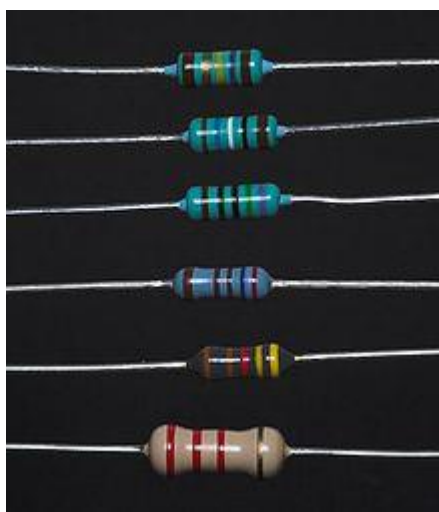


Лекция 2

Резисторы и их применение.

Резистор (англ. resistor, от лат. resisto — сопротивляюсь) — пассивный элемент электрических цепей, обладающий определённым или переменным значением электрического сопротивления[1], предназначенный для линейного преобразования силы тока в напряжение и напряжения в силу тока, ограничения тока, поглощения электрической энергии и др.[2]. Весьма широко используемый компонент практически всех электрических и электронных устройств.

Конструкции современного резистора представлены на фотографии



Шесть резисторов разных номиналов и точности, промаркированные с помощью цветовой схемы

Эквивалентная схема замещения резистора чаще всего имеет вид параллельно соединенных сопротивления и емкости. Иногда на высоких частотах последовательно с этой цепью включают индуктивность. В схеме замещения сопротивление — основной параметр резистора, емкость и индуктивность — паразитные параметры.

Все резисторы делятся на линейные и нелинейные.

Сопротивления линейных резисторов не зависят от приложенного напряжения или протекающего тока.

Сопротивления нелинейных резисторов изменяются в зависимости от значения приложенного напряжения или протекающего тока. Например, сопротивление осветительной лампы накаливания при отсутствии тока в 10-15 раз меньше, чем в режиме освещения. В линейных резистивных цепях форма тока совпадает с формой напряжения, вызвавшего этот ток.

Основные характеристики и параметры резисторов

Номинальное сопротивление — основной параметр.

Предельная рассеиваемая мощность.

Температурный коэффициент сопротивления.

Допустимое отклонение сопротивления от номинального значения (технологический разброс в процессе изготовления).

Предельное рабочее напряжение.

Избыточный шум.

Максимальная температура окружающей среды для номинальной мощности рассеивания.

Влагоустойчивость и термостойкость.

Коэффициент напряжения. Учитывает явление зависимости сопротивления некоторых видов резисторов от приложенного напряжения.

Определяется по формуле: $R=U/I$, где U и I — напряжение, приложенное к резистору, и ток, протекающий через резистор.

Некоторые характеристики существенны при проектировании устройств, работающих на высоких и сверхвысоких частотах, это:

Паразитная ёмкость.

Паразитная индуктивность.

Обозначение резисторов на схемах

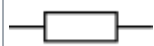
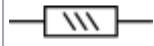
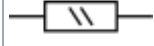
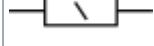
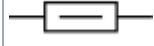
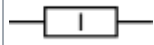
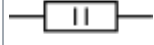
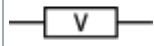


а) обозначение, принятое в России и в Европе

б) принятое в США

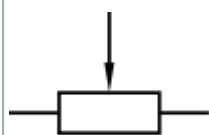
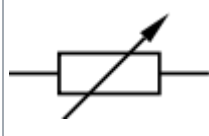
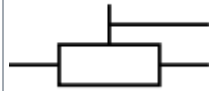
По стандартам России условные графические обозначения резисторов на схемах должны соответствовать ГОСТ 2.728-74. В соответствии с ним, постоянные резисторы обозначаются следующим образом:

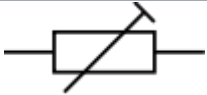
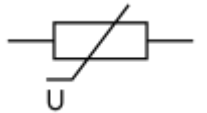
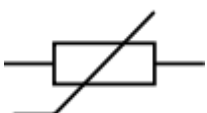

