



Метрология, стандартизация и сертификация

Калеев Дмитрий Вячеславович
кафедра ВТ

Лекции 7
«Класс точности СИ. Нормирование инструментальной
погрешности»





Класс точности средств измерений – это обобщенная характеристика СИ, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а так же другими свойствами СИ, влияющими на точность.

Предел допускаемой погрешности СИ – наибольшая (без учета знака) погрешность, при которой СИ может быть признано годным и допущено к применению

$$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; (1,6 \cdot 10^n); 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; (3 \cdot 10^n); 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n;$$

$$n = 1, 0, -1, -2 \dots$$



Формула для определения пределов допускаемой погрешности	Примеры пределов	Обозначение класса точности		Примечание
		В документе	На средстве измерения	
$\Delta = \pm ay$	-	Класс точности М	М	аддитивная
$\Delta = \pm(ay + by_k)$	-	Класс точности С	С	мультипликативная
$\gamma = \Delta y / y_k$	1,0	Класс точности 1,0	1,0	Преобладает аддитивная погрешность
$\gamma = \Delta L / L_p$	0,5	Класс точности 0,5	$\sphericalangle 0,5$	Преобладает аддитивная погрешность (шкала)
$\delta = \Delta / y$	1,5	Класс точности 1,5	$\bigcirc 1,5$	Преобладает мультипликативная погрешность
$\delta = c + d(y_k / y - 1)$	0,15/0,1	Класс точности 0,15/0,1	0,15/0,1	Аддитивная и мультипликативная погрешность



Расположение нулевой отметки	Виды шкалы	Нормирующее значение при характеристике шкалы	
		Равномерном, практически равномерном	Существенно неравномерном (степенные, логарифмические, гиперболические)
На краю диапазона		y_{\max}	$l_{\text{шк}}$
Вне диапазона измерений		$y_{\max} - y_{\min}$	$l_{\text{раб}}$
Внутри диапазона измерений		$ y_{\max} $	$l_{\text{шк}}$
Условный ноль		$ y_2 - y_1 $	-
Установленное значение		$y_{\text{ном}}$	-



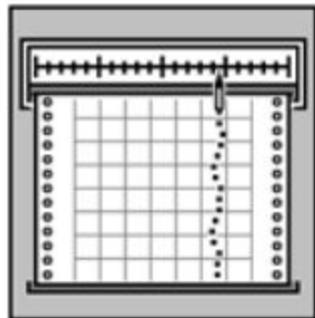
а.

1,5



б.

С

 $a = 0,005;$ $b = 0,005$ 

в.

5

а) Аналоговый мультиметр.

Диапазон измерений: 0..300 В

Класс точности: 1,5

Дополнительная погрешность:

«=основная на каждые 10°C» до +50°C

б) Цифровой мультиметр.

Диапазон измерений: 0..400 В

Класс точности: С, значения коэф. 0,005

Дополнительная погрешность:

«= половина основной на каждые 10°C»

до +50°C

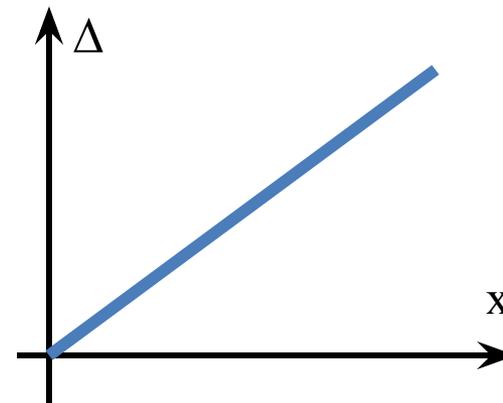
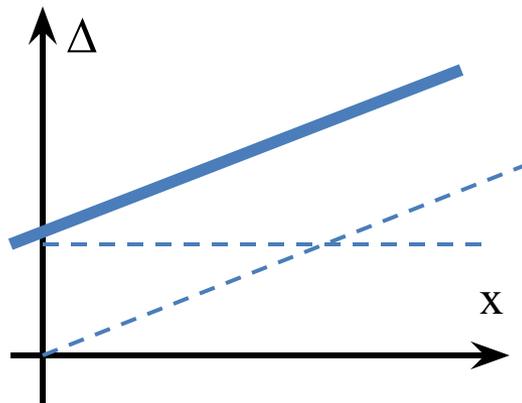
в) Аналоговый самопишущий вольтметр.

