

**Калибровка резистора с  
НОМИНАЛЬНЫМ  
значением  
электрического  
сопротивления 10 кОм**

# ПРИМЕР

**Электрическое сопротивление** четырехзажимного резистора определено с использованием широкодиапазонного цифрового мультиметра ( $7\frac{1}{2}$  - значный мультиметр) в режиме электрического сопротивления и резистора того же номинального значения, что и у калибруемого резистора.

Резисторы погружены в хорошо перемешиваемую масляную ванну при температуре  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , которая контролируется размещенным в центре ртутным стеклянным термометром. Перед началом измерений выполнена стабилизация.

Четырехзажимные разъемы каждого резистора по очереди подсоединяются к клеммам цифрового мультиметра. Установлено, что сила тока  $100\text{ }\mu\text{A}$  в диапазоне  $10\text{ кОм}$  достаточно мала, чтобы не вызвать какое-либо существенное нагревание резисторов. Используемая методика измерений также гарантирует, что влияние внешних сопротивлений утечек на результат измерений можно считать незначимым.

# УРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Электрическое сопротивление  $R_x$  калибруемого резистора получают из уравнения измерений:

$$R_x = (R_s + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

где:

$R_s$  - электрическое сопротивление эталонного резистора (эталона),

$\delta R_D$  - дрейф электрического сопротивления эталона после его последней калибровки;

$\delta R_{TS}$  - изменение электрического сопротивления эталонного резистора, обусловленное отличием температуры от номинального значения;

$r = R_{ix}/R_{is}$  - отношение значений электрических сопротивлений (индекс «i» означает «текущее») калибруемого и эталонного резисторов;

$r_C$  - поправочный множитель для учета паразитных напряжений и разрешения прибора;

$\delta R_{TX}$  - изменение электрического сопротивления калибруемого резистора, обусловленное отличием температуры от номинального значения.

# АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

**Эталон ( $R_S$ ):** В сертификате калибровки эталона приведено значение электрического сопротивления 10 000, 053 Ом  $\pm$  5 мОм (коэффициент охвата  $k = 2$ ) при температуре эталона 23 °С.

**Дрейф значения эталонного резистора ( $\delta R_D$ ):** дрейф электрического сопротивления эталонного резистора с момента его последней калибровки составил +20 мОм с пределами  $\pm$  10 мОм .

# АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

**Температурные поправки ( $\delta R_{TS}$ ):** температура 23 °С масляной ванны контролируется откалиброванным термометром. Принимая во внимание метрологические характеристики применяемого термометра и градиенты температуры в масляной ванне, температура резисторов оценивается как соответствующая контролируемой температуре в интервале  $\pm 0,055$  К. Соответственно, с учетом значения температурного коэффициента (ТК) эталонного резистора  $5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ .

**Температурные поправки ( $\delta R_{TX}$ ):** Из технической документации производителя калибруемого резистора известно, что его ТК оценивается как не превосходящий  $10 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ .

**Корреляция:** ни одна из входных величин не считается коррелированной в какой-либо значимой мере.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

**Измерения ( $r$ ):** проведены пять наблюдений для записи отношения  $r$ :

№	Наблюдаемое отношение
1	1,000 010 4
2	1,000 010 7
3	1, 000 010 6
4	1,000 010 3
5	1,000 010 5

$r = R_{ix}/R_{is}$  - отношение значений электрических сопротивлений (индекс « $i$ » означает «текущее») калибруемого и эталонного резисторов;

# БЮДЖЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/ тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$R_S$					
$\delta R_D$					
$\delta R_{TS}$					
$\delta R_{TX}$					
$r_C$					
$r$					

# ЗНАЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

**Эталон ( $R_S$ ):** В сертификате калибровки эталона приведено значение электрического сопротивления 10 000, 053 Ом  $\pm$  5 мОм (коэффициент охвата  $k = 2$ ) при температуре эталона 23 °С.

$$u(R_S) = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ мОм}$$

$$\frac{\partial R_X}{\partial R_S} = r_C r$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$R_S$	10 000,053 Ом	2,5 мОм	Нормальное/В	$r_C r$	

# ЗНАЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

**Отклонение значения эталонного резистора ( $\delta R_D$ ):** отклонение значения электрического сопротивления эталонного резистора после его последней калибровки составило +20 мОм с пределами  $\pm 10$  мОм

$$u(\delta R_D) = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,8 \text{ мОм}$$

$$\frac{\partial R_X}{\partial R_D} = r_C r$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/ тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$\delta R_D$	0,020 Ом	5,8 мОм	прямоугольное/В	$r_C r$	

# ЗНАЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

**Температурная поправка для эталона ( $\delta R_{TS}$ ):** температура 23 °С масляной ванны контролируется откалиброванным термометром. Температура резисторов оценивается как соответствующая контролируемой температуре в интервале  $\pm 0,055$  К. Значение температурного коэффициента (ТК) эталонного резистора  $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Зависимость сопротивления проводника от температуры представляют в виде функции:

$$\delta R_{TS} = R \cdot \alpha \cdot \Delta t,$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Отклонение электрического сопротивления в пределах  $\pm 2,75$  мОм

$$u(\delta R_{TS}) = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,055}{\sqrt{3}} = \frac{2,75}{\sqrt{3}} = 1,6 \text{ мОм} \quad \frac{\partial R_X}{\partial R_{TS}} = r_C r$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/ тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$\delta R_{TS}$	0,000 Ом	1,6 мОм	Прямоугольное/В	$r_C r$	

# ЗНАЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r_r - \delta R_{TX}$$

**Температурная поправка калибруемого резистора ( $\delta R_{TX}$ ):** Из технической документации производителя калибруемого резистора, известно, что его ТК оценивается как не превосходящий  $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Зависимость сопротивление проводника от температуры представляют в виде функции:

$$\delta R_{TX} = R \cdot \alpha \cdot \Delta t,$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Соответственно, колебания электрического сопротивления калибруемого резистора из-за колебаний температуры оцениваются как находящиеся в интервале  $\pm 5,5 \text{ мОм}$ .

$$u(\delta R_{TX}) = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 0,055}{\sqrt{3}} = \frac{5,5}{\sqrt{3}} = 3,2 \text{ мОм} \quad \frac{\partial R_X}{\partial R_{TX}} = -1$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/ тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$\delta R_{TX}$	0,000 Ом	3,2 мОм	Прямоугольное/В	1,0	3,2 мОм

# ЗНАЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C - \delta R_{TX}$$

Измерения электрического сопротивления ( $r_C$ ):

$$r_C = 1 + \frac{\delta R_X - \delta R_S}{R}$$

Измерения электрического сопротивления ( $r_C$ ): необходимо учесть относительную разность показаний электрического сопротивления из-за систематических воздействий, таких как паразитные напряжения и чувствительность мультиметра ( $\delta R_{Xrel}$  и  $\delta R_{Srel}$ ), которые оцениваются в пределах  $\pm 0,5 \times 10^{-6}$  для каждого отсчета.

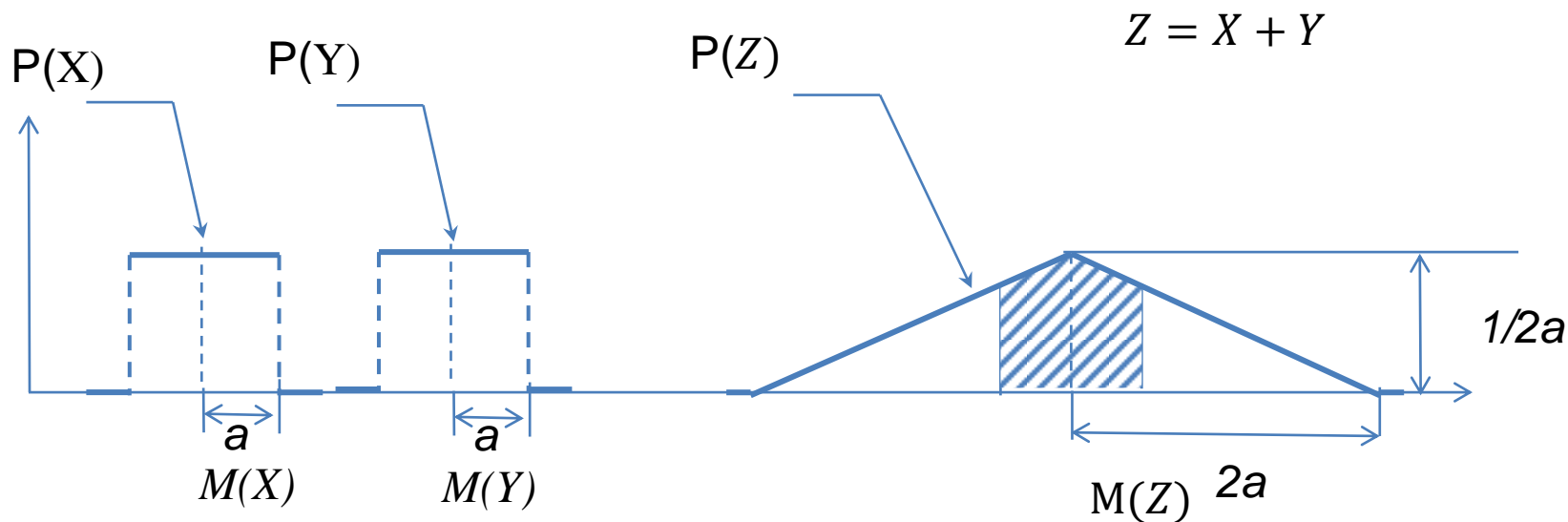
$$u_{rel}(\delta R) = \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 0,29 \cdot 10^{-6}$$

При условии, что  $u(\delta R_X) = u(\delta R_S) = u(\delta R)$ , относительная стандартная неопределенность поправочного коэффициента  $r_C$  определяется выражением:

$$\begin{aligned} u(r_C)_{rel} &= \sqrt{\frac{u(\delta R_X)^2}{R^2} + \frac{u(\delta R_S)^2}{R^2}} = \sqrt{2} \frac{u(\delta R)}{R} = \sqrt{2} u_{rel}(\delta R) = \\ &= \sqrt{2} \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} = 0,41 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

# КОМПОЗИЦИЯ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

К распределению по закону Симпсона приводит сложение двух случайных величин, подчиненных закону равной вероятности при одинаковых параметрах рассеяния.



