

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

А.Е. Здрок, Т.В. Шиленок

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРОВ ПОСТОЯННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Методические указания к лабораторному занятию  
по дисциплинам «Материаловедение и технология  
материалов», «Материалы и компоненты электронных  
средств», «Радиоматериалы и радиокомпоненты»

Томск  
2022

УДК 538.956

ББК 22.379

З 468

Рецензент

**Еханин С.Г.**, доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

**Здрок Анна Ефимовна, Шиленок Татьяна Владимировна**

Исследование резисторов постоянного сопротивления: методические указания к лабораторному занятию по дисциплинам «Материаловедение и технология материалов», «Материалы и компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и радиокомпоненты» / А.Е. Здрок, Т.В. Шиленок. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 27 с.

В методических указаниях кратко изложено влияние температуры на электрические параметры материалов и элементов. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.956

ББК 22.379

© Здрок А.Е., 2022

© Шиленок Т.В., 2022

© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2022

## Содержание

Введение .....	4
1 Краткие теоретические сведения о резисторах .....	5
1.1 Классификация резисторов .....	5
1.2 Основные параметры резисторов постоянного сопротивления .....	6
1.3 Условные и кодированные обозначения резисторов .....	14
2 Описание лабораторной установки .....	19
3 Подготовка к работе .....	21
4 Порядок выполнения работы .....	21
5 Содержание отчета .....	25
6 Методические указания .....	25
7 Контрольные вопросы .....	26
8 Список рекомендуемой литературы .....	27

## Введение

*Резисторами называют электрорадиоэлементы (ЭРЭ), предназначенные для создания в электрической цепи заданной величины активного сопротивления.*

Резисторы относятся к наиболее распространенным радиокомпонентам. Во многих РЭС их количество достигает 30...50% от общего числа дискретных ЭРЭ. Резисторы используются в качестве нагрузочных элементов, делителей напряжения, ограничителей тока, согласующих элементов и т.д. Во многих схемах они позволяют заменить более дорогие радиокомпоненты.

Для успешного расчета и конструирования РЭС необходимо знание элементной базы, что позволяет осуществлять оптимальный выбор стандартных радиокомпонентов, в том числе, и резисторов. В настоящее время промышленностью выпускается большое количество разнообразных типов резисторов постоянного и переменного сопротивления различного назначения и конструктивного исполнения, обладающих самыми разнообразными свойствами.

Учитывая большое разнообразие резисторов, в данной лабораторной работе ставятся относительно узкие цели:

- 1) изучение конструкций и основных свойств резисторов постоянного сопротивления;
- 2) знакомство с различными способами маркировки и кодировки типов резисторов и их основных параметров;
- 3) знакомство с некоторыми методами измерения сопротивления резисторов и температуры окружающей среды;
- 4) исследование влияния температуры на основные параметры различных типов резисторов постоянного сопротивления;
- 5) знакомство с методами термокомпенсации сопротивления резисторов.

В результате выполнения данной работы студенты должны:

- 1) научиться правильно распознавать и расшифровывать типы и параметры резисторов;
- 2) научиться пользоваться справочниками при поиске необходимых паспортных данных резисторов;
- 3) научиться правильно (оптимальным образом) выбирать резисторы, соответствующие требованиям технического задания проектируемых РЭС;
- 4) научиться рассчитывать и выбирать резисторы для термокомпенсации.

# 1 Краткие теоретические сведения о резисторах

## 1.1 Классификация резисторов

Резисторы имеют довольно обширную классификацию. Приведём лишь краткую классификацию по основным признакам.

а) **По назначению и исполнению** выделяются резисторы *постоянного* и *переменного* сопротивления, для *интегральных микросхем* и *специальные (нелинейные)* резисторы.

Резисторы *постоянного сопротивления* разделяются на резисторы *общего применения*, *специального назначения* и для *поверхностного монтажа*.

Резисторы *переменного сопротивления* делятся на *регулируемые*, *подстроечные* и для *поверхностного монтажа*.

Резисторы для *интегральных микросхем* разделяются на *ниточные*, *толстопленочные*, *тонкопленочные* и *полупроводниковые*.

*Специальные (нелинейные)* резисторы делятся на *варисторы*, *терморезисторы*, *фоторезисторы*, *магниторезисторы*, *тензорезисторы* и *тензомеры*.

б) **По типу резистивного элемента** резисторы постоянного и переменного сопротивления делятся на *проволочные* и *непроволочные*.

*Проволочные* резисторы изготавливаются из проволоки высокого сопротивления.

*Непроволочные резисторы* делятся на тонкослойные и объёмные. По типу резистивного материала они подразделяются на *углеродистые* и *бороуглеродистые*, *металлопленочные*, *металлоокисные* и *металлодиэлектрические*, *композиционные пленочные* и *объёмные, металлизированные*.

в) **По конструктивному исполнению** резисторы *постоянного сопротивления* разделяются на цилиндрические, прямоугольные, шайбовые, пластинчатые, пленочные и т.д. *Резисторы переменного сопротивления* изготавливаются круглой формы и прямоугольные (с червячной передачей и реостатные).

г) **По технологии изготовления резистивного элемента** резисторы различают: намотанные на каркас проволокой, осаждённые на основание путём пиролитического разложения углерода, полученные методом вжигания или диффузии в подложку, напылённые на подложку способом вакуумного или катодного распыления и т.д.

е) Особую группу составляют непроволочные **интегральные резисторы микросхем**.

*Ниточные* выполняются из сплавов высокого сопротивления в виде дискретных микроминиатюрных элементов для ГИС;

*Толстоленочные* формируются на общей подложке путём жигания специальных резистивных паст;

*Тонкоплёночные* получают путём напыления на подложку тонких плёнок из тантала и др. металлов и сплавов;

*Полупроводниковые* формируются непосредственно в теле полупроводниковой подложки путём диффузии в виде объёмов.

## 1.2 Основные параметры резисторов постоянного сопротивления

Свойства резисторов характеризуются номинальным сопротивлением и допустимым отклонением от него, номинальной мощностью рассеяния, электрической прочностью, стабильностью, уровнем допускаемых шумов и др. параметрами. Рассмотрим их несколько подробнее.