Диапазон измерений: 0..500 В

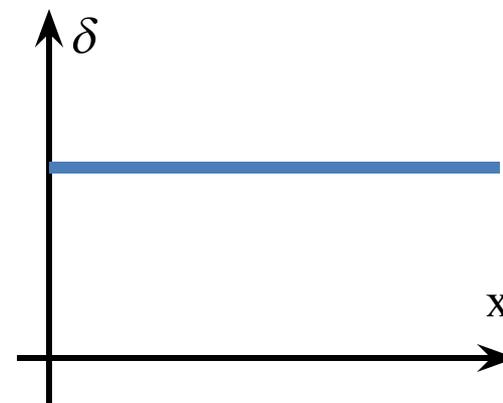
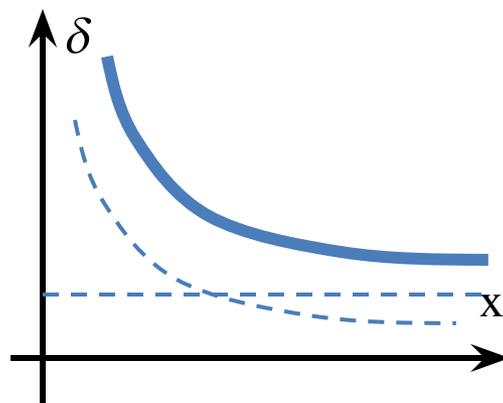
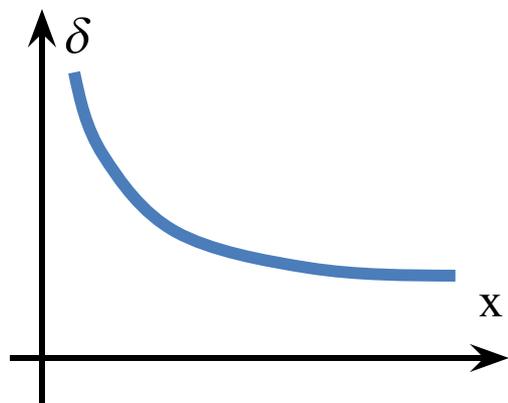
Класс точности: 5



Абсолютная погрешность



Относительная погрешность



a)

б)

в)



Измеряемая величина: напряжение электрической сети;

Диапазон измеряемых действующих значений: 170...260 В

Номинальная частота: 50 Гц

Полоса частот исследуемого напряжения: 2 кГц

Температура при проведении эксперимента: +30...35°C

Прибор А.



Предельное значение основной абсолютной погрешности:

$$\Delta = \frac{\gamma \cdot x_{\text{к}}}{100\%} = \pm \frac{1,5\% \cdot 300 \text{ В}}{100\%} = \pm 4,5 \text{ В}$$

Предельное значение основной относительной погрешности:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{\text{min}}} = \pm \frac{4,5 \text{ В}}{170 \text{ В}} \cdot 100\% = \pm 2,65 \%$$



Дополнительная (температура) абсолютная погрешность:

$$\Delta_{dt} = \Delta \frac{t_{\max} - t_{\text{н}}}{10^{\circ}\text{C}} = \pm 4,5 \frac{35 - 20}{10} = \pm 6,75 \text{ В}$$

Суммарная абсолютная погрешность:

$$\Delta_{\Sigma} = \pm 11,25 \text{ В}$$

Предельное значение суммарной относительной погрешности:

$$\delta_{\Sigma} = \pm 6,61\%$$



Прибор Б.



