

Резисторы являются самыми массовыми изделиями электронной техники. Они применяются практически во всех видах аппаратуры, связанной с электроникой и электротехникой.

В настоящее время в России и во многих зарубежных странах идет тенденция развития резисторостроения в научном, техническом и прикладном плане путем решения задач повышения прецизионности, временной стабильности, устойчивости к влиянию внешних воздействующих факторов (климатических, механических и др.), расширения диапазонов номинальных сопротивлений резисторов в область высоких (более 100 МОм) и низких (менее 0,1 Ом) значений, миниатюризации и т.д.

Очевидно, что эффективное решение указанных задач невозможно без соответствующей системы методов и средств измерений (СИ). При этом очень часто возникает проблема «не так сложно сделать, как сложно подтвердить», а подтверждать требуемые характеристики и должна метрология. С теоретической точки зрения метрология – это наука об измерениях, методах и средствах достижения требуемой точности, с законодательной – орган обеспечения единства измерений, путем проведения соответствующих мероприятий по метрологическому обеспечению. Структура метрологического обеспечения резисторостроения представлена на рисунке 1.

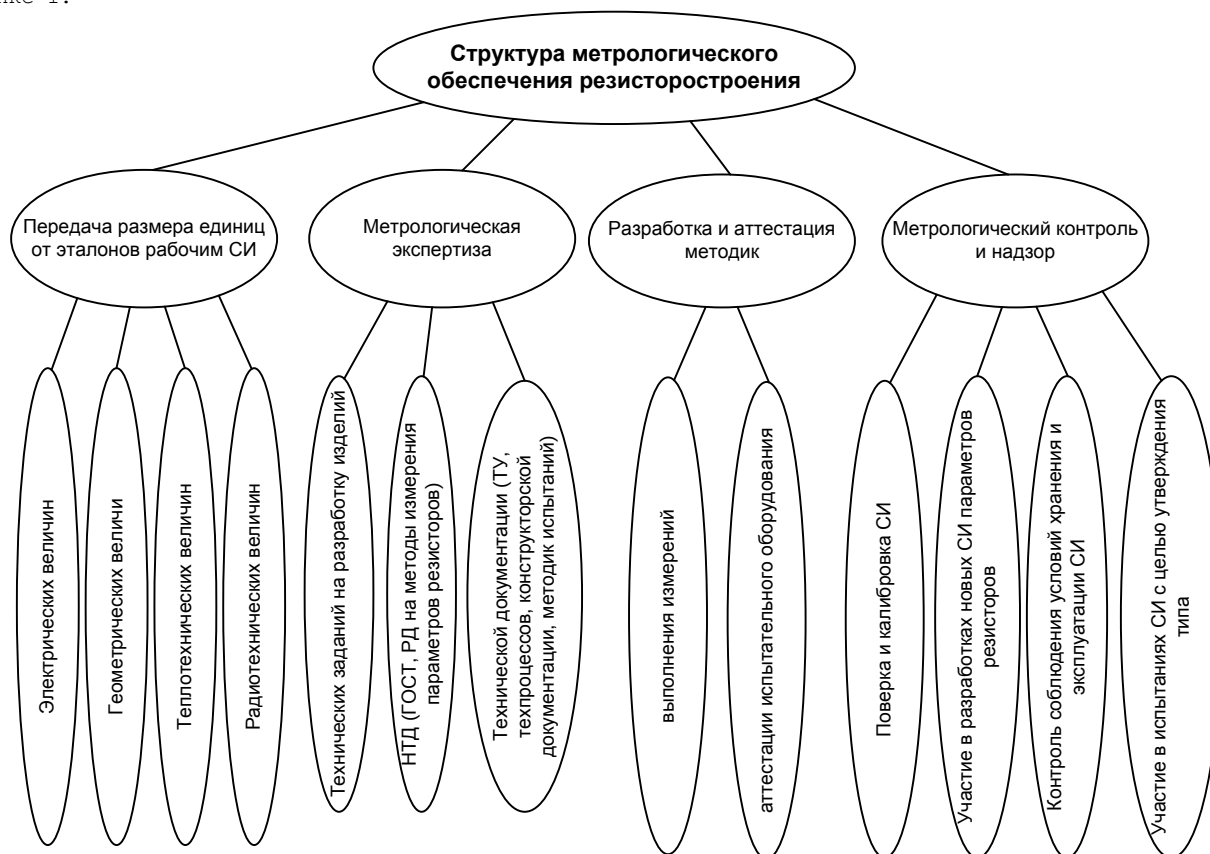


Рисунок 1

Для обеспечения единства измерений в резисторостроении необходимо не только применение узаконненных единиц (Ом), (А), (В), но и важно, чтобы размер единиц был одинаковым. Для этого следует воспроизводить единицы с максимально возможной точностью технических средств, хранить единицу в состоянии, обеспечивающем неизменность размера во времени, и регулярно передавать размер единицы всем другим СИ, програвированным в этой единице. С этой целью создаются иерархические системы, в которых технические средства, расположенные в определенном порядке в соответствии с их точностью, участвуют в последовательной передаче размера единицы от эталона всем СИ этой величины. На рисунке 2 представлена локальная поверочная схема при передаче размера единиц, связанных с сопротивлением на примере метрологической базы ФГУП «НИИЭМП», как головного предприятия в области резисторостроения.