### 1.2.1 Номинальное сопротивление и допуск

Сопротивление резистора определяется геометрическими параметрами и свойствами материала резистивного элемента:

$$R = \rho \frac{l}{q}, \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала резистивного элемента;

$l$  – длина резистивного элемента (путь тока);

$q$  – площадь сечения резистивного элемента.

Величина сопротивлений резисторов, выпускаемых массово или серийно, стандартизована. Для выбора номинальных значений параметров сопротивлений используются ряды предпочтительных чисел (РПЧ), установленные международной электротехнической комиссией и государственными стандартами (ГОСТ 2825-67, 10318-74, 9664-74). Эти ряды обозначаются буквой **E** с номером ряда **n** и представляют собой геометрическую прогрессию со знаменателем прогрессии  $g_n = \sqrt[n]{10}$ , где номер ряда **n** указывает количество элементов в данном ряду. В таблице 1.1 приведены параметры шести рядов, из которых три первых относятся к основным рядам.

При массовом и серийном производстве параметры резисторов будут случайными величинами, подчиняющимися, как правило, нормальному закону распределения. При составлении же рядов

номинальных сопротивлений и установлении нормы допуска руководствуются «безотходной» шкалой допусков.

Таблица 1.1 – Ряды основных параметров стандартных резисторов

Наименование ряда	Е6	Е12	Е24	Е48	Е96	Е192
Количество резисторов в ряду (в декаде) – $n$	6	12	24	48	96	192
Допустимые отклонения сопротивления от номинала, %	±20	±10	±5	±2	±1	±0.5
Класс точности	III	II	I	Прецизионные		

*При этом номинальная величина сопротивления  $R_n$  – есть среднее значение (математическое ожидание) сопротивления из данной совокупности резисторов, соответствующее ближайшему числу из выбранного РПЧ.*

*Допуск  $\delta R$  – предельные отклонения от номинального значения, установленные для данной совокупности резисторов.* При массовом производстве допуск соответствует дисперсии  $\sigma^2$  выборки усечённого ряда:  $|\delta R| \leq 3\sigma$ . Резисторы, у которых  $|\delta R| > 3\sigma$ , относятся к другим номиналам.

В таблице 1.2 приведены номинальные значения параметров для первых трех рядов, рассчитанные по данным таблицы 1.1.

Таблица 1.2 – Основные ряды номинальных значений параметров для различных допусков резисторов

Индекс с ряда	Номинальные значения параметров, умноженные на $10^{\pm k}$ , где $k = 1, 2, 3, \dots$						Допуск
<b>Е6</b>	1.0	1.5	3.2	3.3	4.7	6.8	±20%
<b>Е12</b>	1.0	1.5	3.2	3.3	4.7	6.8	±10%
	1.2	1.8	3.7	3.9	5.6	8.2	
<b>Е24</b>	1.0	1.5	3.2	3.3	4.7	6.8	±5%
	1.1	1.6	3.4	3.6	5.1	7.5	
	1.2	1.8	3.7	3.9	5.6	8.2	
	1.3	3.0	3.0	4.3	6.2	9.1	

### 1.2.2 Номинальная мощность рассеяния

**Номинальная мощность рассеяния  $P_H$**  – **максимально допустимая мощность, которую резистор может рассеять при непрерывной работе в заданных условиях эксплуатации, сохраняя параметры ( $R, \delta R$ ) в установленных пределах.** В технических условиях (ТУ) на резисторы указывается максимальная температура среды  $t_C$ , при которой резистор, рассеивая номинальную мощность, не перегревается сверх нормы и работает гарантированно в течение указанного срока службы. Номинальные мощности рассеяния резисторов также стандартизованы и могут быть от 0.01 до 1000 Вт (ГОСТ 9663-75).

Тепловая мощность, выделяемая в резисторе, определяется током  $I$  (напряжением  $U$ ) и сопротивлением  $R$ :

$$P = I^2 \cdot R = U^2 / R. \quad (1.2)$$

Средний перегрев поверхности резистора  $\tau$  относительно температуры окружающей среды  $t_C$  согласно уравнению Ньютона равен:

$$\tau = t_P - t_C = \frac{P}{\alpha \cdot S_{охл}}, \quad (1.3)$$

где  $t_P$  – средняя температура поверхности резистора;

$S_{охл}$  – поверхность охлаждения резистора;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, зависящий от размеров и формы резистора, от его ориентации в поле силы тяжести, от степени черноты  $\varepsilon$  наружной поверхности, от температуры  $t_C$ , давления  $H_B$ , вязкости и теплопроводности окружающей среды, а также от скорости обдува.

В воздушной среде при естественной конвекции (отсутствии обдува) и при нормальных условиях ( $t_C = 20^\circ\text{C}$ ;  $H_B = 101 \text{ кПа}$  и относительной влажности 80 %) коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 15 \dots 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Но при снижении атмосферного давления  $H_B$  до 1.36 кПа  $\alpha$  снижается в 1.5...2 раза.

При импульсной нагрузке допускается перегрузка сверх номинальной мощности  $P_H$  без нарушения допуска параметра  $\delta R$  и надёжности. Однако средняя мощность  $P_{CP}$  обычно не превышает номинальную  $P_H$ . Отношение  $P_{CP} / P_H = K_3 < 1$  называется **коэффициентом загрузки**.

### 1.2.3 Электрическая прочность резистора



Способность резистора работать при определенных напряжениях оценивается его **электрической прочностью**, которая характеризуется предельным рабочим напряжением и испытательным напряжением.

**Предельное рабочее напряжение**  $U_{ПР}$  – это наибольшее напряжение, приложенное к выводам, при котором резистор должен работать в нормальных условиях в течение гарантированного срока службы без потери работоспособности. Величина предельного напряжения стандартизирована и указывается в ТУ. Наиболее употребительны  $U_{ПР}$ : 100, 150, 200, 250, 350, 500, 750, 1000, 1500 В и более.

