

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков

STATE ESTIMATION OF THE THERMOELECTRIC CONVERTERS DURING ACTIVE PHASE OF WORK

M.D. Belousov, A.L. Shestakov

Рассматривается общепринятая схема термоэлектрического преобразователя, предлагаются схема термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами и алгоритм нахождения температуры с помощью такой схемы, а также 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: термоэлектрический преобразователь, оценка состояния, термопара, производная термоЭДС по температуре, параметр метрологического состояния.

The paper formulates the algorithm of temperature measuring for thermoelectric converter based on classical scheme. Algorithms of the state estimation for thermoelectric converters during active phase of work based on the described scheme using junction thermo EMF partial derivatives, on the basis of metrological state parameter d are proposed.

Keywords: thermoelectric converter, state estimation, thermocouple, thermo EMF temperature derivative, metrological state parameter.

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

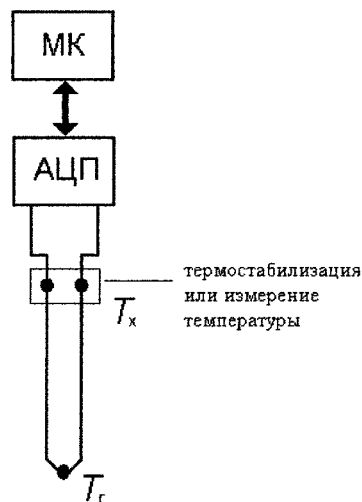


Рис. 1. Функциональная схема термометра

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

Белоусов Михаил Дмитриевич – инженер кафедры информационно-измерительной техники ЮУрГУ; m_o@mail.ru

Шестаков Александр Леонидович – д-р техн. наук, профессор, ректор ЮУрГУ; admin@urc.ac.ru

Belousov Mikhail Dmitrievich – engineer of the Equipment for information and measuring department of SUSU; m_o@mail.ru

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

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

где ε – термоЭДС термопары, ε_r – термоЭДС горячего спая, ε_x – термоЭДС холодного спая.

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 определёнными, 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.

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

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

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:

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

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 подобранного значения по формуле (3) измерений не должны совпадать:

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

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 путём вычисления значения производной в точке $T_{x\text{ср}}$ – средней точке между T_x и T_{xi} :

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

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

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T_x} \approx \left. \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_x} \right|_{T_x = T_{x\text{ср}}}. \quad (7)$$

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 сопротивления 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 :

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

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 искомой T_r .

На рис. 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 ГОСТ [2]. Параметр метрологического состояния d рассчитан при истинных температурах $T_r = 800^\circ\text{C}$, $T_x = 50^\circ\text{C}$.

Рис. 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°C .

Предлагаемый вариант оценки состояния потребует использование в блоке электроники термопреобразователя более производительную микроЭВМ и дополнительный объём оперативной памяти порядка нескольких десятков–сотен мегабайт. При каждом измерении в оперативную память заносятся: термоЭДС ε , измеренная темпера-



Рис. 2. Зависимость метрологического параметра d от приращения температуры холодного сая

тура горячего сая $T_{г}$, измеренная температура холодного сая $T_{х}$.

2. Оценка состояния термопреобразователя с двумя термопарами

Функциональная схема термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами приведена на рис. 3, где 1, 2 – две термопары различных типов. Температура горячего сая термопары 1 совпадает с температурой горячего сая термопары 2, температура холодного сая термопары 1 совпадает с температурой холодного сая термопары 2. В отличие от предыдущей схемы здесь не требуется термостабилизации или измерения температуры холодного сая.

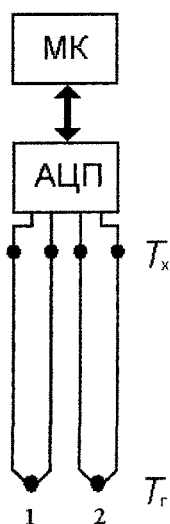


Рис. 3. Функциональная схема термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами

Температуры $T_{г}$ и $T_{х}$ можно найти из системы уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(T_{г}, T_{х}) = \varepsilon_{г1}(T_{г}) - \varepsilon_{х1}(T_{х}); \\ \varepsilon_2(T_{г}, T_{х}) = \varepsilon_{г2}(T_{г}) - \varepsilon_{х2}(T_{х}), \end{cases} \quad (9)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – термоЭДС термопары 1; $\varepsilon_{г1}, \varepsilon_{г2}$ – термоЭДС горячего сая термопар 1 и 2, $\varepsilon_{х1}; \varepsilon_{х2}$ – термоЭДС холодного сая термопар 1 и 2. Очевидно, что для существования решения системы уравнений (9) должны выполняться неравенства (10):

$$\begin{cases} \varepsilon_1(T) \neq \varepsilon_2(T); \\ T_{г} \neq T_{х}. \end{cases} \quad (10)$$

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 $T_{г}$ и $T_{х}$ 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 собой полиномы от 8 до 12 степени, то выражение для результата в таком случае будет представлять собой определитель размером от 16×16 до 24×24 . Элементами этого определителя будут многочлены от одной переменной также 8–12 степени. Ясно, что вычисление этого определителя, и уж тем более дальнейшее нахождение его корней (многочлена до 288-й степени) на практике неосуществимо.