Результирующее распределение для отношения  $Z$  треугольное с математическим ожиданием  $M(Z)=M(X)+M(Y)$

$$u(Z) = \frac{2a}{\sqrt{6}}$$

$$Z = \frac{X + Y}{2}$$

$$u(Z) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

# ЗНАЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C - \delta R_{TX}$$

Измерения электрического сопротивления ( $r_C$ ):

$$r_C = 1 + \frac{\delta R_X - \delta R_S}{R}$$

Измерения электрического сопротивления ( $r_C$ ): необходимо учесть относительную разность показаний электрического сопротивления из-за систематических воздействий, таких как паразитные напряжения и чувствительность мультиметра ( $\delta R_{Xrel}$  и  $\delta R_{Srel}$ ), которые оцениваются в пределах  $\pm 0,5 \times 10^{-6}$  для каждого отсчета.

Результирующее распределение для отношения  $r_C$  треугольное с математическим ожиданием 1,000 000 0 и пределами  $\pm 1,0 \times 10^{-6}$ .

$$u(r_C)_{rel} = \frac{1,0 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{6}} = 0,41 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\partial R_X}{\partial r_C} = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/ тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$r_C$	1,000 000 0	$0,41 \times 10^{-6}$	Треугольное/В	$(R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r$	

# ЗНАЧЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

№	Наблюдаемое отношение
1	1,000 010 4
2	1,000 010 7
3	1, 000 010 6
4	1,000 010 3
5	1,000 010 5

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

**Измерения ( $r$ ):** проводятся пять наблюдений для записи отношения  $r$ :

Среднее арифметическое:

$$\bar{r} = 1,0000105$$

Экспериментальное стандартное отклонение:

$$s(r) = \sqrt{\frac{(r_i - \bar{r})^2}{n - 1}} = 0,158 \cdot 10^{-6}$$

Стандартная неопределенность:

$$u(r) = s(\bar{r}) = \frac{0,158 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{5}} = 0,0707 \cdot 10^{-6}$$

Параметр $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/тип оценивания	Коэффициент чувствительности $c_i$	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$r$	1,000 010 5	$0,07 \times 10^{-6}$	Нормальное/А	$(R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C$	

# БЮДЖЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

$$R_x = (R_s + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/ тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$R_s$	10 000,053 Ом	2,5 мОм	Нормальное/В	$r_C r$	
$\delta R_D$	0,020 Ом	5,8 мОм	прямоугольное/В	$r_C r$	
$\delta R_{TS}$	0,000 Ом	1,6 мОм	прямоугольное/В	$r_C r$	
$\delta R_{TX}$	0,000 Ом	3,2 мОм	прямоугольное/В	1,0	
$r_C$	1,000 000 0	$0,41 \times 10^{-6}$	треугольное/В	$(R_s + \delta R_D + \delta R_{TS}) r$	
$r$	1,000 010 5	$0,07 \times 10^{-6}$	нормальное/А	$(R_s + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C$	
$R_x$		-	-	-	

Расширенная неопределенность:

$$U = k \times u(R_x) =$$

# БЮДЖЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

$$R_x = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C r - \delta R_{TX}$$

Входная величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей/ тип оценивания	Коэффициент чувствительности $ c_i $	Вклад неопределенности $u_i(y)$
$R_S$	10 000,053 Ом	2,5 мОм	Нормальное/В	$r_C r = 1$	2,5 мОм
$\delta R_D$	0,020 Ом	5,8 мОм	прямоугольное/В	$r_C r = 1$	5,8 мОм
$\delta R_{TS}$	0,000 Ом	1,6 мОм	прямоугольное/В	$r_C r = 1$	1,6 мОм
$\delta R_{TX}$	0,000 Ом	3,2 мОм	прямоугольное/В	1,0	-3,2 мОм
$r_C$	1,000 000 0	$0,41 \times 10^{-6}$	треугольное/В	$(R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r = 10^4$ Ом	4,1 мОм
$r$	1,000 010 5	$0,07 \times 10^{-6}$	нормальное/А	$(R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) r_C = 10^4$ Ом	0,7 мОм
$R_x$	10 000, 178 Ом	-	-	-	8,37 мОм

Расширенная неопределенность:

$$U = k \times u(R_x) = 2 \times 8,37 \text{ мОм} \cong 17 \text{ мОм}$$

**Окончательные результаты:** измеренное значение резистора номиналом 10 кОм, при температуре измерения 23 °С и силой тока 100 мкА составляет  $(10\,000,178 \pm 0,017) \text{ Ом}$