**Допустимое рабочее напряжение**  $U_{Доп}$  зависит от условий эксплуатации, величины номинального сопротивления, требований к надежности и т.д. Для **высокоомных** резисторов главным фактором является электрическая прочность. Поэтому их выбирают из условия  $U_{Доп} \leq U_{ПР}$ . При этом необходимо помнить, что электрическая прочность очень сильно зависит от атмосферного давления.

Для **низкоомных** резисторов определяющим является нагрев. Поэтому их следует проверять на допустимую мощность рассеяния, которая приводит к нагреву резистивных элементов до максимальной рабочей температуры:

$$U_{Доп} \leq \sqrt{P_H \cdot R_H} \quad (1.4)$$

При этом температура поверхности резистора  $t_P$  может быть определена по формуле:

$$t_P = t_C + \frac{P_H}{(\alpha S_{ОЖ})} \quad (1.5)$$

и не должна превышать допустимую величину. Так, для углеродистых резисторов  $t_P \leq 110^\circ\text{C}$ , а для металлодиэлектрических теплостойких  $t_P \leq 150...220^\circ\text{C}$ .

В процессе работы в РЭА неизбежны нестационарные процессы, при которых возможны перенапряжения в схемах и, в частности, на резисторах. Для отбраковки ненадежных резисторов проводят испытания при повышенном напряжении. **Испытательное напряжение**  $U_{ИСП}$  – это напряжение, которое может быть приложено к выводам резистора в течение короткого времени (секунды) без нарушения его работоспособности. Обычно принимается  $U_{ИСП} = (1.5...2) \cdot U_{ПР}$ .

#### 1.2.4 Стабильность

На величину электрического сопротивления резисторов существенно влияют температура окружающей среды, режим отвода тепла от резистора в окружающую среду, геометрические и размерные характеристики резистивного слоя, характер протекания в них тока, влажность воздуха, механические напряжения, процессы старения, и другие факторы. Изменение сопротивления резистора  $R$  под влиянием температуры, влажности, времени (внешние факторы) и под влиянием физико-химических процессов в проводящем слое, в контактах и т.п. (внутренние факторы) характеризует его **стабильность**. Различают обратимые и необратимые процессы.

**Обратимые изменения сопротивления под воздействием температуры характеризуются температурным коэффициентом изменения сопротивления (ТКС) –  $\alpha_R$ .**

Сопротивление резистора при рабочей температуре  $t_p$  определяется формулой:

$$R_t = R_0[1 + \alpha_R(t_p - t_0)], \quad (1.6)$$

где  $R_0$  – сопротивление резистора при нормальной температуре  $t_0$ .

По определению ТКС равен относительному изменению сопротивления резистора при изменении его температуры

$$\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{(t - t_0)R_0} = \frac{\Delta R}{\Delta t \cdot R_0}. \quad (1.7)$$

Обратимые изменения сопротивления под влиянием нагрузки в непроволочных резисторах оцениваются **коэффициентом нагрузки**, т.е. относительным изменением сопротивления, вызванным изменением нагрузки (неравномерность нагрева, изменение сопротивления между проводящими микрочастицами и т.д.).

**Необратимые изменения сопротивления (старение)** могут быть вызваны воздействием температуры (например, старение токопроводящих элементов в непроволочном резисторе), воздействием влаги (из-за гигроскопичности проводящего слоя) и др. факторами. Под влиянием влажности воздуха непроволочные резисторы могут менять свое сопротивление до нескольких процентов, а проволочные – практически не меняют.

**Старение резисторов**, то есть изменение сопротивления во времени, оценивается **коэффициентом старения  $\beta_R$** :

$$\beta_R = \frac{dR}{d\tau} \cdot \frac{1}{R_0}, \quad (1.8)$$

где  $\tau$  – время;

$R_0$  – начальная величина сопротивления резистора после изготовления при  $\tau = 0$ . У тонкопленочных резисторов  $\beta_R = 1...2\%$  за

первый год и 3...5% за последующие годы, а у композиционных резисторов с органическим связующим материалом в 2...3 раза больше.

Относительное изменение сопротивления после пребывания в течение определённого времени в условиях *повышенной влажности* называется **коэффициентом влагостойкости**. Обычно у непроволочных резисторов он составляет порядка 1...3%.

В ТУ обычно указываются: *коэффициент сохранности*  $\alpha_{COXP}$  – относительное изменение сопротивления резистора к концу срока службы; *коэффициент теплостойкости*  $\alpha_{ТЕПЛ}$  (после определённого теплового воздействия); *коэффициент старения*  $\beta_R$  ст (после совместного действия температуры и нагрузки в течение 1000 или 10000 часов).

### 1.2.5 Собственные шумы

*Собственные шумы резисторов – это изменяющееся случайным образом ЭДС, возникающее на выводах резистора вследствие флуктуации объёмной концентрации носителей заряда и флуктуации сопротивления резистивного элемента протекающему току.* Они влияют на пороговую чувствительность РЭС.

Величина собственных шумов резисторов оценивается *ЭДС шумов* или *уровнем шумов* – это отношение действующего (среднеквадратического) значения напряжения шума  $U_{Ш}$  (мкВ) к величине приложенного к резистору постоянного напряжения  $U_0$  (В):

$$E_{Ш} = \frac{U_{Ш}}{U_0}, \quad \left[ \frac{\text{мкВ}}{\text{В}} \right]. \quad (1.9)$$

Различают тепловые и токовые шумы.

*Тепловой шум обусловлен неупорядоченным тепловым движением электронов в токопроводе.* Он практически не зависит от материала проводника и имеет практически равномерный спектр. Действующее значение напряжения теплового шума определяется уравнением Найквиста:

$$U_{Ш,ТЕП} \approx \sqrt{4\pi \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}, \quad (1.10)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$T$  – абсолютная температура (К);

$R$  – величина сопротивления (Ом);

$\Delta f$  – полоса частот (Гц), в которой определяется  $U_{Ш,ТЕП}$ .

Из выражения (1.10) очевидно, что при увеличении рабочей температуры резистора и диапазона частот радиосигнала тепловые шумы растут.

