ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТЕСТОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ГРАНИЦ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

О.В. Стрелкова

В статье рассмотрен вопрос уменьшения погрешности измерения температуры, возникающей в результате изменения характеристик чувствительного элемента термометра сопротивления (ТС)в процессе старения, рассматривается возможность применения метода тестовых воздействий (МТВ) [1], для расширения границ использования ТС в процессе эксплуатации.

Отклонение нормируемых характеристик от номинальных значений зависит от условий технологического процесса, от материала чувствительного элемента, от времени эксплуатации. В общем случае, отклонение любого из параметров является случайной величиной. Закон распределения погрешности измерения температуры, обусловленной отклонениями нормируемых характеристик, зависит от законов распределения этих характеристик.

Исследуем закон распределения погрешности измерения температуры на примере медного термометра сопротивления, обладающего линейной зависимостью сопротивления от температуры:

$$R_T = R_0 + \beta T, \qquad (1)$$

где R_T, R_0 – сопротивления термометра при температуре T и 0 °С соответственно; β – параметр, определяющий наклон характеристики.

Через промежуток времени t значения нормированных характеристик ЧЭ термометра R_0 и β изменятся на некоторую неизвестную величину.

Измеренная температура в данном случае:

$$T_{\text{изм}} = \frac{R_T - R^0{}_0}{\beta^0} = \frac{\left[\left(R^0{}_0 + \Delta R\right) + \left(\beta^0 + \Delta\beta\right)T_0\right] - R^0{}_0}{\beta^0} = \frac{\Delta R}{\beta^0} + \frac{\Delta\beta}{\beta^0}T_0 + T_0, \qquad (2)$$

где T_0 – температура среды °С; β^0, $R_0{}^0$ – номинальные значения характеристик; ΔR_0, Δβ – отклонение характеристик от номинальных значений.

Погрешность измерения температуры:

$$\Delta T = T_{\text{изм}} - T_0 = \frac{\Delta R}{\beta^0} + \frac{\Delta\beta T_0}{\beta^0}. \qquad (3)$$

Стандартная методика измерения температуры рассматривает среднее отклонение характеристик набора датчиков за определенный период времени. Принято считать, что для набора датчиков одного типа, работающих в одинаковых условиях, в течение межповерочного интервала отклонения ΔR и Δβ можно рассматривать как случайные величины с нормальным законом распределения МТВ [1], напротив, позволяет оценить текущее зна-

чение характеристики β для конкретного термометра сопротивления в определенный момент времени. Измеренная температура с помощью МТВ:

$$T_{\text{изм}} = \frac{R_T - R^0{}_0}{\beta_{\text{изм}}} = \frac{\left[\left(R^0{}_0 + \Delta R\right) + \beta_{\text{ф}} T_0\right] - R^0{}_0}{\beta_{\text{изм}}}, \tag{4}$$

где $\beta_{\text{изм}}$ – измеренное значение параметра с помощью МТВ; $\beta_{\text{ф}}$ – фактическое значение.

Если погрешность МТВ мала и $\beta_{\text{изм}} \approx \beta_{\text{ф}}$, то исчезает компонент ошибки измерения температуры, связанный с отклонением характеристики β:

$$\Delta T = T_{\text{изм}} - T_0 = \frac{\left[\left(R^0{}_0 + \Delta R\right) + \left(\beta_{\text{изм}} + \Delta_{\text{МТВ}}\right) T_0\right] - R^0{}_0}{\beta_{\text{изм}}} - T_0 =$$

$$= \frac{\Delta R}{\beta_{\text{изм}}} + \frac{\Delta\beta_{\text{МТВ}}}{\beta_{\text{изм}}} T_0 \approx \frac{\Delta R}{\beta_{\text{изм}}}. \tag{5}$$

Применение МТВ целесообразно в диапазоне температур, при которых слагаемое, связанной с отклонением β^0 и измеренной температурой, становится больше слагаемого, связанного с отклонением R_0. Как показано на рис. 1, начиная с некоторой температуры T_1, погрешность МТВ становится меньше погрешности измерения стандартным методом датчика того же класса.

