

## МЕТОД САМОДИАГНОСТИКИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

*М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков*

## METHOD OF THE ON-LINE SELF-DIAGNOSTIC OF THE RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR

*M.D. Belousov, A.L. Shestakov*

В статье предлагается алгоритм самодиагностики в процессе работы преобразователя термосопротивления, предложенного в статье [1].

*Ключевые слова:* термопреобразователь, термосопротивление, самодиагностика, производная сопротивления.

The article offers the algorithm of self-diagnostic in operation of the converter of thermo resistance offered in the article [1].

*Keywords:* thermal converter, thermo resistance, self-diagnostic, resistance derivate.

Преобразователи температуры на базе термосопротивления (преобразователи термосопротивления) широко применяются для измерения температуры благодаря высокой точности измерения. Типичная схема термопреобразователя приведена в книгах [2, 3]. Также известен термопреобразователь на термосопротивлениях по схеме, приведённой в статье [1].

В настоящее время актуальной задачей является реализация функций самодиагностики в измерительных приборах, позволяющая повысить метрологическую надёжность в процессе эксплуатации.

Задачей данной работы является нахождение возможности практической реализации функций самодиагностики термопреобразователя, приведённого в статье [1] за счёт обработки дополнительной информации о состоянии терморезисторов на основе использования производной сопротивления терморезисторов по температуре.

### 1. Схема измерения

Схема измерения взята из статьи [1]. Рассматриваемая схема отличается от исходной в статье: вместо источника напряжения (ИН) в используется источник опорного тока ИОТ. ИОТ накладывает следующее ограничение: величина тока между предыдущим ( $i-1$ ) измерением и текущим ( $i$ ) измерением напряжений на  $R_{Tч1}$  и  $R_{Tч2}$  не должна изменяться.

Структурная схема исследуемого преобразователя температуры приведена на рис. 1.

Здесь МК – микроконтроллер, ИОТ – источник опорного тока, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь,  $R_{Tч1}$ ,  $R_{Tч2}$  – термочувствительные сопротивления. Температуры обоих термосопротивлений совпадают и равны измеряемой температуре. Очевидно, что для повышения точности измерения характеристики зависимости сопротивлений от температуры у обоих термосопротивлений должны максимально отличаться друг от друга.

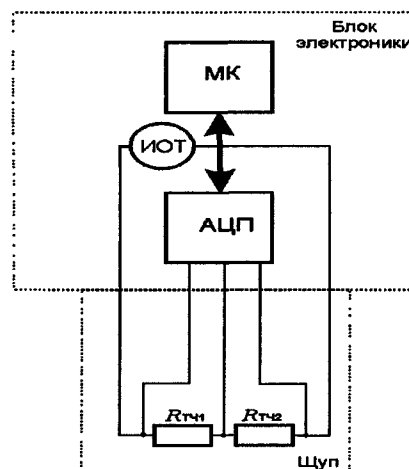


Рис. 1. Структурная схема преобразователя термосопротивления

В качестве функции, зависящей от температуры, используется отношение значений напряжений на термосопротивлениях:

**Белоусов Михаил Дмитриевич** – соискатель ученой степени при кафедре информационно-измерительной техники ЮУрГУ, инженер-испытатель отдела эталонов давления ЗАО «ПГ «Метран»; m...o@mail.ru.

**Шестаков Александр Леонидович** – д.т.н., профессор, ректор ЮУрГУ; admin@urc.ac.ru.

**Belousov Mikhail Dmitrievich** – degree-seeking student at information-measuring techniques department of SUSU, test engineer of pressure standard department of ZAO «Metran Industrial Group» (joint stock company); m...o@mail.ru.

**Shestakov Alexander Leonidovich** – PhD, professor, rector of SUSU; admin@urc.ac.ru.

$$X(T) = U_{R_{Tч1}}(T) / U_{R_{Tч2}}(T), \quad (1)$$

где  $T$  – измеряемая температура,  $X(T)$  – некоторая функция. Пренебрегая значениями входного тока АЦП, можно записать:

$$X(T) = R_{Tч1}(T) / R_{Tч2}(T). \quad (2)$$

При этом  $X(T)$  не является функцией тока, протекающего через резисторы.