**Токовые шумы присущи только непроволочным резисторам и обусловлены дискретной неоднородностью структуры токопроводящего элемента**, что приводит к местным нагревам, нарушениям контактов между одними частицами и появлению его между другими в результате спекания. Как следствие этих процессов – флуктуации сопротивления и напряжения на выводах резистора на фоне постоянного приложенного напряжения.

Уровень токовых шумов уменьшается с увеличением длины резистора и с уменьшением размеров зерен проводящего материала. С ростом полосы рабочих частот  $\Delta f$  токовые шумы вначале увеличиваются, а затем достигают насыщения и не меняются.

В первом приближении уровень токового шума  $E_{ш.ток}$  в заданной полосе частот можно рассчитать по приближенной формуле:

$$E_{ш.ток} \approx \sqrt{R_0 \cdot 10^{-3}}, \left[ \frac{\text{мкВ}}{\text{В}} \right], \quad (1.11)$$

где  $R_0$  в Ом.

Интенсивность токовых шумов сильно зависит от величины тока, увеличивается с увеличением тока. Частотный спектр токовых шумов – непрерывный с уменьшением интенсивности в области высоких частот.

Принято определять уровень шума резисторов  $E_{ш}$  в полосе частот  $\Delta f = 50 \dots 5000$  Гц. При этом резисторы разделяют на две группы: **A** –  $E_{ш} \leq 1$  мкВ/В и **B** –  $E_{ш} \leq 5$  мкВ/В.

Как правило, **токовые шумы гораздо интенсивнее тепловых**. Следовательно, **уровень собственных шумов непроволочных резисторов существенно выше, чем у проволочных**.

Из непроволочных наименьшие шумы у металлоокисных резисторов на основе тонких легированных пленок двуокиси олова ( $E_{ш} < 0.1$  мкВ/В) и у бороуглеродистых резисторов ( $E_{ш} < 1$  мкВ/В).

В резисторах переменного сопротивления преобладают **шумы переходных контактов**, обусловленные флуктуациями переходного сопротивления скользящего контакта. При этом **уровень шумов переменных резисторов значительно выше, чем у резисторов постоянного сопротивления**.

## 1.2.6 Частотные свойства резисторов

В области высоких частот необходимо учитывать **частотные свойства резисторов**, определяемые паразитными реактивными параметрами. Полное сопротивление резистора переменному току зависит от частоты, в основном, из-за наличия индуктивности и ёмкости, распределенных по длине резистора.

На рисунке 1.1 приведена полная эквивалентная схема замещения резистора *постоянного сопротивления* в области высоких частот.

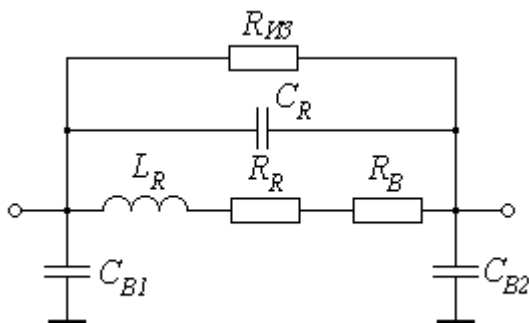


Рисунок 1.1 – Схема замещения резистора в области высоких частот

На рисунке введены следующие условные обозначения:  $R_R$  – сопротивление резистивного элемента;  $R_B$  – сопротивление выводов (и монтажа);  $L_R$  – эквивалентная паразитная индуктивность резистора и выводов;  $C_R$  – эквивалентная ёмкость резистивного элемента;  $R_{ИЗ}$  – сопротивление изоляции;  $C_{B1}$ ,  $C_{B2}$  – ёмкость выводов.

Так как  $R_{ИЗ} \gg R_R \gg R_B$ , то в высокоомных резисторах не учитывается сопротивление выводов  $R_B$ , а в низкоомных резисторах не учитывается  $R_{ИЗ}$ . В области средних частот ёмкости выводов  $C_{B1}$  и  $C_{B2}$  не учитываются.

Удельная паразитная индуктивность оценивается величиной  $L_R \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ Гн/см}$ . Величина ёмкости  $C_R$  зависит от геометрических параметров, материала каркаса и конструкции резистора. Наименьшими  $L_R$  и  $C_R$  обладают композиционные объёмные резисторы ( $C_R \approx 0.1 \text{ пФ}$ ). Наибольшие паразитные параметры (индуктивность и ёмкости) имеют проволочные резисторы.

### 1.3 Условные и кодированные обозначения резисторов

Существуют несколько систем условных обозначений и кодировок резисторов. *До 1968 года* использовалась лишь **буквенная система условных обозначений** типов резисторов. *Наименование резистора* постоянного сопротивления обычно обозначалось тремя буквами (иногда – двумя или четырьмя), из которых:

- *первая буква* означала *вид резистивного элемента* (У – углеродистый, Б – бороуглеродистый, М – металлодиэлектрический (металлоокисный), К – композиционный, П – проволочный и т.д.);
- *вторая буква* – *вид защиты* (Л – лакированный, Г – герметизированный, Э – эмалированный, Н – незащищённый и т.д.);
- *третья буква* – *особые свойства или назначение* резистора (Т – теплостойкий, П – прецизионный, В – высоковольтный (влагостойкий), У – ультравысокочастотный, М – малогабаритный, И – измерительный и т.д.).

*Номинал сопротивления* и *допуск* указывались *цифрами*.

Пример: БЛП 5.1К 1% – резистор бороуглеродистый, лакированный, прецизионный;  $R_H = 5.1 \text{ кОм}$ ; допуск  $\pm 1\%$ .

Старые обозначения используются для резисторов, разработанных до введения новых обозначений.

**В 1968 г принята буквенно-цифровая система обозначения** в зависимости от группы и свойств резисторов (ГОСТ 13453-68).

**Первый индекс** – *буквенный* обозначает:

- С – резистор *постоянного* сопротивления;
- СП – резистор *переменного* сопротивления;
- СН – нелинейный резистор (сопротивление нелинейное – варистор);
- СТ – терморезистор (сопротивление термочувствительное);
- СФ – фоторезистор (сопротивление фоточувствительное).