Предельные значения основной абсолютной погрешности:

$$\begin{aligned}\Delta &= \pm(ax + bx_k) = \pm(0,005x + 0,005x_k) = \\ &= \pm(0,005x + 0,005 \cdot 400)\end{aligned}$$

$$\Delta_{\min} = \pm 2,85 \text{ В}$$

$$\Delta_{\max} = \pm 3,3 \text{ В}$$

Дополнительная (температура) абсолютная погрешность:

$$\Delta_{\max dt} = \frac{1}{2} \Delta_{\max} \frac{t_{\max} - t_{\text{н}}}{10^{\circ}\text{C}} = \pm 0,5 \frac{3,3 \cdot 15}{10} = \pm 2,48 \text{ В}$$

$$\Delta_{\min dt} = \frac{1}{2} \Delta_{\min} \frac{t_{\max} - t_{\text{н}}}{10^{\circ}\text{C}} = \pm 0,5 \frac{2,8 \cdot 15}{10} = \pm 2,1 \text{ В}$$



Суммарная абсолютная погрешность:

$$\Delta_{\Sigma \max} = \pm 5,78 \text{ В}$$

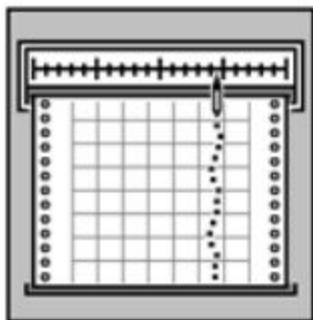
$$\Delta_{\Sigma \min} = \pm 4,9 \text{ В}$$

Суммарная относительная погрешность:

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\Sigma \max}}{x_{\max}} = \pm 2,22 \%$$

$$\delta_{\min} = \frac{\Delta_{\Sigma \min}}{x_{\min}} = \pm 2,88 \%$$

Прибор В.



Предельное значение основной абсолютной погрешности:

$$\Delta = \frac{\delta \cdot x_{\max}}{100\%} = \pm \frac{5\% \cdot 260 \text{ В}}{100\%} = \pm 13 \text{ В}$$



$$\Delta = \Delta_{os} * \overset{o}{\Delta}_o * \overset{o}{\Delta}_H * \sum_1^n \Delta_{ci} * \Delta_d$$

Две модели инструментальной

погрешности согласно ГОСТ 8.009-84

$$\Delta = \Delta_o * \sum_1^n \Delta_{ci} * \Delta_d$$

Разница между действительной и
номинальной функции
преобразования

$$\Delta = y_d - y_H$$

$$\delta = \frac{\Delta}{y_d}$$

Относительная и приведенные

погрешности

$$\gamma = \frac{\Delta}{y_K}$$

$$(\Delta = \delta) \parallel (\Delta = \gamma) \text{ iff } : (\Delta = \Delta_{os}) \parallel (\Delta = \Delta_o)$$



Расчетное нормирование погрешностей измерительных преобразователей

$$y_{\text{н}} = f(a_{1\text{н}}, a_{2\text{н}}, \dots, a_{n\text{н}}, x_{\text{д}})$$

$$a_{1\text{д}} = a_{1\text{н}} \pm \Delta a_1$$

⊠

$$a_{n\text{д}} = a_{n\text{н}} \pm \Delta a_n$$

$$y_{\text{д}} = f(a_{1\text{д}}, a_{2\text{д}}, \dots, a_{n\text{д}}, x_{\text{д}}) + \Delta y_{\text{а}}$$

$$\Delta = y_{\text{д}} - y_{\text{н}} = \Delta y_{\text{м}} + \Delta y_{\text{а}}$$



$$dy = \frac{\partial y_{\text{H}}}{\partial a_1} da_1 + \frac{\partial y_{\text{H}}}{\partial a_2} da_2 + \dots + \frac{\partial y_{\text{H}}}{\partial a_n} da_n$$

$$\Delta y = \frac{\partial y_{\text{H}}}{\partial a_1} \Delta a_1 + \frac{\partial y_{\text{H}}}{\partial a_2} \Delta a_2 + \dots + \frac{\partial y_{\text{H}}}{\partial a_n} \Delta a_n$$