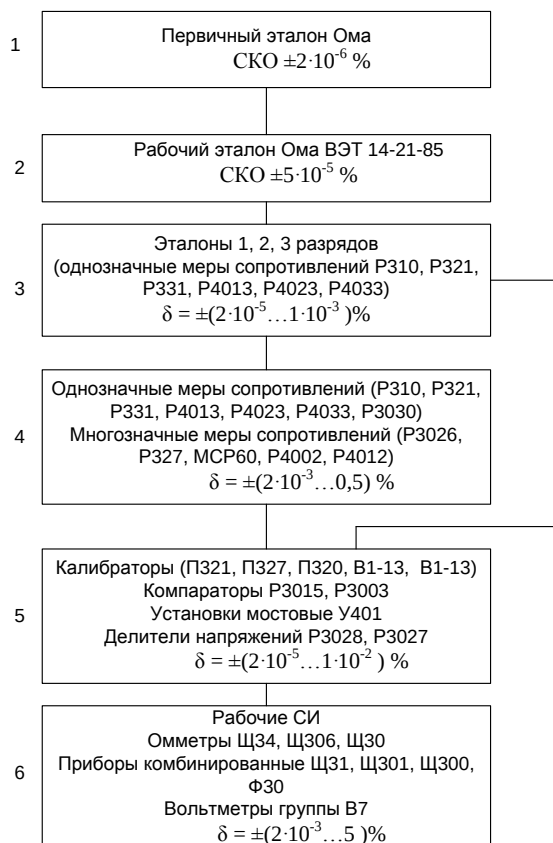


Рисунок 2

Как правило, метрологическое обеспечение предприятий РФ, выпускающих резисторы общего применения, ограничивается применением СИ шестого и редко пятого уровня. Сравнительные характеристики таких СИ приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Погрешность средств измерений сопротивлений.

Тип прибора	Диапазон номинальных значений сопротивлений, Ом				
	10-10 ²	10 ² - 10 ³	10 ³ - 10 ⁴	10 ⁴ - 10 ⁵	10 ⁵ - 10 ⁶
Установки мостовые					
Р 3009	0,01	0,02	0,020,02	0,02	0,02
У 401	-	-	-	-	0,0005-0,0002
Приборы комбинированные					
В7-27А	2,4-0,4	2,4-0,4	2,4-0,4	2,4-0,4	2,4-0,4
В7-38	2-0,27	0,27-0,1	0,5-0,1	0,5-0,1	0,55-0,2
Щ 31	0,1-0,014	0,014-0,0055	0,014-0,005	0,014-0,005	0,02-0,005
Щ 300	0,3-0,1	0,3-0,1	0,3-0,1	0,3-0,1	0,5-0,1
Щ 301	0,3-0,1	0,3-0,1	0,3-0,1	0,3-0,1	0,5-0,1
Ф 30	4-0,5	0,5-0,1	0,5-0,1	0,5-1	0,5-1
Р 4833	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Agilent 3458/HFL, 8508 A (Fluke, США)	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
Омметры					
Щ 34	0,1-0,05	0,1-0,05	0,07-0,02	0,07-0,02	0,1-0,05
Щ 306/1	0,01	0,005	0,005	0,005	0,005
Resistomat (Burster, Германия)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Компараторы					
Р 346**	0,00025-0,0002	0,0002-0,0001	0,0001	0,0001-0,0002	0,0002-0,001
Р 346*	0,0053-0,0022	0,0022	0,0021	0,0022	0,05
Р 3003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005
Р 3017	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Р 3015**	0,00025-0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Р 3015*	0,005-0,002	0,002	0,0021	0,0021	0,05
Guildline	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001

