

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

В статье рассматривается общепринятая схема термоэлектрического преобразователя, предлагается схема термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами и алгоритм нахождения температуры с помощью такой схемы, предлагаются алгоритмы оценки состояния термоэлектрических преобразователей в процессе работы для данных схем с помощью частных производных термоЭДС по температуре спаев, на основе параметра метрологического состояния d .

Ключевые слова: термоэлектрические преобразователи, термопары, производные термоЭДС по температуре, оценка состояния, параметр метрологического состояния.

Введение

Термоэлектрические преобразователи (термопары) находят широкое применение в качестве чувствительных элементов термометров благодаря возможности контактного измерения высоких температур. В данной работе рассматривается общепринятая схема термометра на основе термоэлектрического преобразователя, предлагается схема с двумя термоэлектрическими преобразователями, рассматриваются возможные варианты оценки состояния данных схем в процессе работы.

1. Оценка состояния

термоэлектрического преобразователя для общепринятой схемы измерения

Упрощенная общепринятая функциональная схема измерения термометра на основе термоэлектрического преобразователя приведена на рис. 1.

Холодный спай термопары в процессе эксплуатации подвергается либо термостабилизации, либо его температура измеряется отдельным термопреобразователем. Результирующая ЭДС термопары равна разности контактных потенциалов спаев [1]:

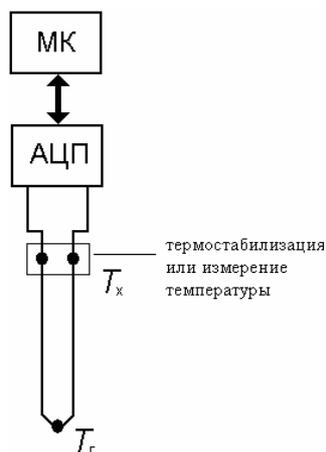
$$\varepsilon(T_r, T_x) = \varepsilon_r(T_r) - \varepsilon_x(T_x), \quad (1)$$

где ε – термоЭДС термопары, ε_r – термоЭДС горячего спаев, ε_x – термо ЭДС холодного спаев.

Зависимости $\varepsilon(T)$ определяются ГОСТом [2]. Вид функций $\varepsilon_r(T)$ и $\varepsilon_x(T)$ идентичен, они различаются независимыми аргументами T_r и T_x . ТермоЭДС $\varepsilon(T)$ в диапазоне измерения температур являются определенными, непрерывными, ограниченными, монотонно возрастающими, не имеющими точек излома функциями

от одной переменной, представленной в ГОСТе [2] степенными полиномами. Это позволяет эффективно решать уравнение (1) относительно T_r самыми простыми численными методами. Измерив значения ε , T_x и подставив их в формулу (1), рассчитывают искомую температуру T_r . Как правило, $\varepsilon(T)$ представляет из себя полином степени, большей 6, поэтому уравнение (1) решается численными методами.

Важной задачей является оценка состояния термопреобразователей в процессе работы, определяемой уходом параметров или возникновением неисправности сенсора. Оценка состояния возможна с помощью введения дополнительно к уравнению (1) уравнения связи физических величин термоэлектрического преобразователя на основании частных производных термоЭДС по температуре горячего и холодного спаев.



МК – микроконтроллер, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, T_r – температура горячего спаев (измеряемая температура), T_x – температура холодного спаев.

Рисунок 1. Упрощенная общепринятая функциональная схема термометра на основе термоэлектрического преобразователя

Приращение функции $\varepsilon(T_r, T_x)$ можно записать в виде (2):

$$\Delta\varepsilon \approx \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_r} \cdot \Delta T_r + \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_x} \cdot \Delta T_x. \quad (2)$$

При каждом измерении, после измерения текущих значений T_r и T_x , из предыдущих измерений подбирается i -е измерение с точно такой же температурой горячего спая (3):

$$T_r = T_{ri}. \quad (3)$$

Поскольку при вычислении температуры используется микроЭВМ и все данные измерений заносятся в оперативную память, то возможно найти предыдущее измерение, с большой точностью удовлетворяющее уравнению (3).