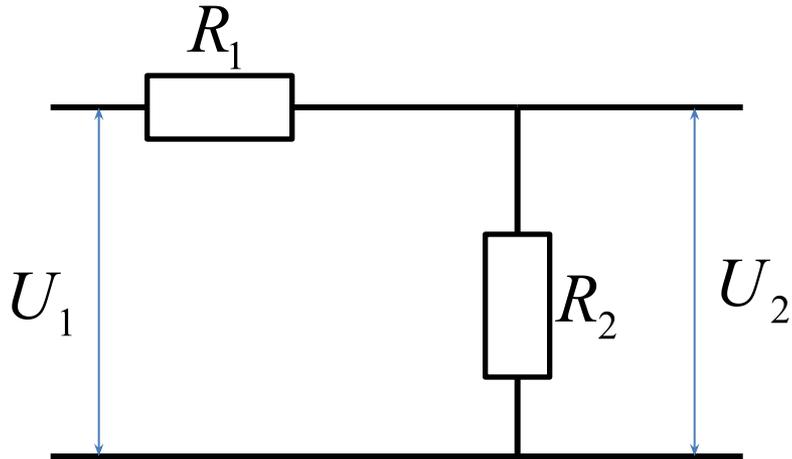
$$\delta = \frac{\Delta}{y_{\text{д}}}$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{y_{\text{к}}}$$

$$\delta = \frac{\Delta y_{\text{м}} + \Delta y_{\text{а}}}{y_{\text{H}}}$$

$$\delta_1 = \frac{\Delta y_{\text{м1}} + \Delta y_{\text{а}}}{y_{\text{H1}}} = c + d \left(\frac{y_{\text{к}}}{y_{\text{H1}}} - 1 \right)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta y_{\text{м2}} + \Delta y_{\text{а}}}{y_{\text{H2}}} = c + d \left(\frac{y_{\text{к}}}{y_{\text{H2}}} - 1 \right)$$



$$U_{2\text{H}} = \frac{R_{2\text{H}}}{R_{1\text{H}} + R_{2\text{H}}} U_1$$

$$R_{1\text{Д}} = R_{1\text{H}} \pm \Delta R_1$$

$$R_{2\text{Д}} = R_{2\text{H}} \pm \Delta R_2$$

$$\Delta U_2 = \pm \frac{\partial}{\partial R_1} \left(\frac{R_{2\text{H}}}{R_{1\text{H}} + R_{2\text{H}}} \right) \Delta R_1 U_1 \pm \frac{\partial}{\partial R_2} \left(\frac{R_{2\text{H}}}{R_{1\text{H}} + R_{2\text{H}}} \right) \Delta R_2 U_1$$

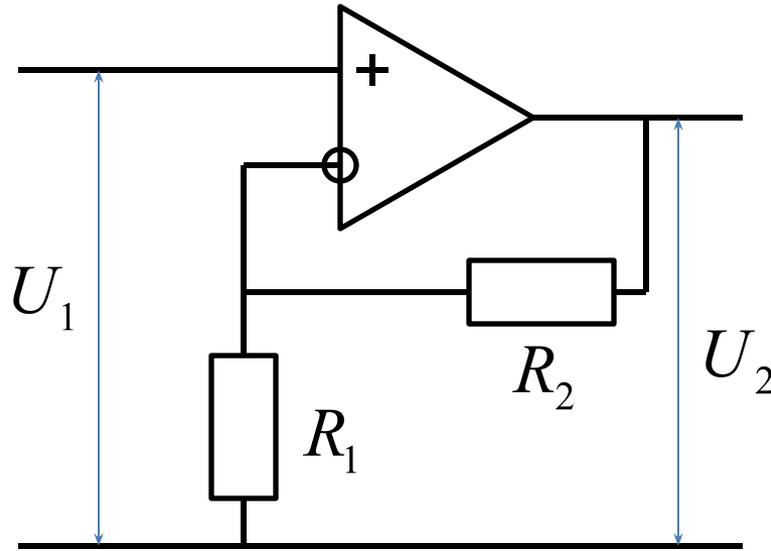
$$\Delta U_2 = \pm \frac{R_{2\text{H}}}{(R_{1\text{H}} + R_{2\text{H}})^2} \Delta R_1 U_1 \pm \frac{R_{1\text{H}}}{(R_{1\text{H}} + R_{2\text{H}})^2} \Delta R_2 U_1$$