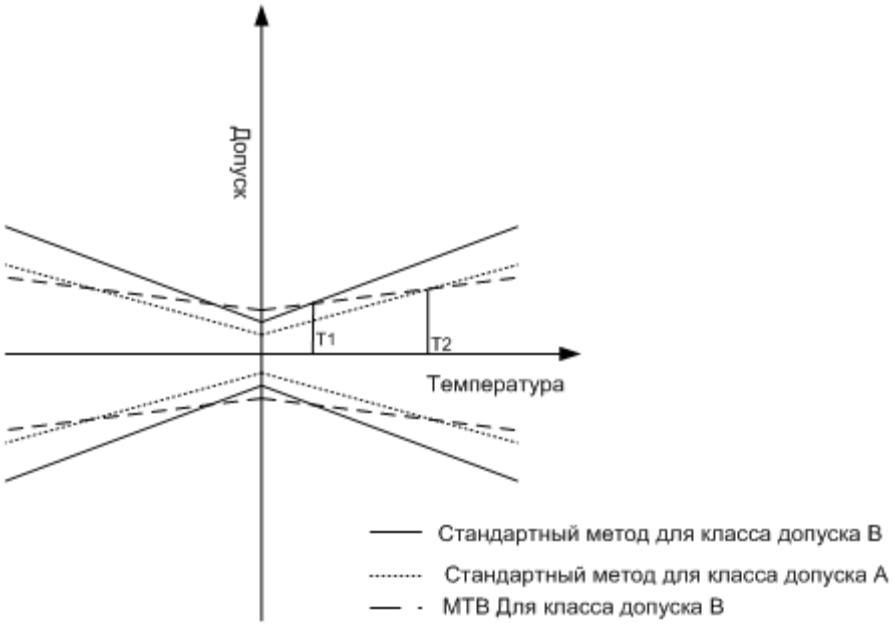

Рис. 1. Зависимость допусков измерения температуры для ТС различных классов и для различных методов

Так как, МТВ предоставляет информацию о наклоне данной зависимости (о коэффициенте *B*), то начиная с определенной температуры T_2, погрешность измерения по МТВ для датчиков более низкого класса допуска

становится меньше погрешности стандартного метода для датчиков более высокого класса. Следовательно, в некотором температурном диапазоне возможно использовать МТВ для повышения класса допуска датчика.

Сравним плотности вероятности распределения (ПВР) погрешности измерения температуры при применении стандартного метода и МТВ для датчиков двух классов.

1. Плотность вероятности распределения погрешности измерения стандартным методом

$$\Delta T = \frac{\Delta R}{\beta^0} + \frac{\Delta\beta T_0}{\beta^0}, \quad z = x + y, \tag{6}$$

где z – искомая функция двух переменных, отображающая погрешность измерения температуры; y – нормально распределенная величина с параметрами $m_y = 0,\ \sigma_y = \frac{\Delta R_{\max}}{3\beta_0}$; x – нормально распределенная величина с параметрами $m_x = 0,\ \sigma_x = \frac{\Delta\beta_{\max}}{3\beta_0} T_0$.

ПВР в стандартном методе – есть величина случайная, нормально распределенная с параметрами $m_{\Delta T} = m_y + m_x = 0,\ \sigma_{\Delta T}{}^2 = (\sigma_x{}^2 + \sigma_y{}^2 + 2\tau\sigma_y\sigma_x)$:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\left(\sigma_x{}^2 + \sigma_y{}^2 + 2\tau\sigma_y\sigma_x\right)}} \cdot e^{\frac{-(z)^2}{2\left(\sigma_x{}^2 + 2\tau\sigma_x\sigma_y + \sigma_y{}^2\right)}}. \tag{7}$$

2. Плотность вероятности распределения погрешности измерения температуры с использованием МТВ

$$\Delta T = \frac{\Delta R_{\max} + \Delta\beta_{\text{МТВ}} T_0}{\beta_{\text{ф}} + \Delta\beta_{\text{МТВ}}}, \quad z = \frac{y}{x}, \tag{8}$$

где z – искомая функция двух переменных, отображающая погрешность измерения температуры; y – нормально распределенная величина с параметрами $m_y = \Delta R_{\max}$, $\sigma_y = \sigma_{\Delta\beta_{\text{МТВ}}} T_0$; x – нормально распределенная величина с параметрами $m_x = \beta_0,\ \sigma_x = \sigma_{\Delta\beta_{\text{МТВ}}}$.