Обозначение
по ГОСТ 2.728-
74 Описание

	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

Переменные, подстроечные и нелинейные резисторы обозначаются следующим образом:

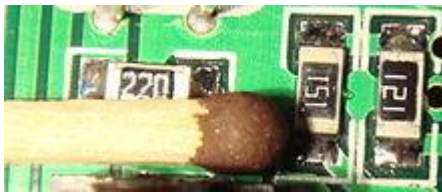
Обозначение
по ГОСТ 2.728-
74 Описание

	Переменный резистор (реостат).
	Переменный резистор, включенный как реостат (ползунок соединён с одним из крайних выводов).
	Подстроечный резистор.

	Подстроечный резистор, включенный как реостат (ползунок соединён с одним из крайних выводов).
	Варистор (сопротивление зависит от приложенного напряжения).
	Термистор (сопротивление зависит от температуры).
	Фоторезистор (сопротивление зависит от освещённости).

Классификация резисторов

На рисунке изображена часть поверхностного монтажа (SMD), с припаянными на печатную плату резисторами. Для того, чтобы иметь представление о размерах резисторов, на рисунке показана часть спички.



Резисторы являются элементами электронной аппаратуры и могут применяться как дискретные компоненты или как составные части интегральных микросхем. Дискретные резисторы классифицируются по назначению, виду вольтамперной характеристики (ВАХ), по способу защиты и по способу монтажа, характеру изменения сопротивления, технологии изготовления.

По **назначению** резисторы делятся на:

резисторы общего назначения;

резисторы специального назначения:

высокоомные (сопротивления от десятка МОм до единиц ТОм, рабочие напряжения 100—400 В);

высоковольтные (рабочие напряжения — десятки кВ);

высокочастотные (имеют малые собственные индуктивности и ёмкости, рабочие частоты до сотен МГц);

прецизионные и сверхпрецизионные (повышенная точность, допуск 0,001 — 1 %).

По **характеру изменения сопротивления** резисторы делятся на:

постоянные резисторы;

переменные регулировочные резисторы;

переменные подстроечные резисторы.



Постоянные
резисторы
(для
навесного
монтажа).



Переменный
резистор.



Подстроечные
резисторы.

Прецизионный
многооборотный
подстроечный резистор.

По **способу защиты от влаги** резисторы могут быть:

незащищенные;

лакированные;

компаундированные;

впрессованные в пластмассу;

герметизированные;

вакуумные.

По **способу монтажа** резисторы предназначены:

для печатного монтажа;

для навесного монтажа;

для микросхем и микромодулей.

По **виду вольтамперной характеристики** различают:

линейные резисторы;

нелинейные резисторы:

варисторы — сопротивление зависит от приложенного напряжения;

терморезисторы — сопротивление зависит от температуры;

фоторезисторы — сопротивление зависит от освещённости;

тензорезисторы — сопротивление зависит от деформации резистора;

магниторезисторы — сопротивление зависит от величины магнитного поля.

мемристоры (разрабатываются) — сопротивление зависит от протекавшего через него заряда (интеграла тока за время работы).

По виду используемых проводящих элементов различают:

Проволочные резисторы. Наматываются из проволоки или ленты с высоким удельным сопротивлением на какой-либо каркас. Обычно имеют значительную паразитную индуктивность. Для снижения паразитной индуктивности почти всегда выполняются с бифилярной намоткой. Высокоомные малогабаритные проволочные резисторы иногда изготавливают из микропровода. Иные типы резисторов называются непроволочными резисторами.

Непроволочные резисторы. Резистивный элемент представляет собой объёмную структуру физического тела или поверхностного слоя, образованного на изоляционных деталях (тонкую плёнку металлического сплава или композитного материала с высоким удельным сопротивлением, низким коэффициентом термического сопротивления, обычно нанесённую на цилиндрический керамический сердечник). Концы сердечника снабжены напрессованными металлическими колпачками с проволочными выводами для монтажа. Иногда, для повышения сопротивления, в плёнке выполняется винтовая канавка для формирования спиральной конфигурации проводящего слоя. Сейчас это наиболее распространённый тип резисторов для монтажа в отверстия печатных плат. По такому же принципу выполнены резисторы в составе гибридной интегральной микросхемы: в виде металлических или композитных плёнок, нанесённых на обычно керамическую подложку методом напыления в вакууме или трафаретной печати.