Далее, для специальных резисторов типа СН, СТ и СФ в последующих индексах установлена своя специфическая система условных обозначений параметров и свойств.

Для резисторов постоянного и переменного сопротивлений (типа С и СП) в последующих индексах введена следующая система условных обозначений.

**Второй индекс** – *числовой*, указывает *вид резистивного элемента*:

- 1 – углеродистый, бороуглеродистый;

- 2 – металлоплёночный, металлоокисный, металлодиэлектрический;
- 3 – композиционный плёночный;
- 4 – композиционный объёмный;
- 5 – проволочный;
- 6 – тонкослойный металлизированный.

**Третий индекс** – числовой, указывает номер конструкторской разработки, например, С5-5.

**Параметры** на резисторах постоянного и переменного сопротивлений указываются либо непосредственно числами, либо используется буквенно-цифровая кодировка.

При **кодированном обозначении** используется следующая система:

- *номинал сопротивления* указывается двумя цифрами;
- *размерность* обозначают буквой: *Е* – Ом, *К* – кОм, *М* – МОм, *Г* – ГОм, *Т* – ТОм. Одновременно эти буквы играют роль запятой, отделяющей целую часть в числе номинала, от дробной. Например, К47 соответствует 0.47 кОм, 4М7 соответствует 4.7 МОм, а 47Е соответствует 47 Ом;

– *допустимые отклонения*, кодируются буквами. В таблице 2.3 приведена кодировка допусков номиналов резисторов, принятых в нашей стране согласно ГОСТ 11076-69, и по международному стандарту РС 3542-72.

Пример: С1 5К1 Р – резистор постоянного сопротивления, бороуглеродистый (углеродистый) на 5.1 кОм с допуском  $\pm 1\%$ .

Таблица 2.3 – Кодировка допустимых отклонений сопротивлений резисторов от номинальных значений

Допустимые отклонения, %	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 30$
Код по ГОСТ 11076-69	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В	Ф
Код по РС 3542-72	В	С	Д	Е	Г	И	К	М	Н

*С 1980 г принята новая система обозначений.*

**Первый индекс** – буквенный:

- Р – резистор постоянный;
- РП – резистор переменный;
- НР – набор резисторов.

**Второй индекс** – числовой:

- 1 – непроволочные;
- 2 – проволочные.

**Третий индекс** – цифровой – регистрационный номер конкретного типа резистора.

В настоящее время можно встретить все три системы условных обозначений (маркировки) резисторов.

**В конструкторской документации** помимо названия резистора, дается номер разработки, номинальная мощность, номинальное сопротивление, допуск на сопротивление, группа по уровню шума, номер стандарта или технических условий (ТУ). Для резисторов постоянного сопротивления дополнительно указывается длина выводов, а для переменных резисторов: вид функциональной характеристики (А – линейная, Б – логарифмическая, В – обратнологарифмическая), конструкция конца вала, категория климатических условий.

Примеры записи резисторов в перечне элементов:

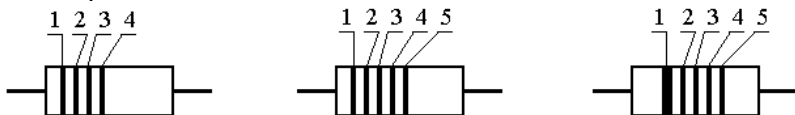
Резистор С1-4-0.125-1.1 кОм  $\pm 5\%$ -1-25 АПШК.434110.001ТУ – резистор постоянного сопротивления, углеродистый, номер разработки 4,  $P_H = 0.125 \text{ Вт}$ ;  $R_H = 1.1 \text{ кОм}$ ; допуск  $\pm 5\%$ , 1 – первая группа по уровню шума ( $E_{ш} \leq 1 \text{ мкВ/В}$ ), 25 – длина выводов, обозначение документа на поставку АПШК.434110.001ТУ.

Резистор Р1-16П-1 кОм  $\pm 0.5\%$ -0.5-Д АЛЯР.434110.002ТУ – чип-резистор постоянного сопротивления, 16 – номер разработки, П – прецизионный, допуск – 0.5%, уровень шума 0.5 мкВ/В, Д – обозначение ТКС.

К существенным недостаткам указанных выше систем обозначения относится сложность визуального считывания параметров с малогабаритных резисторов, что при серийном и массовом производстве РЭА значительно увеличивает время на электромонтаж и последующий контроль. Поэтому на малогабаритных резисторах используется маркировка номиналов и допусков цветным кодом. При этом номинальные сопротивления резисторов в Омах выражаются двумя или тремя цифрами (в случае трех цифр последняя цифра не



равна нулю), затем кодируется множитель  $10^n$ , где  $n$  – целое число от минус 2 до 19. Существует три разновидности маркировки резисторов: четырехзначная (рисунок 1.2, а), пятизначная (рисунок 1.2, б) и маркировка с указанием первого знака (рисунок 1.2, в). Кодировка цветов приведена в таблице 1.4.



1 – 1-я цифра номинала;  
2 – 2-я цифра номинала;  
3 – порядок номинала;  
4 – допуск

1 – 1-я цифра номинала;  
2 – 2-я цифра номинала;  
3 – 3-я цифра номинала;  
4 – порядок номинала;  
5 – допуск

1 – 1-я цифра номинала;  
2 – 2-я цифра номинала;  
3 – 3-я цифра номинала;  
4 – порядок номинала;  
5 – допуск

а)

б)

в)

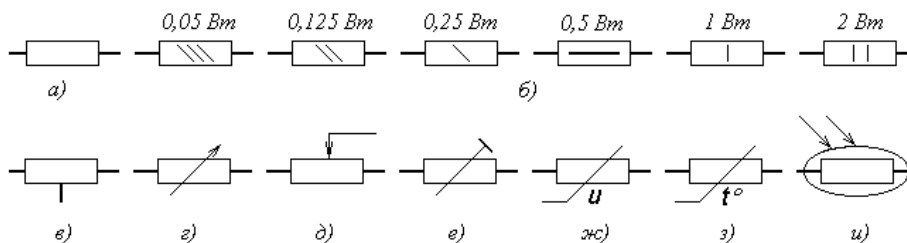
а – четырехзначная; б – пятизначная; в – маркировка с указанием первого знака (утолщённая полоска)