Поэтому неизвестные $T_{г}$ и $T_{х}$ целесообразно сразу находить численными методами, описанными в [6], например методом Ньютона. Алгоритм вычисления температур приведен на рис. 4.

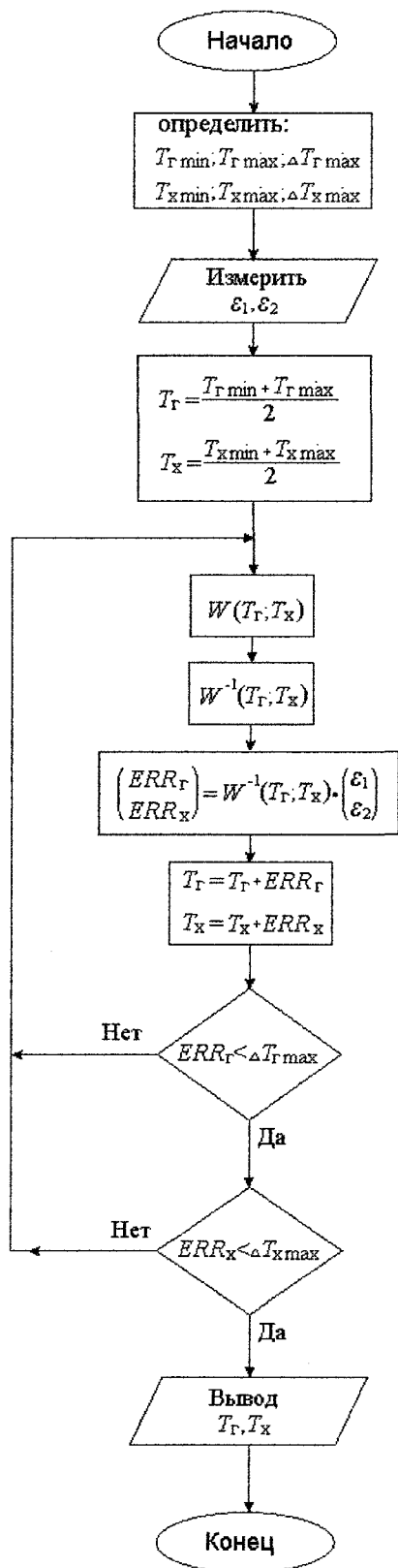


Рис. 4. Алгоритм вычисления температур схемы термоэлектрического преобразователя с двумя термопарами

В данном алгоритме (см. рис. 4) $T_{Г \min}$, $T_{Г \max}$ – границы диапазона измерения температур горячего спая; $T_{Х \min}$, $T_{Х \max}$ – границы диапазона измере-

ния температур холодного спая; $\Delta T_{Г \min}$, $\Delta T_{Г \max}$ – допустимые расчетные погрешности температур, их величины целесообразно брать на 1–3 порядка меньше, чем общая допустимая погрешность термометра; ϵ_1 , ϵ_2 – измеренные значения ЭДС на термопарах 1 и 2; $W(T_{Г}, T_{Х})$ – матрица Якоби [5]:

$$W(T_{Г}, T_{Х}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \epsilon_1}{\partial T_{Г}} & \frac{\partial \epsilon_2}{\partial T_{Г}} \\ \frac{\partial \epsilon_1}{\partial T_{Х}} & \frac{\partial \epsilon_2}{\partial T_{Х}} \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$W^{-1}(T_{Г}, T_{Х})$ – обратная матрица Якоби [5]:

$$W^{-1}(T_{Г}, T_{Х}) = \frac{1}{\det W(T_{Г}, T_{Х})} \begin{pmatrix} \frac{\partial \epsilon_2}{\partial T_{Х}} & \frac{\partial \epsilon_1}{\partial T_{Х}} \\ \frac{\partial \epsilon_2}{\partial T_{Г}} & \frac{\partial \epsilon_1}{\partial T_{Г}} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $\det W(T_{Г}, T_{Х})$ – определитель матрицы (11); $ERR_{Г}$, $ERR_{Х}$ – 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, дающих дополнительное уравнение связи физических параметров термопреобразователя. Получим параметр метрологического состояния d .