* с учетом погрешности меры электрического сопротивления

** без учета погрешности меры электрического сопротивления

Таблица 2 - Классы точности мер электрических сопротивлений

Тип меры	Декады				
	10	102	103	104	105
Р 3026 многознач.	0,005	0,002	0,002	0,002	–
Р 4831 однозначн.	0,04	0,022	0,02	0,02	–
Р 3030 однозначн.	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Р 327 многознач.	0,025	0,01	0,01	0,01	–
Р 40101 многознач.	–	–	–	0,05	0,05
Р 40102 многознач.	–	–	–	0,05	0,05
МС 3007 однознач.	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
МС 3006 однознач.	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
МС 3005 однознач.	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
МС 3002 многознач.	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
МС 3001 многознач.	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Е1-14 (Эстония) многознач.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Е1-5 (Беларусь) многознач.	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Мера сопротивления (Fluke, США)	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025

Разработка специализированных резисторов и изделий на их основе требует наличия СИ 2, 3 и 4 уровней. С целью метрологического обеспечения разработок и производства прецизионных резисторов в 80-х годах был создан рабочий эталон единицы электрического сопротивления, зарегистрированный в государственном реестре Госстандарта как ВЭТ 14-21-85.



Рисунок 3

Рабочий эталон Ома представляет собой комплекс средств измерений, предназначенных для хранения единицы электрического сопротивления (Ома) и передачи ее размера как мерам сопротивления, так и средствам измерений сопротивления. Основу рабочего эталона составляет группа из трех высокостабильных мер сопротивления с номинальным значением сопротивления 1 Ом. Ежегодно ФГУП «НИИЭМП» проводит сличение рабочего эталона с государственным эталоном единицы сопротивления. Среднее квадратическое отклонение результатов сличения рабочего эталона Ома с государственным составляет не более $\pm 3 \cdot 10^{-8}$. На рисунке 4 приведены результаты сличения мер, входящих в состав рабочего эталона Ома.

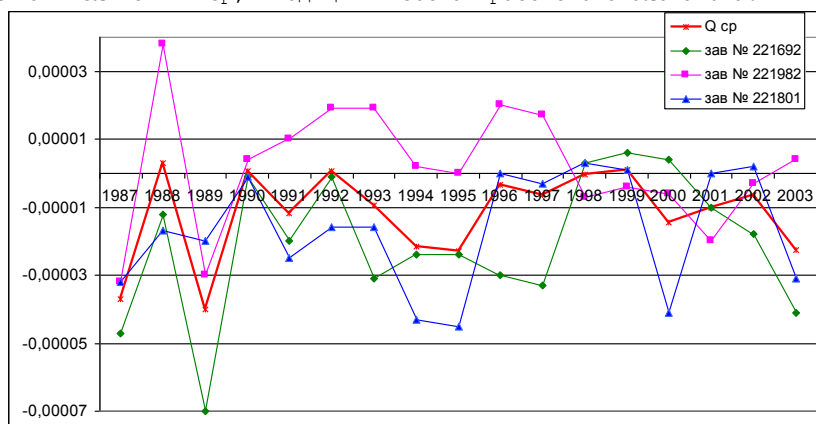


Рисунок 4

Как видно из графика, все меры, входящие в состав рабочего эталона Ома, имеют временную нестабильность сопротивления не более $\pm 0,5$ ppm за год, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 8.028, при этом среднее значение нестабильности мер рабочего эталона Ома не превышает значения $\pm 0,2$ ppm за последние 10 лет.

Передача размера единицы электрического сопротивления от рабочего эталона Ома мерам высшей точности осуществляется в диапазоне номинальных значений от 10^{-3} Ом до 10^9 Ом при помощи переходных мер сопротивления типа КП-5, ПМС, Р 4080, Р 4082 и компараторов сопротивления типа Р 3015 и установки мостовой У 401.

Внедрение рабочего эталона Ома позволило создать прецизионные резисторы типа С5-60 с допускаемыми отклонениями от номинальных значений в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ % и временной нестабильностью $\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$ % за год. На их основе во ФГУП «НИИЭМП» были созданы многозначные меры электрического сопротивления:

- Е1-4: диапазон устанавливаемых значений сопротивлений по ряду Е 24 от 0,01 до 1100 Ом с погрешностью аттестации $\pm 0,001$ %;

- Е1-5: диапазон устанавливаемых значений сопротивлений по ряду Е 24 от 10^2 до $50 \cdot 10^6$ Ом с погрешностью аттестации $\pm 0,0005$ %.

По заказу ФГУП «НИИЭМП» ПО «Краснодарский ЗИП» изготовил многозначные меры сопротивления с автономным масляным термостатированием типа МС 3001: диапазон устанавливаемых значений сопротивлений от 0,1 до 10^5 Ом с погрешностью аттестации $\pm 0,001$ %.

Наличие эталона Ома позволяет разрабатывать и выпускать прецизионные резисторы с допускаемым отклонением сопротивления от номинального значения не более $\pm 0,001\%$ и временной стабильностью не хуже $\pm 0,0005\%$ (С5-60, Р2-67 и т.д.), наборы резисторов, применяющиеся в качестве делителей напряжения с погрешностью коэффициента деления не более $\pm 0,002$ % (НР-51, НР-53 и т.д.), и проволочные прецизионные переменные резисторы с линейностью $\pm (0,3 - 0,75)\%$ и износоустойчивостью до 100000 циклов (РП1-48Б, РП1-75 и т.д.).

К сожалению отечественное приборостроение не всегда обеспечивает резисторостроение приборами с необходимыми метрологическими и эксплуатационными характеристиками, поэтому во ФГУП «НИИЭМП» проводится разработка специализированных средств измерений собственными силами. Так, разработаны и внедрены в производство специализированные цифровые омметры типа ОА3201 с диапазоном измерений от 10 мкОм до 100 Ом и погрешностью измерения не более $\pm 0,01\%$, позволившие отказаться от серийных приборов с ручным уравниванием, и тем самым повысить производительность труда при контроле сопротивлений резисторов. Разработаны и внедрены в производство ряд измерительных установок:

- **установка контроля параметров наборов резисторов НР1-51 ПКД-70** с характеристиками, приведенными в таблице 3

Таблица 3

Виды измеряемых величин			
Коэффициент деления K_d		Сопротивление R	
Пределы допускаемой относительной основной погрешности, %	Номинальное значение	Пределы допускаемой относительной основной погрешности, %	Номинальное значение, кОм
$\pm 2 \cdot 10^{-3}$	0,04	$\pm 0,5$	30; 530
$\pm 1 \cdot 10^{-3}$	0,5		

- **установки контроля параметров тонкопленочных делителей напряжения ПКД - 1М** с диапазоном измерения отклонений коэффициентов деления делителей напряжения от 0,01 до 0,06 % и допускаемой приведенной погрешности измерения отклонения коэффициента деления делителей напряжения серии не более $\pm 0,001$ %.

- **установка измерений относительного отклонения сопротивления от номинального значения и температурного коэффициента сопротивления постоянных проволочных эталонных резисторов «УИПР-1»** с характеристиками:

- диапазон измерений сопротивлений от 50 до 10^5 Ом;
- пределы допускаемых отклонений сопротивлений резисторов от номинальных значений от $\pm 0,001$ до $\pm 0,05$ %;
- диапазон измерений ТКС от $0,5 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- диапазон измерений температур от минус 60 до плюс 125 $^\circ\text{C}$;
- погрешность поддержания температуры в рабочем объеме термостата не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$;
- пределы допускаемой погрешности измерений ООС от номинального значения от $\pm 0,00005$ до $0,0001$ %;
- пределы допускаемой погрешности воспроизведения сопротивления мерой $\pm 0,00025$ %;
- пределы допускаемой погрешности измерений температурного коэффициента сопротивлений от $\pm 0,00005$ до $0,0001$ %;

- **установка измерения относительной разности сопротивлений и температурного коэффициента сопротивления наборов резисторов УИЭ.НРЭ - 010 - 044** с характеристиками, приведенными в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Диапазон сопротивлений, Ом	Предел допускаемой погрешности установки при измерении относительной разности сопротивлений (ОРС), %				
	Для ОРС менее $\pm 0,1$ %			Для диапазона ОРС $\pm (0,1 - 1)$ %	
	ТКС контролируемого резистора, $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$			ТКС контролируемого резистора, $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
	$\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 5$	± 10	$\pm 25, \pm 50$	$\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 5, \pm 10$	$\pm 25, \pm 50$
$10 - 10^2$	$\pm 0,001$	$\pm 0,0011$	$\pm 0,0015$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
$10^2 - 10^3$	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0005$	$\pm 0,0007$	$\pm 0,001$	$\pm 0,0015$
$10^3 - 10^4$	$\pm 0,0002$	$\pm 0,0003$	$\pm 0,0005$	$\pm 0,001$	$\pm 0,0015$
$10^4 - 10^5$	$\pm 0,0003$	$\pm 0,0004$	$\pm 0,0006$	$\pm 0,001$	$\pm 0,0015$
$10^5 - 10^6$	$\pm 0,0015$	$\pm 0,0015$	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$
$10^6 - 10^7$	$\pm 0,015$	$\pm 0,015$	$\pm 0,015$	$\pm 0,015$	$\pm 0,015$