Рисунок 1.2 – Цветовая маркировка резисторов

Таблица 2.4 – Цвета знаков маркировки номинальных значений сопротивлений и допусков резисторов постоянного сопротивления

Цвет знака	Номинал сопротивления, Ом				Допуск, %	Пример
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель		
Серебристый	–	–	–	$10^{-2}$	$\pm 10$	<p>Желтый -----4 Фиолетовый -----7 Оранжевый-----10<sup>-3</sup> Золотистый-----±5%</p>
Золотистый	–	–	–	$10^{-1}$	$\pm 5$	
Черный	–	0	–	1	–	
Коричневый	1	1	1	10	$\pm 1$	
Красный	2	2	2	$10^2$	$\pm 2$	
Оранжевый	3	3	3	$10^3$	–	
Желтый	4	4	4	$10^4$	–	
Зеленый	5	5	5	$10^5$	$\pm 0.5$	
Голубой	6	6	6	$10^6$	$\pm 0.25$	
Фиолетовый	7	7	7	$10^7$	$\pm 0.1$	
Серый	8	8	8	$10^8$	$\pm 0.05$	
Белый	9	9	9	$10^9$	–	

Условные обозначения резисторов в принципиальных электрических схемах приведены на рисунке 1.3.



а – нерегулируемый (общее обозначение); б – нерегулируемые с указанием номинальной мощности; в – нерегулируемый с отводом; г, д – переменного сопротивления; е – подстроечный; ж, з – нелинейные (варистор и терморезистор); и - фоторезистор

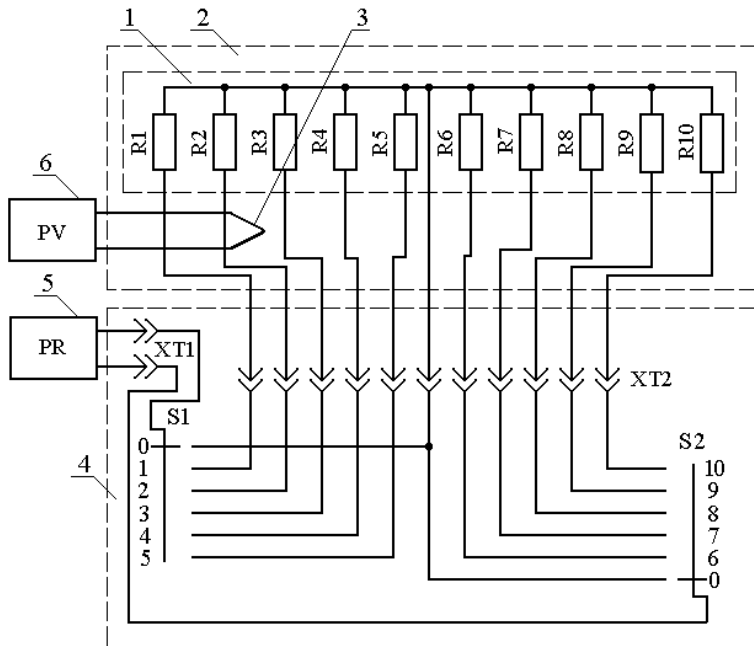
Рисунок 1.3 – Условные обозначения резисторов в электрических схемах

## 2 Описание лабораторной установки

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рисунке 2.1. Лабораторная установка включает в себя:

- макет с набором резисторов 1;
- блок коммутационных устройств 4;
- термопечь 2;
- прибор для измерения сопротивлений 5;
- систему для измерения температуры в печи – термопару 3 и милливольтметр 6.

Лабораторную установку дополняют стенды с набором резисторов постоянного и переменного сопротивления, размещенных на стене лаборатории.



1 – лабораторный макет; 2 – термопечь; 3 – термопара;  
4 – блок коммутационных устройств; 5 – омметр; 6 – вольтметр  
Рисунок 2.1 – Схема электрическая лабораторной установки

**Лабораторный макет 1** состоит из набора 10 резисторов постоянного сопротивления различного типа, закрепленных на массивном металлическом основании в специальном керамическом держателе. Резисторы условно разделены на две группы: к первой группе отнесены резисторы R1-R5, ко второй – R6-R10. Макет размещается в термопечи 2 и может быть вынут из нее для знакомства с конструкциями резисторов.

**Блок коммутационных устройств 4**, выполненный в виде автономного блока, содержит: разъем XT2 для соединения набора резисторов 1 с блоком коммутации; клеммы XT1 для подключения **омметра 5** к коммутационному блоку и два переключателя S1 и S2, позволяющие подключать исследуемые резисторы к омметру 5 для измерения их сопротивления. В схеме коммутации предусмотрено **два варианта: первый** – измерение сопротивлений резисторов каждого в отдельности. При этом один из переключателей (S1 или S2) должен быть установлен на позицию «0», а другой – на позицию, соответствующую номеру измеряемого резистора; **второй** – измерение сопротивления двух последовательно соединенных резисторов. Любой из резисторов первой группы R1-R5 может быть соединен с любым из резисторов второй группы R6-R10. При этом переключатели S1 и S2 должны быть установлены на позициях, соответствующих номерам последовательно соединенных резисторов.

**Термопечь 2** представляет собой термошкаф с керамической футеровкой и спирального подогревателя из высокоомного провода, позволяющего доводить температуру в печи до 150 °С. **Температура в печи не стабилизируется.** Учитывая, что электромонтаж лабораторного макета выполнен низкотемпературным электромонтажным проводом и наличие в лабораторном макете резисторов с низкой рабочей температурой, **не допуская превышение температуры в печи сверх установленной величины (60 °С).** Поэтому при проведении исследований изменения сопротивления резисторов от температуры необходимо постоянно контролировать температуру в печи,

Перегрев температуры в печи по сравнению с температурой в лаборатории измеряется косвенным методом с использованием **термопары 3** типа хромель-алюмель и магнитоэлектрического **прибора РV 6**, позволяющего измерять величину термоэДС этой термопары. Естественно, в этом случае необходимо проводить

пересчет термоэДС  $E$  в градусы Цельсия  $t^\circ$ , для чего используется тарировочная зависимость  $t^\circ(E)$ .

### 3 Подготовка к работе

3.1 Повторить раздел “Резисторы” изучаемой дисциплины, воспользовавшись учебными пособиями [1, раздел 2], [2, глава 2] или [3, глава 1]. Особое внимание обратить на основные свойства, конструктивные особенности, условные обозначения и области применения резисторов постоянного сопротивления.

3.2 Ознакомиться с настоящими методическими указаниями и заготовить черновой вариант таблиц 4.1 и 4.2 для внесения справочных данных исследуемых резисторов, результатов исследований и расчетов. Ширина строк таблиц должна быть достаточной, чтобы иметь возможность, в случае необходимости, вносить в них исправления.

### 4 Порядок выполнения работы

4.1 Ознакомиться с лабораторной установкой (см. раздел 2).

4.2 Ознакомиться с конструкциями резисторов, размещенных на макете, для чего аккуратно вынуть из печи лабораторный макет, при необходимости заправляя жгут соединительных проводов в отверстие печи. Определить тип, номинальное сопротивление  $R_H$ , допуск  $\delta R_H$ , номинальную мощность  $P_H$  и ТКС ( $\alpha_R$ ) резисторов, используя маркировку на резисторах, справочники [4-7] и стенды с набором резисторов постоянного сопротивления. При считывании маркировочных данных с резисторов **категорически запрещается деформировать (изгибать) выводы резисторов**. Данные внести в таблицу 4.1 в порядке, соответствующем указанному номеру резистора на лабораторном макете.

4.3 Рассчитать предельно допустимое рабочее напряжение  $U_{ПР}$  по формуле (4.1) и внести в таблицу 4.1. **Результаты показать преподавателю.**

$$U_{ПР} = \sqrt{P_H \cdot R_H} \quad (4.1)$$

Таблица 4.1 – Паспортные характеристики исследуемых резисторов

Номер и тип	Паспортные параметры резисторов	Материал резистивного
-------------	---------------------------------	-----------------------

резистора	$R_H,$ $\text{Ом}$	$\delta R_H,$ %	$P_H,$ $\text{Вт}$	$\alpha_R \cdot 10^6,$ $\text{К}^{-1}$	$U_{\text{ПР}},$ $\text{В}$	элемента
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

4.4 Получить разрешение от преподавателя на проведение экспериментальных исследований. Аккуратно поместить лабораторный макет в печь, придерживая жгут соединительных проводов, установить термопару вблизи основания макета и измерить величину сопротивлений резисторов  $R_{\text{ИЗ.0}}$  с помощью цифрового омметра (универсального цифрового вольтметра В7-23) при **комнатной температуре**, последовательно подключая их к прибору с помощью переключателей S1 и S2. При измерении сопротивлений резисторов первой группы R1-R5 переключатель S2 должен находиться на позиции «0», а при измерении сопротивлений резисторов второй группы R6-R10 переключатель S1 должен находиться на позиции «0». Результаты измерений ( $R_{\text{ИЗ.0}}$ ) внести в таблицу 4.2 и **показать преподавателю**.

4.5 Рассчитать фактическое отклонение сопротивлений резисторов  $\delta R$  от номинальных значений по формуле (4.2) и внести результаты в таблицу 4.2.

$$\delta R = \frac{R_0 - R_H}{R_H} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

Таблица 4.2 – Результаты измерений и расчетов

Номер и тип резистора	$R_H,$ $\text{Ом}$	Результаты измерений		Результаты расчетов	
		$R_0,$ $\text{Ом}$	$R,$ $\text{Ом}$	$\delta R,$ %	$\alpha_R \cdot 10^6,$ $\text{К}^{-1}$

1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

4.6 Определить чувствительность системы измерения температуры перегрева в печи  $\tau_{уд}$ , то есть определить цену малого деления милливольтметра в градусах Цельсия, соответствующую чувствительности термопары. Ее величину можно рассчитать по формуле

$$\tau_{уд} = \frac{\Delta t}{\Delta E} \cdot \frac{U_{max}}{N}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{дел} \quad (4.3)$$

где  $\Delta t$  – значение температуры перегрева, выбранное на тарифовочном графике;

$\Delta E$  – значение термоэдс термопары, соответствующее данному перегреву;

$U_{max}$  – предельное значение напряжения милливольтметра, соответствующее позиции переключателя;

$N$  – число малых делений шкалы прибора.

Чтобы не допустить перегрев печи сверх установленной преподавателем величины, следует рассчитать максимально допустимое отклонение стрелки милливольтметра (число малых делений  $n_{max}$ ), соответствующее заданной температуре перегрева  $\Delta t_{max}$ ,

$$n_{max} = \Delta t_{max} / \tau_{уд}, \text{ дел.} \quad (4.4)$$

Занести в протокол полученные значения чувствительности системы измерения  $\tau_{уд}$  и максимально допустимое показание милливольтметра  $n_{max}$ , соответствующее заданной, максимально допустимой температуре перегрева резисторов, и **показать преподавателю**.

Получить разрешение на продолжение исследований, проверить правильность установки термопары, закрыть печь и включить подогрев. Дождаться нагрева печи до указанной преподавателем температуры, постоянно контролируя ее по

милливольтметру. При этом следует иметь ввиду, что с помощью термопары измеряется перегрев в печи, то есть превышение температуры в печи по сравнению с температурой в лаборатории. По достижении отклонения стрелки на  $n_{max}$  делений (перегрев не выше 40 °С) отключить подогрев.

4.7 Произвести **оперативно** измерения сопротивлений резисторов  $R_i$  при установившейся температуре в печи согласно методике, рассмотренной в пункте 5.3. Результаты измерений внести в таблицу 5.2 и **показать преподавателю**.