После измерения текущих значений $T_{Г}$ и $T_{Х}$ из предыдущих измерений подбирается i -е измерение с точно такой же температурой холодного спая:

$$T_{Х} = T_{Х i}. \quad (13)$$

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:

$$\Delta T_{Г} = T_{Г} - T_{Г i} \neq 0. \quad (14)$$

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

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{\Delta T_{Г}} \approx \frac{\partial \epsilon_1}{\partial T_{Г}}, \quad (15)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_2}{\Delta T_{Г}} \approx \frac{\partial \epsilon_2}{\partial T_{Г}}. \quad (16)$$

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

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{\Delta \epsilon_2} = \frac{\Delta T_{Г}}{\Delta T_{Г}} \approx \frac{\frac{\partial \epsilon_1}{\partial T_{Г}}}{\frac{\partial \epsilon_2}{\partial T_{Г}}} \cong \frac{\partial T}{\partial T} \Big|_{T=T_{Г \text{ ср}}}, \quad (17)$$

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

$$T_{г\text{ ср}} = \frac{T_{г} + T_{гi}}{2} \quad (18)$$

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

$$d = \frac{\frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta \varepsilon_2}}{\left(\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T_{г}} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon_2}{\partial T_{г}} \right)_{T_{г}=T_{г\text{ ср}}}} \quad (19)$$

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 $T_{г}$.

На рис. 5 рассмотрена зависимость критерия метрологического состояния d от приращения температуры холодного спаев 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 $T_{г} = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{х} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рис. 5 наглядно иллюстрирует, что выбранный параметр метрологического состояния d практически не зависит от приращения температуры между измерениями текущим значением $T_{г}$ и подобранным значением $T_{гi}$, при разнице между ними менее $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

При каждом i -м измерении в оперативную память заносится: ε_{1i} – термоЭДС термопары 1; ε_{2i} – термоЭДС термопары 2; $T_{гi}$ – измеренная температура горячих спаев; $T_{хi}$ – измеренная температура холодных спаев.

Заключение

В работе показана возможность оценки состояния термоэлектрического преобразователя в процессе работы за счёт 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.

параметр метрологического состояния d в случае наличия и отсутствия неисправности (вариант с двумя термопарами) при $T_{г}$ ист $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{х}$ ист $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

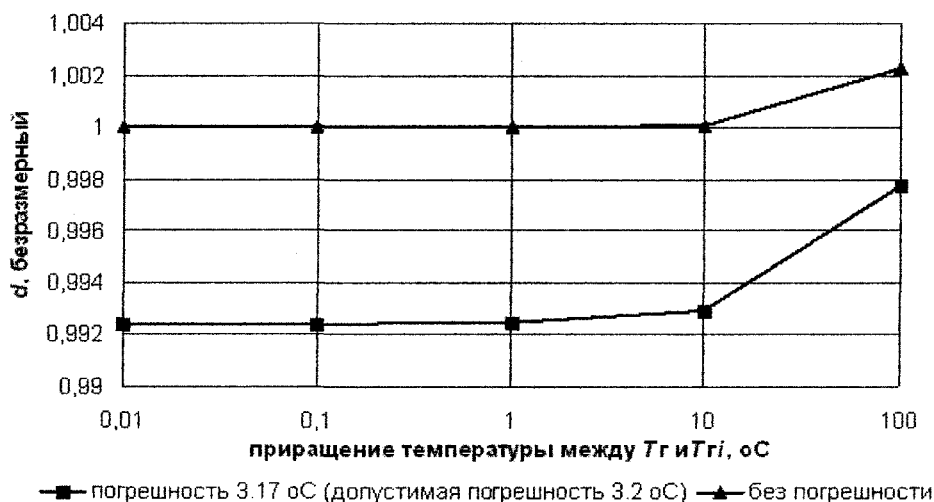


Рис. 5. Зависимость параметра метрологического состояния d от приращения температуры горячего спаев

Литература

1. Приборы и методы температурных измерений / Б.Н. Олейник, С.И. Лаздрина, В.П. Лаздрин, О.М. Жагулло. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 296 с.

2. ГОСТ Р 8.585–2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Термодатчики. Номинальные статистические характеристики преобразования. – М.: Изд-во стандартов, 2001.

3. Самарский, А.А. Численные методы: учеб. пособие для вузов / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.

4. Белоусов, М.Д. Метод самодиагностики термопреобразователя сопротивлений в процессе работы / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 9. – № 3(136). – С. 17–19.

5. Курош, А.Г. Курс высшей алгебры / А.Г. Курош. – Изд. девятое. – М.: Наука, 1968. – 431 с.

6. Волков, Е.А. Численные методы: учеб. пособие для вузов / Е.А. Волков. – 2-е изд., испр. – М.: Наука. – 1987. – 248 с.

Поступила в редакцию 2 декабря 2010 г.