$$\delta = \pm \frac{\Delta R_1}{R_{1H}} \pm \frac{\Delta R_2}{R_{2H}}$$

$$\delta = \frac{R_{1H}}{R_{1H} + R_{2H}} \sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_{2H}}\right)^2}$$

$$\pm \Delta U_2 = \delta U_2$$



$$U_{2H} = kU_1$$

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

$$R_{1д} = R_{1H} \pm \Delta R_1$$

$$R_{2д} = R_{2H} \pm \Delta R_2$$

$$k_{д} = \frac{R_{2д} + \Delta R_{2д}}{R_{1д} + \Delta R_{1д}}$$

$$k_H = \frac{R_{2H}}{R_{1H}} + 1$$

$$\text{iff } R_{2H} \ll R_{1H} : k_H = \frac{R_{2H}}{R_{1H}}$$

$$\Delta k_{д} = k_H - k_{д} = k_H \left(\frac{\Delta R_1}{R_{1H}} \pm \frac{\Delta R_2}{R_{2H}} \right)$$

$$\delta = \frac{\Delta k}{k_H} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_{1H}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_{2H}} \right)^2}$$



Расчетное нормирование погрешностей средств измерения

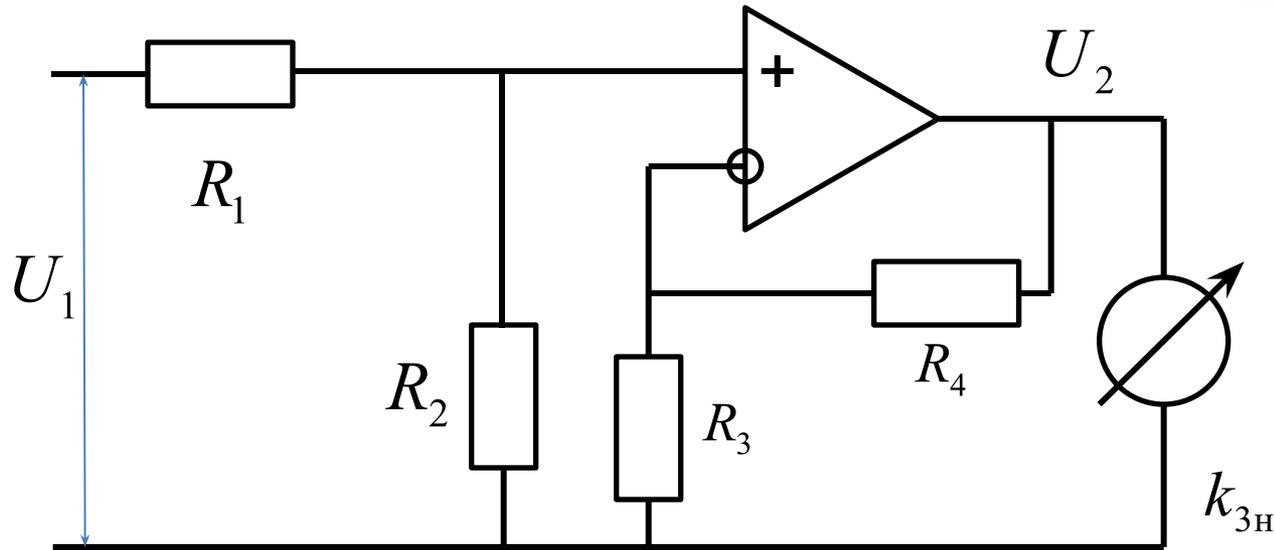
$$y_{\text{н}} = k_{1\text{н}} k_{2\text{н}} \dots k_{n\text{н}} x_{\text{д}} = k_{\text{н}} x_{\text{д}}$$

$$y_{\text{н}} = (k_{1\text{д}} \pm \Delta k_1)(k_{2\text{д}} \pm \Delta k_2) \dots (k_{n\text{д}} \pm \Delta k_n) x_{\text{д}} = k_{\text{д}} x_{\text{д}}$$

$$dy = \frac{\partial k}{\partial k_1} dk_1 x_{\text{д}} + \frac{\partial k}{\partial k_2} dk_2 x_{\text{д}} + \dots + \frac{\partial k}{\partial k_n} dk_n x_{\text{д}}$$

$$\Delta y = \frac{\partial k_{\text{н}}}{\partial k_1} \Delta k_1 x_{\text{д}} + \frac{\partial k_{\text{н}}}{\partial k_2} \Delta k_2 x_{\text{д}} + \dots + \frac{\partial k_{\text{н}}}{\partial k_n} \Delta k_n x_{\text{д}}$$