В качестве чувствительных элементов предлагается использовать никелевые и платиновые терморезисторы. Характеристики для терморезисторов из платины и никеля, производства фирмы Advanced Thermal Products [4], приведены ниже.

Для платины в температурном диапазоне  $-200 \dots +600$  °C зависимость сопротивления от температуры определяется выражением из [4]:

$$\begin{cases} R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)), & T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \\ R_T = R_0(1 + AT + BT^2), & T > 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ;  $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$ .

Для никеля, в температурном диапазоне  $-100 \dots +250$  °C зависимость сопротивления от температуры определяется выражением из [4]:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + DT^4 + FT^6), \quad (4)$$

где  $A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ;  $D = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$ ;  $F = -2 \cdot 10^{-17} \text{ } ^\circ\text{C}^{-6}$ . Примем, что в дальнейшем к коэффициентам уравнения (3) добавляем индекс «п» (платина), а к коэффициентам уравнения (4) добавляем индекс «н» (никель). Выражение (2), используя (3), (4), запишем в виде:

$$X(T) = \frac{R_{0н} \cdot (1 + A_n T + B_n T^2 + D_n T^4 + F_n T^6)}{R_{0п} \cdot (1 + A_p T + B_p T^2 - 100C_p T^3 + C_p T^4)}. \quad (5)$$

Здесь и далее  $C_n$ , согласно выражению (3) при  $T < 0$  и равно нулю при  $T \geq 0$ . График функции  $X(T)$  представлен на рис. 2.

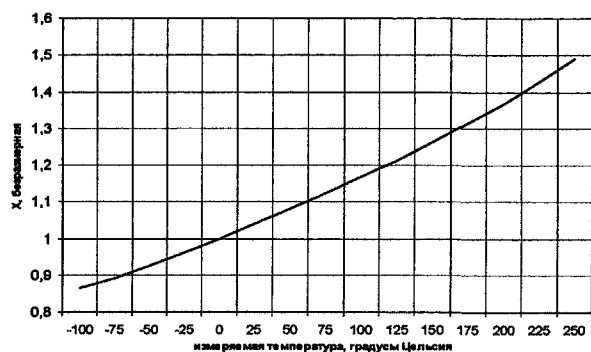


Рис. 2. Зависимость отношений сопротивлений никель/платина от температуры

Измерив напряжения на платиновом и никелевом терморезисторах и подставив их в формулу (1), получается значение величины  $X$  для данного измерения, подставив полученное  $X$  в выражение (5), рассчитывается измеренная температура  $T$ . Уравнение (5) не имеет аналитического решения, но может быть решено численными методами. Данную температуру в дальнейших преобразованиях обозначим как  $T_1$ .

## 2. Самодиагностика неисправности в процессе работы

При любых измерениях температуры, как при установившемся, так и при неустановившемся процессе, практически всегда есть некоторое изменение температуры от времени между измерениями. В свою очередь эти изменения температуры вызывают соответствующие изменения сопротивлений и напряжений на сопротивлениях (рис. 3).

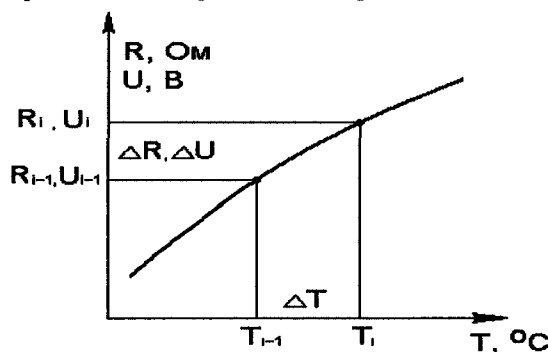


Рис. 3. Изменения переменных термопреобразователя

Здесь  $T_i$  – температура при  $i$ -м измерении температуры,  $T_{i-1}$  – температура в  $(i-1)$ -й точке измерения,  $\Delta T$  – приращение температуры между этими измерениями. В свою очередь  $\Delta T$  вызывает приращение сопротивления  $\Delta R$ , и напряжения  $\Delta U$  на терморезисторе. Проведём следующие преобразования с отношением приращений напряжений на сопротивлениях  $\Delta U_n / \Delta U_p$  (ток – константа):

$$\frac{\Delta U_n}{\Delta U_p} = \frac{I \Delta R_n}{I \Delta R_p} = \frac{\Delta R_n}{\Delta R_p} = \frac{\Delta R_n / \Delta T}{\Delta R_p / \Delta T} \approx \frac{R'_n |_T}{R'_p |_T}. \quad (6)$$