Примем, что: 1) погрешность МТВ есть случайная нормально распределенная величина с параметрами $m_{\Delta\beta_{\text{МТВ}}} = 0,\ \sigma_{\Delta\beta_{\text{МТВ}}}$, 2) $\Delta R = \Delta R_{\max}$, так как МТВ не предоставляет информации об отклонении R_0, 3) $\beta_{\text{ф}} = \beta^0$, так как необходимо оценить $\Delta\beta_{\text{МТВ}}$, а не найти фактическое значение.

Обозначим $\gamma = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{1}{T_0}$. Тогда ПВР погрешности измерения:

$$p(z)=\frac{\gamma\sqrt{1-\tau^2}}{\pi\left(1+z^2\gamma^2-2\tau z\gamma\right)}e^{\frac{m_x{}^2+m_y{}^2\gamma^2-2\tau m_x m_y}{2\left(1-\tau^2\right)\gamma^2\sigma_y{}^2}}+$$

$$+\frac{m_x+zm_y\gamma^2-\tau\left(m_y+zm_x\right)\gamma}{\sqrt{2\pi}\left(1+z^2\gamma^2-2\tau z\gamma\right)^{3/2}\sigma_y}e^{-\frac{\left(zm_x-m_y\right)^2}{2\sigma_y{}^2\left(1+z^2\gamma^2-2\tau z\gamma\right)}}\times$$

$$\times\mathrm{erfc}\left(\frac{\tau\left(m_y+zm_x\right)\gamma-m_x-zm_y\gamma^2}{\sqrt{2\left(1+z^2\gamma^2-2\tau z\gamma\right)\left(1-\tau^2\right)}}\right), \qquad (9)$$

где erfc – дополнительная функция ошибок.

Построим графики ПВР погрешности измерения температурыдля двух медных проволочных ТС с номинальным сопротивлением $R_0 = 100$ Ом классов допуска А и В при использовании стандартного метода и МТВ. Выберем предельные отклонения НСХ согласно ГОСТу [2] для класса допуска А: $\Delta T = \pm 0{,}35$ °С, $\Delta\beta = 8{,}52\cdot 10^{-}4$ Ом/°С, $\Delta R_0 = 6{,}39\cdot 10^{-2}$ Ом; и для В: $\Delta T = \pm 0{,}80$ °С, $\Delta\beta = 2{,}13\cdot 10^{-3}$ Ом/°С, $\Delta R_0 = 1{,}28\cdot 10^{-1}$ Ом.

На рис. 2 показано, что ПВР для датчика класса А шире ПВР для датчика класса В, и что при малых отклонениях нормируемых характеристик графики ПВР датчиков одного класса для стандартного метода и МТВ совпадают. На рис. 3 показано, что в определенном температурном диапазоне [130; 140] °С график дисперсии ПВР для метода МТВ класса допуска В пересекается с ПВР погрешности измерения стандартным методом, а значит, погрешность с помощью МТВ для датчика класса В становится меньше погрешности измерения стандартным методом для датчика класса А.

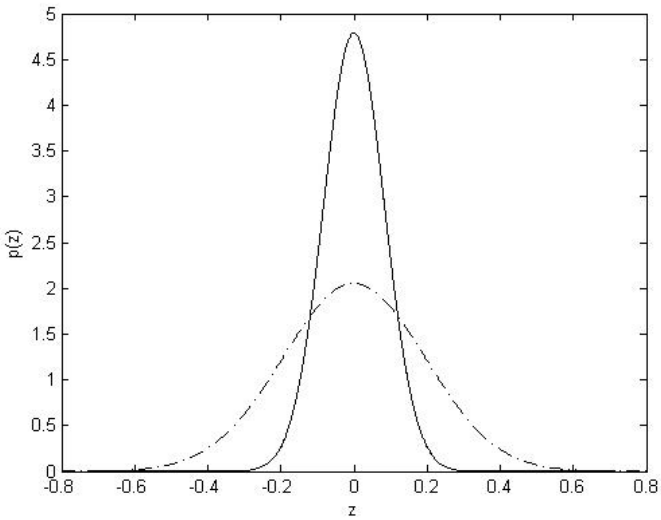

Рис. 2. ПРВ погрешности измерения температуры для ТС класса А (сплошная линия) и класса В (пунктирная) для температуры 100 °С