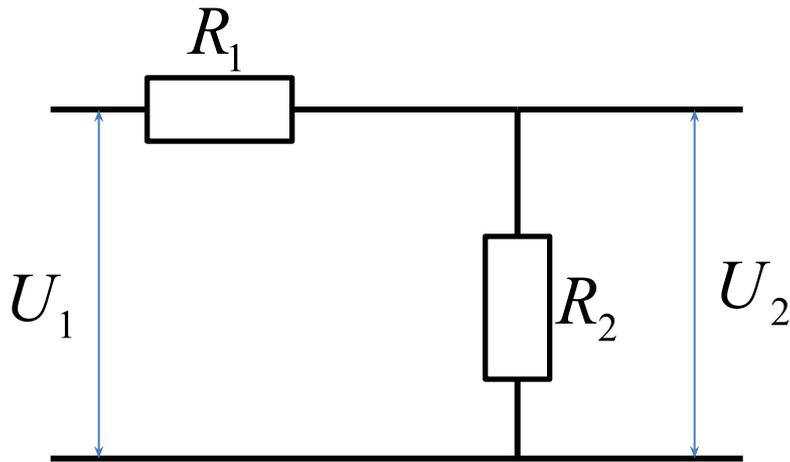
$$\delta = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial k_{\text{н}}}{\partial k_1} \frac{\Delta k_1}{k_{\text{н}}} + \frac{\partial k_{\text{н}}}{\partial k_2} \frac{\Delta k_2}{k_{\text{н}}} + \dots + \frac{\partial k_{\text{н}}}{\partial k_n} \frac{\Delta k_n}{k_{\text{н}}}$$



$$k_{1H} = \frac{R_{2H}}{R_{1H} + R_{2H}} \quad k_{2H} = \frac{R_{4H}}{R_{3H}} + 1 \quad k_H = k_{1H} k_{2H} k_{3H}$$

$$\delta = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial k_H}{\partial k_{1H}} \frac{\Delta k_1}{k_H} + \frac{\partial k_H}{\partial k_{2H}} \frac{\Delta k_2}{k_H} + \frac{\partial k_H}{\partial k_{3H}} \frac{\Delta k_3}{k_H} = \frac{\Delta k_1}{k_{1H}} + \frac{\Delta k_2}{k_{2H}} + \frac{\Delta k_3}{k_{3H}}$$

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{\Delta k_1}{k_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k_2}{k_{2H}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k_3}{k_{3H}}\right)^2} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}$$



