

ОЦЕНКА СОБСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков

SELF STATE ESTIMATION OF THE MEASURING DEVICES

M.D. Belousov, A.L. Shestakov

Предлагаются варианты реализации оценки собственного состояния средств измерения на примерах средств измерения температуры. Предлагается способ сравнения различных реализаций оценки собственного состояния средства измерения.

Ключевые слова: измерение температуры, оценка состояния, параметр метрологического состояния, теория кодов, контролирующие ошибки.

Several approaches to self state estimation of the measuring devices are proposed based on temperature measuring transducers. The technique of comparison for realizations of different approaches to self state estimation is also discussed.

Keywords: temperature measurement, state estimation, metrological state parameter, correction codes theory.

Введение

В настоящее время актуальной задачей является реализация функций оценки собственного состояния в измерительных приборах, позволяющая повысить метрологическую надёжность в процессе эксплуатации. Поиск способов оценки собственного состояния средств измерения является на сегодня актуальной и нерешенной задачей. Средства измерения с такой возможностью позволяют повысить метрологическую надёжность, точность измерения.

В данной работе предложены схемы и алгоритмы обработки информации оценки собственного состояния средств измерения температуры. На их основе предложен единый подход к сравнению способов оценки состояния средств измерения между собой.

1. Оценка состояния преобразователя термосопротивлений в процессе работы

Известен преобразователь температуры на основе двух термосопротивлений, рассмотренный в статье [1].

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. Для повышения

точности измерения характеристики зависимости сопротивления от температуры у обоих термосопротивлений должны максимально отличаться друг от друга.

На основании результатов статьи [1] зависимость отношений напряжений измеренных АЦП на терморезисторах связана с коэффициентами полиномов резисторов и измеренной температурой следующим уравнением:

$$\frac{U_{R_{Tч1}}(T)}{U_{R_{Tч2}}(T)} = \frac{R_{0п}}{R_{0п}} \cdot \frac{1 + A_п T + B_п T^2 + D_п T^4 + F_п T^6}{1 + A_п T + B_п T^2 - 100C_п T^3 + C_п T^4}. \quad (1)$$

Индекс «п» добавлен к коэффициентам платинового сопротивления, «н» – к коэффициентам никелевого сопротивления. Значения коэффициентов уравнения (1) определяются, например из работы [2].

Температуру T , измеренную с помощью уравнения (1) в дальнейших преобразованиях обозначим как T_1 .

Приращение напряжений на терморезисторах между текущим и предыдущим измерениями на основании результатов статьи [1] связано с коэффициентами полиномов резисторов и измеренной температурой следующим уравнением:

$$\frac{\Delta U_п}{\Delta U_п} \approx \frac{R_{0п}}{R_{0п}} \cdot \frac{A_п + 2B_п T + 4D_п T^3 + 6F_п T^5}{A_п + 2B_п T - 300C_п T^2 + 4C_п T^3}. \quad (2)$$

Числитель и знаменатель уравнения (2) являются производными числителя и знаменателя уравнения (1) соответственно.

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

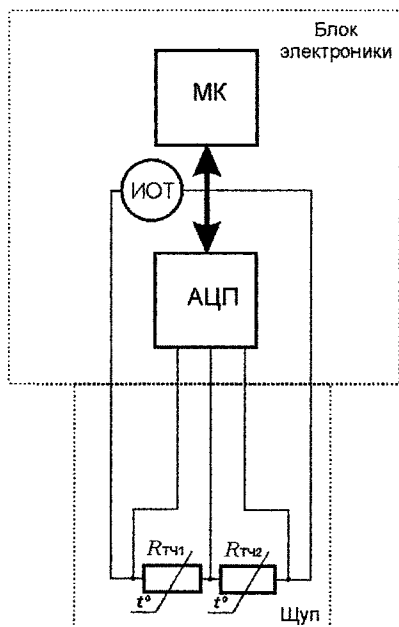


Рис. 1. Структурная схема преобразователя термосопротивлений с двумя сенсорами

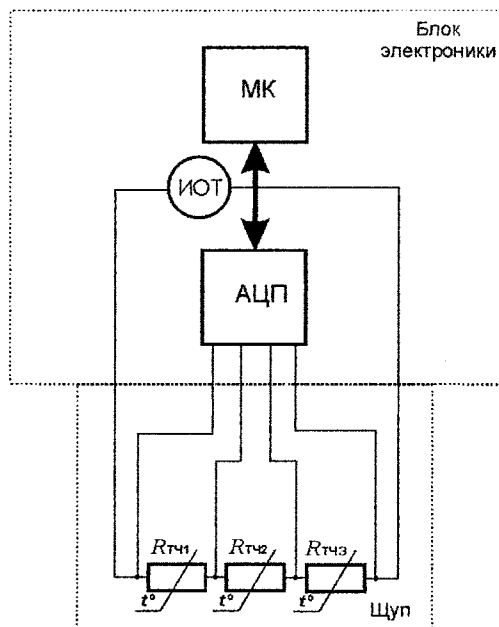


Рис. 2. Структурная схема преобразователя сопротивлений с тремя сенсорами

Температуру T , полученную с помощью уравнения (2), в дальнейших преобразованиях обозначим как T_2 .

Таким образом, имеются два результата измерения температуры, вычисленные по физическим зависимостям, не приводящимся друг к другу. Их разность будет характеризовать погрешность измерительного прибора, на котором сделаны эти измерения.

В статье [1] приводится методика, позволяющая избавиться от приближенности уравнения (2), которая здесь опущена для упрощения рассуждений.

Для оценки собственного состояния термопреобразователя необходимо задаться некоторым параметром метрологического состояния d , например,

$$d = |T_1 - T_2|. \quad (3)$$

Параметр метрологического состояния d – результат сравнения двух независимых измерений, выход его за некоторые допустимые пределы может рассматриваться как неисправность преобразователя сопротивлений.

В приведённой схеме параметр метрологического состояния d позволяет обнаружить ошибку, вызванную изменением параметров сенсоров. Для исправления такой ошибки потребуется дополнительная информация о состоянии сенсоров, которую можно получить, например, из нижеприведенной схемы термопреобразователя (рис. 2). Здесь $R_{тч3}$ – третье термосопротивление с зависимостью сопротивления от температуры максимально отличной от зависимостей $R_{тч1}$ и $R_{тч2}$. Все остальные обозначения совпадают со схемой рис. 1. В качестве третьего термосопротивления можно использовать медное сопротивление согласно [3] или вольфрамовое сопротивление согласно [4], либо железо-

никелевое сопротивление Valco [2]. В дальнейших рассуждениях рассмотрим медное сопротивление ввиду его распространённости и доступности точных значений коэффициентов зависимости сопротивления от температуры. Зависимость медного термосопротивления от температуры можно представить в виде следующих выражений [3]:

$$\begin{cases} R_M(T) = R_{0M} \cdot (1 + A_M T + B_M T \cdot (T + 6,7) + C_M T^3), \\ -180 \leq T \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ R_M(T) = R_{0M} \cdot (1 + A_M T), 0 \leq T \leq 200 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (4)$$

где $A_M = 4,28 \cdot 10^{-3}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B_M = -6,2032 \cdot 10^{-7}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$; $C_M = 8,5154 \cdot 10^{-10}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$.

Здесь и далее к коэффициентам медного сопротивления добавлен индекс «м». Коэффициенты B_M, C_M определяются из (4) при $T_i < 0$ и равны нулю при $T_i \geq 0$.

Таким образом, возможно отдельно рассмотреть еще две независимые физические модели для двух пар термосопротивлений (R_M и R_P, R_M и R_N).

Пара медь – платина

Температура T_1 находится из выражения, аналогичного (1) с учётом (4):

$$\frac{U_M}{U_P} = \frac{R_{0M}}{R_{0P}} \cdot \frac{1 + A_M T_1 + B_M T_1 \cdot (T_1 + 6,7) + C_M T_1^3}{1 + A_P T_1 + B_P T_1^2 - 100 C_P T_1^3 + C_P T_1^4}. \quad (5)$$

Температура T_2 находится из выражения, аналогичного (2) с учётом (4):

$$\frac{\Delta U_M}{\Delta U_P} = \frac{R_{0M}}{R_{0P}} \cdot \frac{A_M + 6,7 \cdot B_M + 2 B_M T_2 + 3 C_M T_2^2}{A_P + 2 B_P T_2 - 300 C_P T_2^2 + 4 C_P T_2^3}. \quad (6)$$

Для диагностики введем параметр метрологического состояния $d_{мп}$:

$$d_{мп} = |T_2 - T_1|, \quad (7)$$

Пара медь – никель

Температура T_1 находится из рассуждений, аналогичных (1) с учётом (4):

$$\frac{U_M}{U_H} = \frac{R_{0M}}{R_{0H}} \cdot \frac{1 + A_M T_1 + B_M T_1 \cdot (T_1 + 6,7) + C_M T_1^3}{1 + A_H T_1 + B_H T_1^2 + D_H T_1^4 + F_H T_1^6}. \quad (8)$$