Плёночный угольный резистор (часть защитного покрытия удалена для демонстрации токопроводящего слоя).

Проволочный резистор с отводом.

По виду применяемых материалов могут быть:

Углеродистые резисторы. Изготавливаются в виде плёночных и объёмных. Плёнки или резистивные тела представляют собой смеси графита с органическими или неорганическими веществами.

Металлопленочные или **металлоокисные** резисторы. В качестве резистивного материала используется тонкая металлическая лента.

Композиционные резисторы.

Проволочные резисторы.

Интегральный резистор - резистивный элемент, слаболегированный полупроводник, формируемый в кристалле микросхемы в виде обычно зигзагообразного канала, изолированного от других цепей микросхемы р-п переходом. Такие резисторы имеют большую нелинейность вольт-амперной характеристики. В основном используются в составе интегральных монокристаллических микросхем, где применить другие типы резисторов принципиально невозможно.

Резисторы, выпускаемые промышленностью

Российская промышленность выпускает резисторы (см. рисунок)



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 % [6]. 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).

Резисторы, выпускаемые промышленностью, характеризуются также определённым значением максимальной рассеиваемой мощности (выпускаются резисторы мощностью 0,125 Вт, 0,25 Вт, 0,5 Вт, 1 Вт, 2 Вт, 5 Вт).

Согласно ГОСТ 24013-80 и ГОСТ 10318-80 советской радиотехнической промышленностью выпускались резисторы следующих номиналов мощностей, в Ваттах: 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. [7]

Маркировка резисторов с проволочными выводами

Резисторы, в особенности малой мощности — мелкие детали, резистор мощностью 0,125 Вт имеет длину несколько миллиметров и диаметр порядка миллиметра. Прочитать на такой детали номинал с десятичной запятой трудно, поэтому при указании номинала вместо десятичной точки пишут букву, соответствующую единицам измерения (К — для килоомов; М — для мегаомов; Е, R или без указания единиц — для единиц Ом). Кроме того, любой номинал отображается максимум тремя символами. Например, 4K7 обозначает резистор сопротивлением 4,7 кОм, 1R0 — 1 Ом, M12 — 120 кОм (0,12 МОм) и т. д. Однако в таком виде наносить номиналы на маленькие резисторы сложно, и для них применяют маркировку цветными полосами.

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 полосы всегда означают первые два знака номинала. Если полосок 3 или 4, третья полоска означает десятичный множитель, то есть степень десятки, которая умножается на число, состоящее из двух цифр, 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 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 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.

Цветовая кодировка резисторов

Цвет	как число	как десятичный множитель	как точность в %	как ТКС в ppm/°C	как % отказов
серебристый	—	$1 \cdot 10^{-2} = \text{«0,01»}$	10	—	—
золотой	—	$1 \cdot 10^{-1} = \text{«0,1»}$	5	—	—
чёрный	0	$1 \cdot 10^0 = 1$	—	—	—
коричневый	1	$1 \cdot 10^1 = \text{«10»}$	1	100	1 %
красный	2	$1 \cdot 10^2 = \text{«100»}$	2	50	0,1 %
оранжевый	3	$1 \cdot 10^3 = \text{«1000»}$	—	15	0,01 %
жёлтый	4	$1 \cdot 10^4 = \text{«10 000»}$	—	25	0,001 %
зелёный	5	$1 \cdot 10^5 = \text{«100 000»}$	0,5	—	—
синий	6	$1 \cdot 10^6 = \text{«1 000 000»}$	0,25	10	—
фиолетовый	7	$1 \cdot 10^7 = \text{«10 000 000»}$	0,1	5	—
серый	8	$1 \cdot 10^8 = \text{«100 000 000»}$	0,05	—	—
белый	9	$1 \cdot 10^9 = \text{«1 000 000 000»}$	—	1	—