При этом температуры холодных спаев текущего и выбранного значения по формуле (3) измерений не должны совпадать (4):

$$\Delta T_x = T_x - T_{xi} \neq 0. \quad (4)$$

С учетом формул (3) и (4) формула (2) после преобразований приобретает следующий вид:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T_x} \approx \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_x}. \quad (5)$$

Уточнить приблизительное равенство (5) возможно путем вычисления значения производной в точке T_{xcp} – средней точке между T_x и T_{xi} (6):

$$T_{xcp} = \frac{T_x + T_{xi}}{2}. \quad (6)$$

С учетом этого формулу (5) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T_x} \cong \left. \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_x} \right|_{T_x = T_{xcp}}. \quad (7)$$

Такой метод повышения точности при численном дифференцировании широко известен и описан, например, в работе [3]. Математическое моделирование показало его достаточную эффективность в рамках поставленной задачи.

Температура холодного спая термопары, как правило, измеряется с помощью термометра сопротивлений и может обладать возможностью собственной оценки состояния, описанной, например, в работе [4]. Поэтому температуру T_x в данной задаче можно рассматривать как истинную. На основании формулы (7) можно ввести следующий параметр метрологического состояния d :

$$d = \frac{\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T_x}}{\left. \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_x} \right|_{T_{xcp}}}, \quad (8)$$

Значение знаменателя формулы (8) определяется коэффициентами полинома термопары (1) согласно ГОСТ [2] и одинаково для всех экземпляров термопар одного вида. Значение числителя определяется измеренными значениями температуры холодного спая и термоЭДС. Приращение термоЭДС, в свою очередь, определяется реальными коэффициентами полиномов термопары (1). Поэтому близость величины параметра d к единице характеризует малость величины погрешности измерения истинной T_r .

На рисунке 2 приведены зависимости параметра d от приращения температуры холодного спая для термопары типа К (хромель – алюмель). Неисправность имитируется выбором случайной реализации ухода по нормальному закону всех коэффициентов полинома $\varepsilon(T)$ с единичным математическим ожиданием и СКО, равным 10^{-6} , пропорционально величине коэффициента. Случайным образом выбрана реализация, при которой величина истинной погрешности температуры соизмерима с допустимой погрешностью согласно ГОСТу [2]. Параметр метрологического состояния d рассчитан при истинных температурах $T_r = 800$ °С, $T_x = 50$ °С.

Рисунок 2 наглядно иллюстрирует, что выбранный параметр метрологического состояния d практически не зависит от приращения температуры между измеренными текущим значением T_x и подобранным значением T_{xi} при разнице между ними менее 10 °С.

Предлагаемый вариант оценки состояния потребует использования в блоке электроники термопреобразователя более производительной микроЭВМ и дополнительный объем оперативной памяти порядка нескольких десятков – сотен мегабайт. При каждом измерении в оперативную память заносятся: термоЭДС ε_r , измеренная температура горячего спая T_r , измеренная температура холодного спая T_{xi} .

2. Оценка состояния термопреобразователя с двумя термопарами

Функциональная схема термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами приведена на рис. 3.

Температуры T_r и T_x можно найти из системы уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(T_r, T_x) = \varepsilon_{r1}(T_r) - \varepsilon_{x1}(T_x) \\ \varepsilon_2(T_r, T_x) = \varepsilon_{r2}(T_r) - \varepsilon_{x2}(T_x), \end{cases} \quad (9)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – термоЭДС термопар 1 и 2, $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$ – термоЭДС горячего спая термопар 1 и 2, $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}$ – термоЭДС холодного спая термопар 1 и 2. Очевидно, что для существования решения системы уравнений (9) должны выполняться неравенства (10):

$$\begin{cases} \varepsilon_1(T) \neq \varepsilon_2(T) \\ T_r \neq T_x \end{cases} \quad (10)$$

Для успешной практической реализации в условиях шумов и погрешностей измерения термоЭДС потребуется подбор термопар с максимально различными друг от друга зависимостями $\varepsilon(T)$ согласно ГОСТу [2].

Существует возможность нахождения решения T_r и T_x системы уравнений (9) аналитическим методом, описанным в [5]. Этот метод сводит задачу отыскания общих корней двух многочленов от двух переменных к нахождению корней результата (одного многочлена от одной переменной). Однако поскольку многочлены, входящие в выражение (9), для распространенных типов термопар согласно ГОСТу [2] обычно

представляют из себя полиномы от 8-й до 12-й степени, то выражение для результата в таком случае будет представлять из себя определитель размера от 16x16 до 24x24. Элементами этого определителя будут многочлены от одной переменной также 8–12-й степени. Ясно, что вычисление этого определителя и уж тем более дальнейшее нахождение его корней (многочлена до 288-й степени) на практике неосуществимо.