Таблица 5

Диапазон сопротивлений, Ом	Предел допускаемой погрешности установки для измерения температурного коэффициента сопротивлений (ТКС) в интервалах температур от 20 $^\circ\text{C}$ до указанных значений, $10^{-6} \times ^\circ\text{C}^{-1}$	
	Минус 60, минус 40, плюс 70, 85, 100, 125.	Минус 10, минус 5, 0, плюс 5, 40, 55, 60.
$10 - 10^2$	$0,3 \cdot 10^{-6} + 0,05\alpha$	$1 \cdot 10^{-6} + 0,1\alpha$
$10^2 - 10^3$	$0,15 \cdot 10^{-6} + 0,05\alpha$	$0,35 \cdot 10^{-6} + 0,1\alpha$
$10^3 - 10^4$	$0,1 \cdot 10^{-6} + 0,05\alpha$	$0,25 \cdot 10^{-6} + 0,1\alpha$
$10^4 - 10^5$	$0,1 \cdot 10^{-6} + 0,05\alpha$	$0,3 \cdot 10^{-6} + 0,1\alpha$
$10^5 - 10^6$	$0,7 \cdot 10^{-6} + 0,05\alpha$	$1,5 \cdot 10^{-6} + 0,1\alpha$
$10^6 - 10^7$	$1,5 \cdot 10^{-6} + 0,05\alpha$	$5 \cdot 10^{-6} + 0,1\alpha$

- **установка для контроля высокоомных высоковольтных резисторов** с диапазоном измерения сопротивлений от 1 МОм до 10 ГОм, погрешностью измерения сопротивления не более $\pm 0,1\%$ при измерительном напряжении на контролируемом резисторе от 200 В до 20 кВ;

- **стенд контроля параметров резисторов РП1-48В** с характеристиками:

- разбраковка по величине процентного отклонения полного сопротивления (ΔR_p) контролируемых резисторов от установленного значения по группам годности:

I группа до $\pm 9,0\%$;

II группа от $\pm 9,0\%$ до $\pm 19,0\%$;

- пределы допускаемой относительной погрешности измерения сопротивления при контроле полного сопротивления, $\% \pm 1,5$.

- разбраковка резисторов по величине минимального сопротивления (R_{min}), равного, Ом 0,95;

- пределы допускаемой относительной погрешности при измерении минимального сопротивления, $\% \pm 5,0$.

- разбраковка резисторов при величине начального скачка сопротивления, равного, Ом:

- для $R_{ном}$ не превышающего 4,7 кОм: 14,5;

- для $R_{ном}$ более 4,7 кОм: 9,5;

- пределы допускаемой относительной погрешности при измерении сопротивления начального скачка, $\%, \pm 1,5$.

- разбраковка резисторов по величине плавности изменения сопротивления. Цикл вращения подвижной системы от упора до упора и обратно составляет, с 22 ± 2 .

Особо следует отметить, что для метрологического обеспечения производства прецизионных резисторов в развитие серии ГОСТ 21342 на методы измерения параметров резисторов разработаны две методики выполнения измерений КЮБР.430 414.013 «Резисторы постоянные проволочные эталонные. Методика выполнения измерений при определении относительного отклонения сопротивления от номинального значения» и КЮБР. 430 414.014 «Резисторы постоянные проволочные эталонные. Методика выполнения измерений при определении температурного коэффициента сопротивления».

Разработка и производство резисторов с высокими точностными и эксплуатационными характеристиками, обеспечение их надежной работы в изделиях различного применения требуют высокой культуры производства и соответствующего уровня метрологического обеспечения.

Использование в ФГУП «НИИЭМП» эталонов высокого разряда, разнообразных методов и средств поверки (калибровки) СИ, современных методик выполнения измерений, соответствующих СИ позволяет создавать резисторы и изделия на их основе с улучшенными характеристиками, которые в свою очередь побуждают резисторостроение продвигаться по пути развития современных технологий.