отсутствует	—	—	20 %	—	—
-------------	---	---	------	---	---

Пример

Допустим, на резисторе имеются четыре полосы: коричневая, чёрная, красная и золотая. Первые две полосы дают 1 0, третья 100, четвёртая даёт точность 5 %, итого — резистор сопротивлением $10 \cdot 100 \text{ Ом} = 1 \text{ кОм}$, с точностью $\pm 5 \%$.

Запомнить цветную кодировку резисторов нетрудно: после чёрной 0 и коричневой 1 идёт последовательность цветов радуги. Так как маркировка была придумана в англоязычных странах, голубой и синий цвета не различаются.

Также для облегчения запоминания можно воспользоваться мнемоническим правилом: «Часто Каждый Красный Охотник Желает Знать, Сколько Фазанов Село в Болоте».

Для облегчения различные разработчики программного обеспечения создают программы, которые определяют сопротивление резистора.

Поскольку резистор — симметричная деталь, может возникнуть вопрос: «Начиная с какой стороны читать полосы?» 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 полосками первой является полоска, нанесённая ближе к краю; обычно она находится на металлическом стаканчике вывода, а остальные три — на более узком керамическом теле резистора). В резисторах Panasonic с пятью полосами резистор располагается так, чтобы отдельно стоящая полоска была справа, при этом первые 2 полосы определяют первые два знака, третья полоса — степень множителя, четвёртая полоса — допуск, пятая полоса — область применения резистора. Особый случай использования цветовой маркировки резисторов — перемычки нулевого сопротивления. Они обозначаются одной чёрной (0) полоской по центру (использование таких резистороподобных перемычек вместо дешёвых кусков проволоки объясняется желанием производителей сократить расходы на перенастройку сборочных автоматов).

Маркировка SMD-резисторов

«Резисторы» нулевого сопротивления (перемычки на плате) кодируются одной цифрой «0» или тремя («000»). Иногда нули имеют прямоугольную форму.

Кодирование 3 или 4 цифрами

ABC обозначает $AB \cdot 10^C$ Ом

например 102 — это $10 \cdot 10^2$ Ом = 1 кОм

ABCD обозначает $ABC \cdot 10^D$ Ом, точность 1 % (ряд E96)

например 1002 — это $100 \cdot 10^2$ Ом = 10 кОм

1кОм=1000Ом

Кодирование цифра-цифра-буква (JIS-C-5201)

Ряд E96, точность 1 %.

Мантисса m значения сопротивления кодируется 2 цифрами (см. таблицу), степень при 10 кодируется буквой.

Примеры: 09R = 12,1 Ом; 80E = 6,65 МОм; все 1 %.

S или Y = 10^{-2}

R или X = 10^{-1}

A = $10^0 = 1$

B = 10^1

C = 10^2

D = 10^3

E = 10^4

F = 10^5

код m	код m	код m	код m	код m	код m
-------	-------	-------	-------	-------	-------

01	100	17	147	33	215	49	316	65	464	81	681
----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----

02	102	18	150	34	221	50	324	66	475	82	698
----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----

03	105	19	154	35	226	51	332	67	487	83	715
----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----

04	107	20	158	36	232	52	340	68	499	84	732
05	110	21	162	37	237	53	348	69	511	85	750
06	113	22	165	38	243	54	357	70	523	86	768
07	115	23	169	39	249	55	365	71	536	87	787
08	118	24	174	40	255	56	374	72	549	88	806
09	121	25	178	41	261	57	383	73	562	89	825
10	124	26	182	42	267	58	392	74	576	90	845
11	127	27	187	43	274	59	402	75	590	91	866
12	130	28	191	44	280	60	412	76	604	92	887
13	133	29	196	45	287	61	422	77	619	93	909
14	137	30	200	46	294	62	432	78	634	94	931
15	140	31	205	47	301	63	442	79	649	95	953
16	143	32	210	48	309	64	453	80	665	96	976

Кодирование буква-цифра-цифра

Ряды E24 и E12, точность 2 %, 5 % и 10 %. (Ряд E48 не используется).