4.8 Рассчитать величину температурного коэффициента изменения сопротивления резисторов по формуле (4.5) и внести результаты в таблицу 4.2.

$$\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{(tC_{max} - t_0) \frac{\Delta R}{\Delta t - R_0}} \quad (4.5)$$

4.9 Проанализировать полученные результаты измерения ТКС и подобрать пару резисторов ( $R_i$  из первой группы R1-R5 и  $R_j$  из второй группы R6-R10), имеющих наиболее близкие значения ТКС, но противоположные по знаку.

4.10 Рассчитать величину ТКС  $\alpha_{RT}$  последовательно соединенной (термокомпенсированной) пары отобранных резисторов по формуле

$$\alpha_{RT} = \frac{\Delta R_i + \Delta R_j}{(R_{0i} + R_{0j}) \cdot \Delta t} = \frac{(\alpha_{Ri} \cdot R_{0i} + \alpha_{Rj} \cdot R_{0j})}{(R_{0i} + R_{0j})}, \quad (4.6)$$

где  $\Delta R_i = R_{i,t} - R_{0,i}$  и  $\Delta R_j = R_{j,t} - R_{0,j}$  – температурные изменения сопротивлений отобранных резисторов;  $\alpha_{Ri}$  и  $\alpha_{Rj}$  – ТКС отобранных резисторов.

4.11 Установить переключатели S1 и S2 на позиции, соответствующие номерам отобранной пары резисторов. Включить подогрев печи и повторить нагрев ее согласно приведенной в пункте 4.6 методике. Отключить подогрев печи и измерить сопротивление последовательно включенных резисторов  $R_{t\Sigma}$ . Результат внести в протокол.

4.12 Рассчитать величину ТКС термокомпенсированной пары  $\alpha_{R\Sigma}$  по формуле

$$\alpha_{R\Sigma} = \frac{R_{t\Sigma} - R_{0i} - R_{0j}}{(R_{0i} + R_{0j}) \cdot \Delta t} \quad (4.7)$$

4.13 Сравнить полученное значение  $\alpha_{R\Sigma}$  с величиной  $\alpha_{RT}$ , рассчитанной в пункте 4.8 и сделать вывод.



4.14 По окончании измерений открыть печь для охлаждения.

4.15 Провести анализ точности и температурной стабильности исследованных резисторов и *сделать выводы о качестве каждого из них*. Указать возможные области их применения.

4.16 Оформить отчет в соответствии с требованиями и защитить работу.

## 5 Содержание отчета

5.1 Введение (цель работы).

5.2 Описание лабораторной установки.

5.3 Порядок проведения работы и ее результаты – справочные данные и результаты исследований резисторов в виде таблиц.

5.4 Выводы по результатам исследований согласно пунктам 4.13 и 6.3.

## 6 Методические указания

6.1 Рекомендуется накануне при подготовке к лабораторным занятиям заготовить протокол отчета по лабораторной работе. Он может быть выполнен на тетрадных листах или на листах формата А4 и должен содержать пункты 5.1-5.3 раздела 5.

6.2 В данной работе исследуются различные типы непроволочных и проволочных резисторов постоянного сопротивления. Так как у некоторых типов резисторов, а также у элементов электромонтажа лабораторного макета допустимая рабочая температура весьма ограничена, то в процессе исследований **предельная температура в термопечи не должна превышать 60°C**.

6.3 В выводах по результатам исследований необходимо отразить следующие моменты:

1) Соответствие фактических отклонений сопротивления резисторов  $\delta R$  паспортным данным  $\delta R_H$  (см. таблицы 4.1 и 4.2). Если имеют место несоответствия, то указать возможные причины;

2) Оценить температурную стабильность ТКС ( $\alpha_R$ ) исследованных резисторов (см. таблицы 4.1 и 4.2) и объяснить основные причины нестабильности/стабильности некоторых типов резисторов. Обосновать возможные причины несоответствия измеренных ТКЕ ( $\alpha_C$ ) с паспортным, если таковые имеют место;

3) Оценить эффективность метода термостабилизации резисторов, использованного в данной работе (см. пункты 4.9 и 4.10). Сформулировать условия полной термокомпенсации нестабильности резисторов. Привести известные вам другие методы стабилизации сопротивления резисторов.

4) Дать оценку качеству исследованных резисторов (точность, стабильность, достоинства, недостатки) и предложить возможные области применения каждого из них.

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Что называется резистором?

7.2 На какие типы делятся резисторы постоянного сопротивления по резистивному материалу?

7.3 Какими параметрами и характеристиками оцениваются свойства резисторов постоянного сопротивления?

7.4 На какие ряды по величине номинального сопротивления и допуска делятся стандартные резисторы?

7.5 Что понимается под номинальной мощностью рассеивания резистора и чем она определяется?

7.6 Какими параметрами оценивается стабильность резисторов?

7.7 Что понимается под температурным коэффициентом изменения сопротивления (ТКС)? От каких параметров резистора и в какой степени он зависит от этих параметров?

7.8 Что такое собственные шумы резисторов, и чем они обусловлены?

7.9 Какие системы условных обозначений, маркировки и кодирования типов и параметров резисторов используются в настоящее время?

7.10 Основные свойства и области применения непроволочных и проволочных резисторов постоянного сопротивления?

7.11 Каковы свойства и конструктивные особенности резисторов постоянного сопротивления для поверхностного монтажа?

## 8 Список рекомендуемой литературы

1 Кузбных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база РЭС. Электрорадиоэлементы: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007.– 263 с.

2 Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.

3 Фролов А.Д. Радиодетали и узлы. – М.: Высшая шк., 1975. – 440 с.

4 Резисторы: Справочник / Под ред. И.И. Четверткова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 352 с.

5 Аксенов А.И., Нефедов А.В. Резисторы, конденсаторы, провода, припой, флюсы: Справочное пособие. – М.: «Салон-Пресс», 2000. – 240 с.

6 Нестеренко И.И. Цвет, код, символика электронных компонентов. – М.: «Салон-Пресс», 2004. – 216 с.

7 Масленников М.Ю., Соболев Е.А. и др. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база. Кн. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – С.213-245.

8 Н.И. Кузбных. Исследование резисторов постоянного сопротивления: Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». – Томск: ТУСУР, 2012.– 24 с.