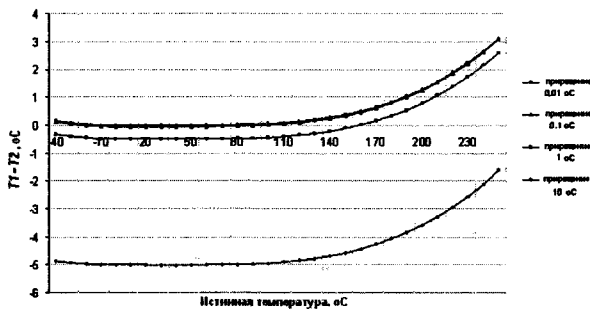
Взяв производные по температуре от (3) и (4) и подставив их в (6), получим:

$$\frac{\Delta U_n}{\Delta U_p} \approx \frac{R_{0н}}{R_{0п}} \cdot \frac{A_n + 2B_n T + 4D_n T^3 + 6F_n T^5}{A_p + 2B_p T - 300C_p T^2 + 4C_p T^3}. \quad (7)$$

Левая часть уравнения (7) вычисляется из результатов измерения, правая часть является функцией от температуры. С помощью уравнения (7) можно рассчитать измеренную температуру, независимо от (5). Уравнение (7), также, как и уравнение (5) не имеет аналитического решения, но также может быть решено численными методами. Данную температуру в дальнейших преобразованиях обозначим как  $T_2$ .

Таким образом, имеются два результата измерения температуры, вычисленные по разным физическим зависимостям. Их разность будет характеризовать погрешность измерительного прибора – на котором сделаны эти измерения. Графики зависимости разности температур  $T_1$  и  $T_2$ , при различных приращениях температуры  $\Delta T$  приведены на рис. 4.

Нелинейность графиков при измеряемых температурах больше 100 °C вызвана главным образом нелинейностью зависимости никелевого сопротивления при этих температурах. Чтобы избежать подобных величин погрешностей вычисления температуры, предлагается следующее решение.



**Рис. 4. Зависимости разности температур ( $T_1 - T_2$ ) от истинной температуры при различных приращениях температуры**

Входными данными являются  $U_{ni}$  и  $U_{pi}$  – напряжения на никелевом и платиновом сопротивлении в  $i$ -е измерение,  $U_{ni-1}$  и  $U_{pi-1}$  – напряжения на никелевом и платиновом сопротивлении в  $(i-1)$ -е измерение. Из (5) рассчитываются температуры  $T_i$ ,  $T_{i-1}$  – температуры в  $i$ -е и  $(i-1)$ -е измерение. Зная их, из (3) и (4) рассчитываются сопротивления  $R_{ni}$ ,  $R_{ni-1}$  – расчетные значения сопротивления никелевого резистора в  $i$ -е и  $(i-1)$ -е измерение температуры,  $R_{pi}$ ,  $R_{pi-1}$  – расчетные значения сопротивления платинового резистора в  $i$ -е и  $(i-1)$ -е измерение температуры.

Под расчётным значением сопротивления понимается значение сопротивления терморезистора, которое теоретически задаётся измеренной температурой и уравнениями (3) или (4) без учета изменения коэффициентов полиномов сопротивлений, возникающих в процессе эксплуатации. Таким образом можно вычислить отношение расчетных приращений сопротивлений  $\Delta R_{ni}/\Delta R_{pi}$  по формуле (8):

$$\Delta R_{ni}/\Delta R_{pi} = (\Delta R_{ni} - \Delta R_{ni-1}) / (\Delta R_{pi} - \Delta R_{pi-1}). \quad (8)$$

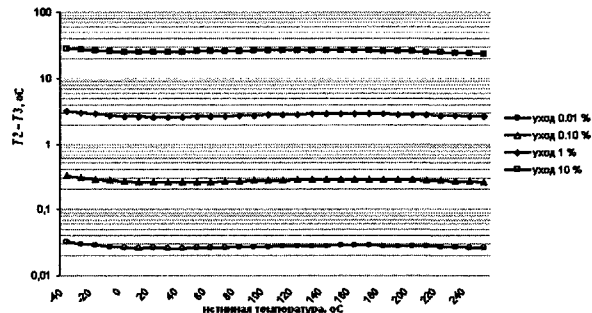
Исходя из выражения (6) приращение сопротивлений на резисторах между измерениями строго равно приращению напряжений на резисторах между измерениями. Подставив полученное значение  $\Delta R_{ni}/\Delta R_{pi}$  в формулу (7) вместо  $\Delta U_{ni}/\Delta U_{pi}$ , можно еще раз рассчитать значение температуры, которую в дальнейших преобразованиях обозначим как  $T_3$ .

Когда текущие зависимости сопротивления терморезисторов от температуры абсолютно точно описываются заранее заданными коэффициентами полиномов уравнений (3), (4), то величины  $\Delta U_{ni}/\Delta U_{pi}$  и  $\Delta R_{ni}/\Delta R_{pi}$  совпадают настолько, насколько точно они были рассчитаны численными методами вычислений. Соответственно и температуры  $T_2$  и  $T_3$  будут одинаковы с точностью их вычисления. При эксплуатации термопреобразователя происходит изменение зависимости сопротивления сенсоров от температуры и, как следствие, изменение истинных коэффициентов полиномов. Это приведёт к появлению разницы температур  $T_2$  и  $T_3$ , что и будет являться критерием самодиагностики термопреобразователя.

На рис. 5 показаны графики разности температур  $T_2$  и  $T_3$ , при уходе (увеличении) коэффициента  $R_{0n}$  на 0,01, 0,1, 1 и 10 %.

Графики на рис. 5 рассчитаны при величине приращения температуры между измерениями  $\Delta T$  равной 1 °C.

Предложенное решение позволяет не только полностью устранить погрешности, отображенные на рис. 4, но и использовать предлагаемый алгоритм самодиагностики при любых приращениях температуры между измерениями, не превышающими диапазон измерений термопреобразователя.



**Рис. 5. Зависимость разности температур  $T_2$  и  $T_3$  при уходе коэффициента  $R_{0n}$**

Для диагностики термопреобразователя необходимо задаться некоторым критерием  $d$ , например

$$d = T_2 - T_3 \quad (9)$$

или

$$d = (\Delta R_{ni}/\Delta R_{pi}) / (\Delta U_{ni}/\Delta U_{pi}), \quad (10)$$

выход которого за некоторые пределы будет рассматриваться как неисправность термопреобразователя.

Значение допустимых пределов критерия  $d$  необходимо уточнить по практической реализации термопреобразователя – в реальной эксплуатации дополнительное приращение  $d$  будет обусловлено дополнительными факторами, как-то: электромагнитные помехи, погрешности измерения напряжений в термопреобразователе и т.п.

### Заключение

Возможность практической реализации функций самодиагностики неисправности термопреобразователя сопротивлений в процессе работы, приведённого в статье [1] достигнута за счёт обработки дополнительной информации о состоянии терморезисторов с помощью предлагаемой математической модели на основе использования производной сопротивления терморезисторов по температуре.

### Литература

1. Белоусов, М.Д. Преобразователь температуры без опорного сопротивления / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 7, № 3(103). – С. 29–33.
2. Измерение температур в технике / Под ред. Ф. Линевега. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
3. Измерения в промышленности: справочное издание; кн. 2 / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с.
4. Resistance Temperature Detectors (RTD's). – Режим доступа: <http://www.atpsensor.com/pdfs/rtid.pdf>, свободный.

Поступила в редакцию 12 декабря 2008 г.