Степень при 10 кодируется буквой (так же, как для 1%-х сопротивлений, см. список выше), мантисса m значения сопротивления и точность кодируются 2 цифрами (см. таблицу).

Примеры:

2 %, 1,00 Ом = S01

5 %, 1,00 Ом = S25

5 %, 510 Ом = A42

10 %, 1,00 Ом = S49

10 %, 820 кОм = D60

2 % 5 % 10 %

код m код m код m

01 100 25 100 49 $\frac{10}{0}$

02 110 26 110 50 $\frac{12}{0}$

03 120 27 120 51 $\frac{15}{0}$

04 130 28 130 52 $\frac{18}{0}$

05 150 29 150 53 $\frac{22}{0}$

06 160 30 160 54 $\frac{27}{0}$

07 180 31 180 55 $\frac{33}{0}$

08 200 32 200 56 $\frac{39}{0}$

09 220 33 220 57 $\frac{47}{0}$

10 240 34 240 58 $\frac{56}{0}$

11 270 35 270 59 $\frac{68}{0}$

12 300 36 300 60 $\frac{82}{0}$

13 330 37 330

14 360 38 360

15 390 39 390

16 430 40 430

17 470 41 470

18 510 42 510

19 560 43 560

20 620 44 620

21 680 45 680

22 750 46 750

23 820 47 820

24 910 48 910

Некоторые дополнительные свойства резисторов

Зависимость сопротивления от температуры



Лабораторный резистор

Сопротивление металлических и проволочных резисторов немного зависит от температуры. При этом зависимость сопротивления от температуры практически линейная $R = R_0 (1 + \alpha (t - t_0))$ $\{\displaystyle R=R_{0}(1+\alpha (t-t_{0}))\}$ $R=\alpha RT_0$. Коэффициент α $\{\displaystyle \alpha\}$ αR называют температурным коэффициентом сопротивления. Такая зависимость сопротивления от температуры позволяет использовать резисторы в качестве термометров. Сопротивление полупроводниковых резисторов (терморезисторов) может зависеть от температуры сильнее, возможно, даже экспоненциально по закону Аррениуса, однако в практическом диапазоне температур и эту экспоненциальную зависимость можно заменить линейной.

Шум резисторов

При температуре выше абсолютного нуля даже идеальный резистор является источником шума. Это следует из фундаментальной флуктуационно-диссипационной теоремы (в применении к электрическим цепям это утверждение известно также как теорема Найквиста). При частоте, существенно меньшей, чем $f_{\text{гр}}$, где $f_{\text{гр}} = kT/h$ — граничная частота, равная несколько десятков ГГц, (где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура резистора в кельвинах, h — спектр теплового шума равномерный, равный $4kT/R$ («белый шум»). Эффективное напряжение шума $U_{\omega}^2 = 4RkT \Delta f$

, где $U_{\omega}^2 = \int dt \langle U(t)U(0) \rangle e^{i\omega t}$ — шумовая полоса частот. Видно, что чем больше сопротивление, тем больше эффективное напряжение шума, также, эффективное напряжение шума пропорционально корню из температуры.

Даже при абсолютном нуле температур у резисторов, составленных из квантовых точечных контактов, будет иметься шум, обусловленный Ферми-статистикой. Его можно устранить путём последовательного и параллельного включения нескольких контактов.

Уровень шума реальных резисторов выше. В шуме реальных резисторов также всегда присутствует компонент, интенсивность которого пропорциональна обратной частоте, то есть $1/f$ -шум или «розовый шум». Этот шум возникает из-за множества причин, одна из главных — перезарядка ионов примесей, на которых локализованы электроны.

Шумы резисторов возникают за счёт прохождения в них тока. В переменных резисторах имеются так называемые «механические» шумы, возникающие при работе подвижных контактов.