Поэтому неизвестные T_r и T_x целесообразно сразу находить численными методами, описанными в [6], например методом Ньютона. Алгоритм вычисления температур приведен на рис. 4.

В данном алгоритме T_{rmin}, T_{rmax} – границы диапазона измерения температур горячего спая, T_{xmin}, T_{xmax} – границы диапазона измерения температур холодного спая, $\varepsilon T_{rmin}, \varepsilon T_{rmax}$ – допустимые расчетные погрешности температур, их величины целесообразно брать на 1–2 порядка меньше, чем общая допустимая погрешность термометра, $\varepsilon_r, \varepsilon_x$ – измеренные значения ЭДС на термопарах 1 и 2. При этом $W(T_r, T_x)$ – матрица Якоби [5]:

$$W(T_r, T_x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_r} & \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_r} \\ \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_x} & \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_x} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$W^{-1}(T_r, T_x)$ – обратная матрица Якоби [5]:

$$W^{-1}(T_r, T_x) = \frac{1}{\det W(T_r, T_x)} \begin{pmatrix} \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_x} & \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_x} \\ \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_r} & \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_r} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где: $\det W(T_r, T_x)$ – определитель матрицы (11), ERR_r, ERR_x – поправки температуры горячего и холодного спая соответственно.

Решить задачу оценки состояния рассматриваемого термоэлектрического преобразователя возможно введением дополнительного параметра метрологического состояния d . Оценка состояния возможна на основе введения в модель работы термопреобразователя зависимостей частных производных термоЭДС термопар по температурам горячего и холодного спаев, дающим до-



Рисунок 2. Зависимость метрологического параметра d от приращения температуры холодного спая

полнительное уравнение связи физических параметров термопреобразователя. Получим параметр метрологического состояния d .

После измерения текущих значений T_r и T_x из предыдущих измерений подбирается i -е измерение с точно такой же температурой холодного спая:

$$T_x = T_{xi}. \quad (13)$$

Поскольку при вычислении температуры используется микроЭВМ и все данные измерений заносятся в оперативную память, то возможно найти предыдущее измерение, с большой точностью удовлетворяющее уравнению (13).

При этом температуры горячих спаев текущего и подобранного по формуле (13) измерений не должны совпадать:

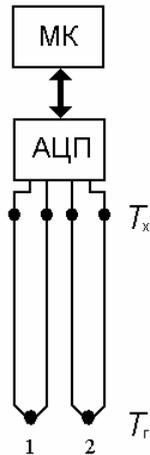
$$\Delta T_r = T_r - T_{ri} \neq 0. \quad (14)$$

Таким образом, с учетом (13) и (14) формулу (2) для каждой из термопар можно записать в виде:

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta T_r} \approx \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_r}, \quad (15)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta T_r} \approx \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_r}. \quad (16)$$

Рассмотрим отношение приращений термоЭДС термопар и представим его в следующем виде:



1,2 – две термопары различных типов. Температура горячего спая термопары 1 совпадает с температурой горячего спая термопары 2, температура холодного спая термопары 1 совпадает с температурой холодного спая термопары 2. В отличие от предыдущей схемы здесь не требуется термостабилизации или измерения температуры холодного спая.

Рисунок 3. Функциональная схема термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами

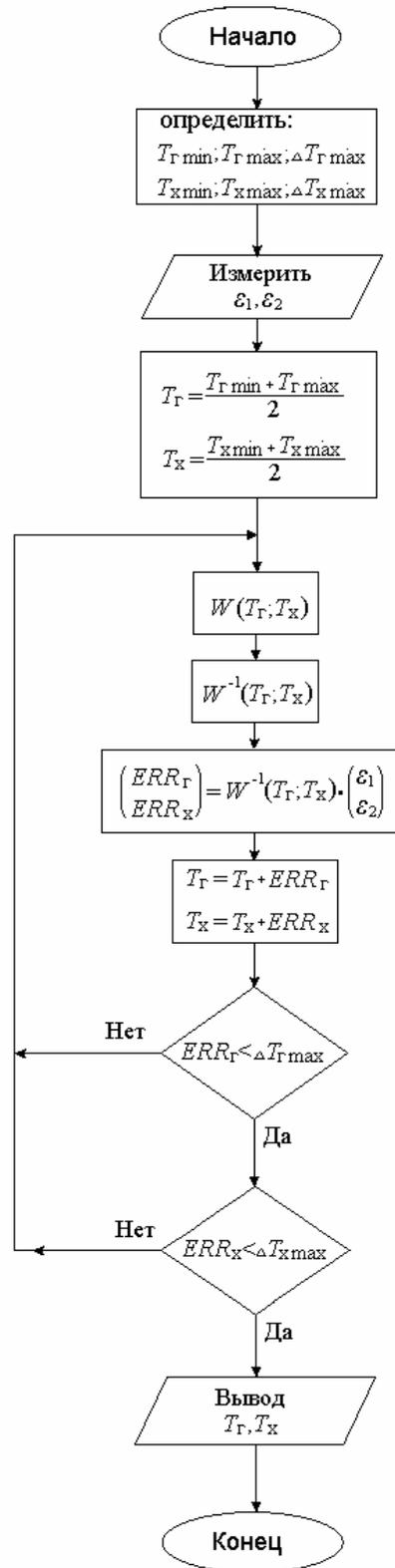


Рисунок 4. Алгоритм вычисления температур схемы термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta \varepsilon_2} = \frac{\frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta T_r}}{\frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta T_r}} \approx \frac{\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_r}}{\frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_r}} \Bigg|_{T = T_{гр}} \quad (17)$$

где под приращениями термоЭДС и температур понимаются их разности между текущим и выбранным *i*-м измерением, а $T_{гр}$ определяется аналогично выражению (6):

$$T_{гр} = \frac{T_r + T_{ri}}{2} \quad (18)$$

На основании формулы (17) аналогично формуле (8) можно ввести следующий критерий метрологического состояния *d*:

$$d = \frac{\frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta \varepsilon_2}}{\left(\frac{\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_r}}{\frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_r}} \right) \Bigg|_{T_r = T_{гр}}} \quad (19)$$

Значение знаменателя формулы (19) определяется номинальными коэффициентами полиномов термопар уравнения (9) согласно ГОСТу [2] и одинаково для всех экземпляров термопар одного типа. Значение числителя определяется реальными коэффициентами полиномов термопар уравнения (9). Поэтому близость величины параметра *d* к единице характеризует малость величины погрешности измерения искомой T_r .

На рисунке 5 рассмотрена зависимость критерия метрологического состояния *d* от приращения температуры холодного спая для термопар типа *K* (хромель – алюмель) и *L* (хромель – копель) при наличии и отсутствии ухода параметров термопар. Погрешность имитируется выбором случайной реализации ухода по нормальному закону всех коэффициентов полиномов $\varepsilon_K(T)$, $\varepsilon_L(T)$ с единичным математическим ожиданием и СКО, равным 10^{-6} , пропорционально величине коэффициента. Случайным образом выбрана реализация, при которой величина истинной погрешности температуры соизмерима с допустимой погрешностью согласно ГОСТу [2]. Параметр метрологического состояния *d* рассчитан при истинных температурах $T_r = 800^\circ\text{C}$, $T_x = 50^\circ\text{C}$

Рисунок 5 наглядно иллюстрирует, что выбранный параметр метрологического состояния *d* практически не зависит от приращения температуры между измеренными текущим значением T_r и подобранным значением T_{ri} при разнице между ними менее 10°C .

Предлагаемый вариант оценки состояния схемы термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами также потребует использования более производительной микроЭВМ и дополнительного объема оперативной памяти порядка нескольких десятков – сотен мегабайт.

При каждом *i*-м измерении в оперативную память заносится: ε_{ri} – термоЭДС термопары 1, ε_{2i} – термоЭДС термопары 2, T_{ri} – измеренная температура горячих спаев, T_{xi} – измеренная температура холодных спаев.