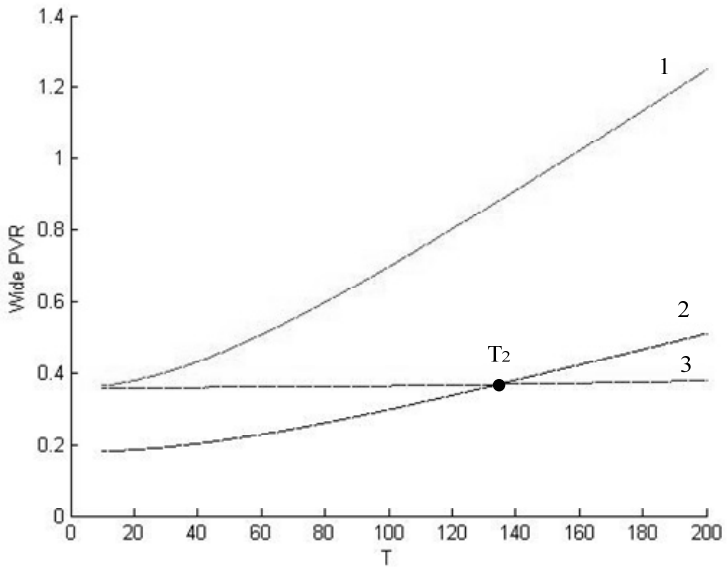

Рис. 3. Зависимость дисперсии ПРВ от температуры:
1 – для стандартного метода датчиком класса допуска В,
2 – датчиком класса А, 3 – датчиком класса В с помощью МТВ

Зависимость для МТВ построена при условии, что погрешность метода не превышает предельно допустимого значения по ГОСТу $\Delta\beta_{\text{МТВ}} = \Delta\beta_0$.

На рис. 4 построена зависимость точки пересечения графиков T_2 от коэффициента уменьшения погрешности: $\Delta\beta_{\text{МТВ}} = \Delta\beta_0 / K$. Снижение погрешности МТВ приводит к расширению температурного диапазона применения метода: нижняя граница диапазона для данного ТС достигается при уменьшении погрешности в 10 раз и находится при температуре T_2 = 130 °С.

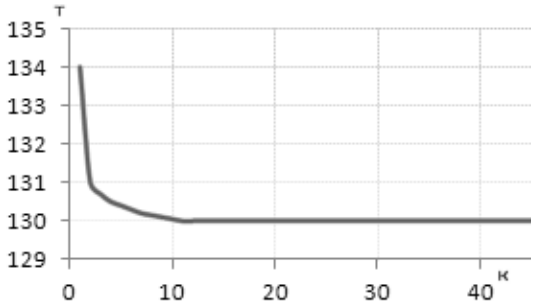

Рис. 4. Зависимости нижней границы диапазона применения МТВ от коэффициента уменьшения погрешности метода для датчика класса В

Таким образом, МТВ позволяет использовать датчик более низкого класса допуска как датчик более высокого класса при погрешности метода меньшей допустимого отклонения параметра β_0 в определенном диапазоне температур. В статье рассмотрен случай расширения границ использования медного проволочного ТС класса допуска В с номинальным сопротивлением R_0 =100 Ом как датчика класса А при применении МТВ в диапазоне температур [130; 200] °С.

Библиографический список

1. Стрелкова, О.В. Алгоритм оценки состояния термопреобразователя сопротивления с использованием тестовых воздействий / О.В. Стрелкова, А.Л. Шестаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 8. – № 17 (117). –С. 68–71.

2. ГОСТ 8.625–2006. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля.