. Они обозначаются одной черной полоской по центру корпуса резистора.

Примеры внешнего вида резисторов с цветовой маркировкой приведены на рис. 1.2.

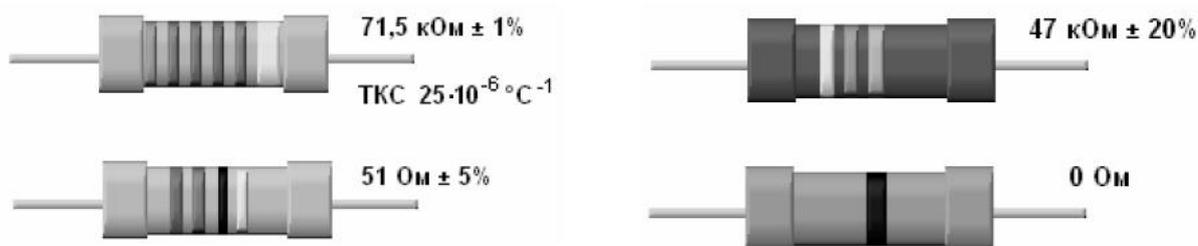


Рис. 1.2. Примеры цветной маркировки резисторов

Маркировка SMD резисторов

В последнее время стала широко применяться технология поверхностного монтажа. Специально для такой технологии был разработан большой спектр миниатюрных элементов, которые называют SMD-компонентами (Surface Mount Devices). Типоразмер SMD-элементов кодируется двумя парами чисел, которые представляют собой соответственно длину и ширину в дюймах.

SMD резисторы маркируются различными способами. Способ маркировки зависит от типоразмера резистора и допустимого отклонения номинального значения: Резисторы типоразмера 0402 из-за своей сверх миниатюрности не маркируются. Резисторы с допуском 5 и 10% остальных типоразмеров маркируются тремя цифрами, первые две из которых обозначают мантиссу, а последняя – показатель степени по основанию 10 для определения номинала резистора в Омах. При необходимости к значащим цифрам добавляется буква R для обозначения десятичной точки.

Прецизионные резисторы (с допуском 2% и меньше) типоразмеров от 0805 и выше маркируются четырьмя цифрами, первые три из которых обозначают мантиссу, а последняя – показатель степени по основанию 10 для задания номинала резистора в Омах. Буква R также служит для обозначения десятичной точки.

Примеры маркировки SMD резисторов приведены на рис. 1.3.

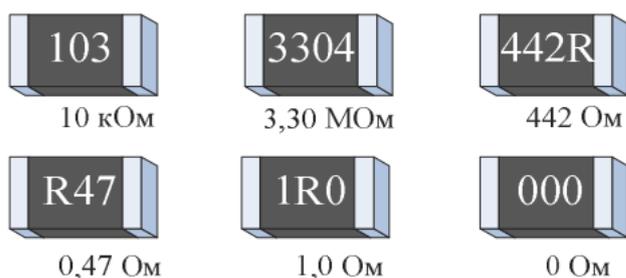


Рис. 1.3. Примеры буквенно-цифровой маркировки SMD резисторов

У резисторов с нулевым сопротивлением, выполняющих функции перемычек, маркировка отсутствует или наносится код 000.

Необходимо заметить, что ряд фирм производителей при маркировке SMD элементов использует собственную, внутривзаводскую кодировку, которая отличается рекомендованной МЭК.

Для идеального резистора в любой момент времени должен выполняться закон Ома, а именно, мгновенное значение напряжение на резисторе пропорционально току проходящего через него:

$$U(t) = R \cdot I(t)$$

В действительности же резисторы в той или иной степени обладают также паразитной емкостью, паразитной индуктивностью и нелинейностью вольтамперной характеристики.

Цепи, состоящие из резисторов. При последовательном соединении резисторов (рис. 1.4) их сопротивления складываются.

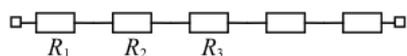


Рис. 1.4. Последовательное соединение резисторов

$$R = \sum R_i$$

При параллельном соединении резисторов (рис. 1.5) складываются величины, обратно пропорциональные сопротивлению, т. е.

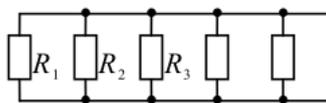


Рис. 1.5. Параллельное соединение

$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

Задания:

1. Определить эквивалентное сопротивление электрической цепи, содержащей последовательно соединенные резисторы $R_1 = 1 \text{ КОм}$, $R_2 = 1 \text{ МОм}$, $R_3 = 47 \text{ Ом}$. Определить электрический ток, протекающий в электрической цепи, если к ней приложено постоянное напряжение $U = 5\text{В}$. Изобразить принципиальную электрическую схему.
2. Определить эквивалентное сопротивление электрической цепи, содержащей параллельно соединенные резисторы $R_1 = 1 \text{ КОм}$, $R_2 = 1 \text{ МОм}$, $R_3 = 47 \text{ Ом}$. Определить электрические токи во всех ветвях электрической цепи, если к ней приложено постоянное напряжение $U = 5\text{В}$. Изобразить принципиальную электрическую схему.
3. Определить эквивалентное сопротивление электрической цепи, содержащей последовательно соединенный резистор $R_1 = 1 \text{ КОм}$ и параллельно соединенные резисторы $R_2 = 1 \text{ МОм}$, $R_3 = 47 \text{ Ом}$. Определить электрические токи во всех ветвях электрической цепи, если к ней приложено постоянное напряжение $U = 5\text{В}$. Изобразить принципиальную электрическую схему.

Список литературы

Основная

1. Берикашвили В.Ш. Электронная техника: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования/ В.Ш. Берикашвили.- 2-е изд., стер.- М.: Издательский центр "Академия", 2019 – 336 с.
2. Миловзоров, О. В. Основы электроники: учебник для СПО/ О.В. Миловзоров, И. Г. Панков. - 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 407 с.

Дополнительная

1. Гаврилов С. А., Бартош А.И. Схемотехника. От азов до создания практических устройств.- СПб.: Наука и Техника, 2020.- 528с.
2. Горошков Б.И. Электронная техника: учеб. пособие для студ. сред. проф. образования/ Б.И. Горошков, А.Б. Горошков.- 2-е изд., стер.- М.: Издательский центр "Академия", 2008.- 320 с.
3. Долженко О.В., Королев Г.В. Сборник задач, вопросов и упражнений по радиоэлектронике: Учеб. пособие для сред. ПТУ.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1986.- 103 с.
4. Игумнов Д.В., Королев Г.В., З Громов И.С. Основы микроэлектроники: Учеб. для техникумов по спец. «Производство изделий электр. техники».— М.: Высш. шк., 1991.— 254с.
5. Корольков В.И., Андреев В.В. Программные и аппаратные средства современной схемотехники и программирование микроконтроллеров: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 243 с.
6. Практикум по радиоэлектронике: Методическое руководство / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013.- 76 с.