параметр метрологического состояния *d* в случае наличия и отсутствия неисправности (вариант с двумя термопарами) при T_r ист 800 оС, T_x ист 50 оС

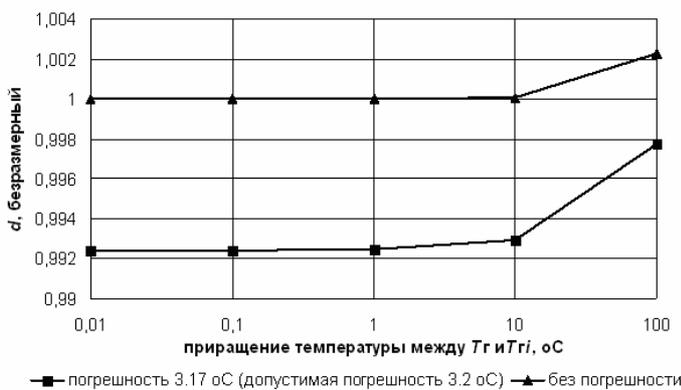


Рисунок 5. Зависимость параметра метрологического состояния *d* от приращения температуры горячего спая

Заключение

В работе показана возможность оценки состояния термоэлектрического преобразователя в процессе работы за счет обработки дополнительной информации о состоянии термопар с помощью предлагаемой математической модели на основе использования частных производных термоЭДС от температур спаев термопар.

Взаимосвязь параметра метрологического состояния *d* с погрешностью термоэлектрического преобразователя необходимо уточнить из дальнейших исследований.

Список литературы:

1. Олейник Б.Н. Приборы и методы температурных измерений / Б.Н. Олейник, С.И. Лаздрин, В.П. Лаздрин, О.М. Жагулло – М.: Изд – во стандартов, 1987. – 296 с., с илл.
2. ГОСТ Р 8.585-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования.
3. А.А. Самарский, А.В. Гулин. Численные методы: Учебное пособие для вузов.–М.Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1989.– 432 с.
4. М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков. Метод самодиагностики термопреобразователя сопротивлений в процессе работы// Вестник Южно – Уральского Государственного Университета. Серия компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2009. – №3(136), стр. 17 – 19.
5. Курош А.Г. Курс высшей алгебры издание девятое/А.Г. Курош. – М.:Наука, 1968. – 431 с.
6. Волков Е.А. Численные методы: Учеб. Пособие для вузов.–2-е изд., испр.–М.:Наука.Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.–248 с.

Сведения об авторах: Белоусов М.Д., инженер кафедры информационно-измерительной техники Южно-Уральского государственного университета, директор ООО «Авангард – ЮУрГУ».
Шестаков А.Л., ректор, заведующий кафедрой информационно-измерительной техники Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы

Belousov M.D., Shestakova A.L.

THE ESTIMATION OF THE STATES OF THERMOELECTRIC CONVERTERS IN THE WORK PROCESS

The authors examined the conventional scheme of thermoelectric converter, and offered the scheme of thermoelectric converter with two thermocouples and the algorithm of the presence of temperature with the help of this diagram, the algorithms of the estimation of the state of thermoelectric converters in the process of work for the data of diagrams with the help of partial derivative thermal EDS according to the temperature of joints, on the basis of the parameter of metrological state d

The key words: thermoelectric converters, thermocouple, the derivatives of thermal EDS according to the temperature, the estimation of state, the parameter of metrological state.

References:

1. Oleynik BN Instruments and methods of temperature measurement / BN Oleinik, SI Lazdrina, VP Lazdrin, OM Zhagullo - Moscow: - in the standards, 1987. - 296. With illus.
2. GOST R 8.585-2001 State system for ensuring uniformity of measurements. Thermocouple. Nominal statistical characteristics of the transformation.
3. AA Samara, A. Gulin. Numerical Methods: A manual for vuzov.-M.Nauka. Ch. Ed. nat. Math. lit., 1989 .- 432 sec.
4. MD Belousov, AL Shestakov. The method of self RTD in the process // Journal of the South - Ural State University. A series of computer technology, control, electronics. - 2009. - № 3 (136), p. 17 -19.
5. Kurosh AG Course of Higher Algebra Ninth Edition / A.G. Kurosh. - Moscow: Nauka, 1968. - 431.
6. Volkov EA Numerical Methods: A Textbook. Handbook for vuzov.-2-e ed. Ispr.-M.: Nauka.Gl. Ed. Sci. lit., 1987.-248 with.