$$U_{2H} = \frac{R_{2H}}{R_{1H} + R_{2H}} U_1$$

$$R_1 = 100 \pm 1 \text{ Ом}$$

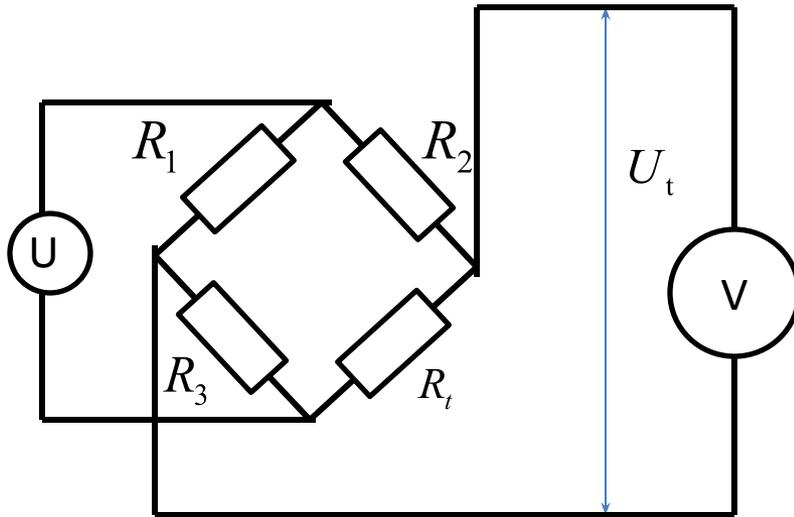
$$R_2 = 200 \pm 2 \text{ Ом}$$

$$\Delta U_2 = \pm \frac{200}{(100 + 200)^2} \cdot 1 \cdot U_1 \pm \frac{100}{(100 + 200)^2} \cdot 2 \cdot U_1$$

$$\delta = \frac{\Delta U_2}{U_{2H}} = \pm \frac{1}{100} \cdot \frac{100}{100 + 200} \pm \frac{2}{200} \cdot \frac{100}{100 + 200} = \pm \frac{1}{300} \pm \frac{1}{300}$$

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{1}{300}\right)^2 + \left(\frac{1}{300}\right)^2} = \frac{1,41}{300} = 0,0047 = 0,47\%$$

0,5



$$U = 100 \text{ В}$$

$$R_1 = R_2 = R = 10^4 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 10^3 \text{ Ом}$$

$$t \in (0 \div 100^\circ\text{C})$$

$$R_t = R_{t0\text{H}} \pm \Delta R_t + (\alpha_t \pm \Delta \alpha_t)t$$

$$R_{t0\text{H}} = R_3 = 10^3 \text{ Ом (iff } t = 0)$$

$$\Delta R_t = 10 \text{ Ом}$$

$$\alpha_t = 2 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$$

$$\Delta \alpha_t = 0,02 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$$



$$t_u = k_\epsilon U_t$$

$$U_t = U_{Rt} - U_3$$

$$t_u = k_\epsilon (U_{Rt} - U_3) = k_\epsilon \left(U \frac{R_t}{R_2 + R_t} - U \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) = k_\epsilon I (R_t - R_3)$$

$$I \cong \frac{U}{R_1} = \frac{U}{R_2} \quad \begin{array}{l} R_1 \gg R_3 \\ R_2 \gg R_t \end{array}$$

$$R_{tH} = R_{t0H} + \alpha_t t = R_3 + \alpha_t t$$

$$R_{tД} = R_3 \pm \Delta R_t + (\alpha_t \pm \Delta \alpha_t) t$$

$$t_{иH} = k_\epsilon I (R_3 + \alpha_t t - R_3) = k_\epsilon I \alpha_t t$$

$$t_{иД} = k_\epsilon I (\alpha_t t \pm \Delta R_t \pm \Delta \alpha_t t)$$



$$\Delta t = k_{\epsilon} I (\pm \Delta R_t \pm \Delta \alpha_t t)$$

Абсолютное значение погрешности

$$\Delta t_a = \pm k_{\epsilon} I \Delta R_t$$

Аддитивная составляющая погрешности

$$\Delta t_m = \pm k_{\epsilon} I \Delta \alpha_t t$$

Мультипликативная составляющая погрешности

$$\Delta t = \pm k_{\epsilon} I (\Delta R_t + \Delta \alpha_t t)$$

Граница абсолютной погрешности

$$\delta t = \frac{\Delta R_t + \Delta \alpha_t t}{\alpha_t t} = c + d \left(\frac{t_{\text{к}}}{t_{\text{ин}}} - 1 \right)$$



$$t = t_K :$$

$$\delta t = \frac{\Delta R_t + \Delta \alpha_t t_K}{\alpha_t t_K} = c = 0,06$$

$$t = 0,5t_K :$$

$$\delta t = \frac{\Delta R_t + 0,5\Delta \alpha_t t_K}{0,5\alpha_t t_K} = c + d = 0,11$$

$$d = 0,05$$

$$\delta t = \frac{10 + 0,02t}{2t}$$

Класс точности: 6/5



Источники

1. Основы метрологии. Бурдун Г.Д.
2. ru.wikipedia.org
3. РМГ 29-99
4. Основы метрологии и электрические измерения. Душин Е.М.