Температура T_2 находится из выражения, аналогичного (2) с учётом (4):

$$\frac{\Delta U_M}{\Delta U_H} = \frac{R_{0M}}{R_{0H}} \cdot \frac{A_M + 6,7 \cdot B_M + 2B_M T_2 + 3C_M T_2^2}{A_H + 2B_H T_2 + 4D_H T_2^3 + 6F_H T_2^5}. \quad (9)$$

Параметр метрологического состояния d_{MH} определим аналогично:

$$d_{MH} = |T_2 - T_1|. \quad (10)$$

В случае возникновения неисправности одного из термосопротивлений пара сопротивлений, его не содержащая, единственная выработает параметр метрологического состояния d , величина которого мала и соответствует исправной паре термосопротивлений, что и будет являться критерием неисправности термосопротивления, в эту пару не входящего. Величина температуры, измеренная этой парой, не будет содержать ошибки, вызванной неисправностью, что позволит исправить любую ошибку измерения, вызванную неисправностью одного из термосопротивлений. Если же неисправны будут два и более термосопротивлений, то все пары выработают параметры метрологического состояния d , соответствующие ошибке. Это позволит обнаружить ошибку, вызванную любой неисправностью двух и более термосопротивлений.

2. Оценка состояния термопреобразователя сопротивлений с термопарами в термокомпенсационных проводах

Известен сенсор температуры, описанный в каталоге [5] (рис. 3).

Термосопротивление включено по четырехпроводной схеме, при этом в качестве термокомпенсационных проводов используются две одинаковые термопары.

Термопары будут иметь практически одинаковые величины погрешности, так как они подвержены идентичным воздействиям, поэтому практически имеется только два независимых сенсора – сопротивление и одна термопара.

При неисправности одного из этих двух сенсоров величины температуры, измеренные с помощью этих сенсоров, будут отличаться друг от друга. При этом заранее не известно – какой именно сенсор (термопара или термосопротивление) неисправны, поэтому при возникновении существенной разницы в измеренных температурах возможно лишь констатировать факт ошибки без возможности её исправления.

Для оценки собственного состояния вводится параметр метрологического состояния d для рассматриваемой схемы. Имеются два независимых

измерения одной температуры: T_1 – температура термопары, T_2 – температура терморезистора:

$$d_{12} = |T_1 - T_2|. \quad (11)$$

При близости значений T_1 и T_2 средство измерения метрологически исправно.

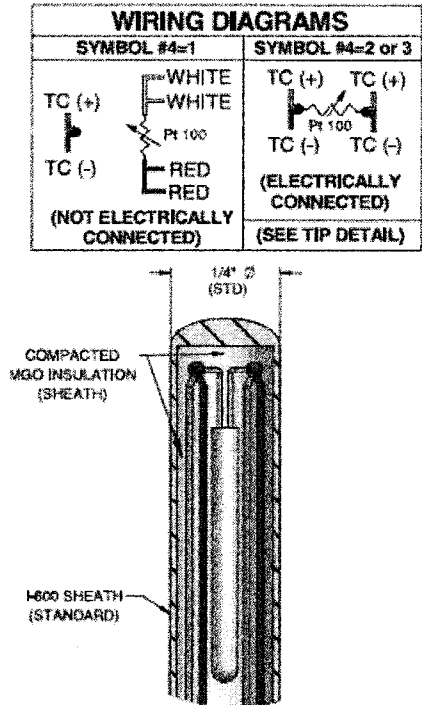


Рис. 3. Сенсор термопреобразователя сопротивлений с термопарами в термокомпенсационных проводах

Возможно дальнейшее улучшение рассматриваемого термопреобразователя [6]. Предлагается использовать две различные термопары, причем первые электроды термопар одинаковые, а вторые разные, например термопары хромель – алюмель и хромель – копель. При этом одинаковые электроды термопар будут являться выводами напряжения на термосопротивлении, а разные – токовыми выводами. Такая схема включения не будет иметь дополнительной погрешности, вызванной неоднородным материалом термокомпенсационных проводов. В этом случае одинаковые воздействия на разные термопары приведут к различным измеренным температурам. Схема термопреобразователя приведена на рис. 4. Здесь МК – микроконтроллер; ИОН – источник опорного напряжения; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; $R_{оп}$ – опорное сопротивление; $R_{Tч1}$ – термочувствительное сопротивление (находится в шупе); $R_{Tч2}$ – термочувствительное сопротивление (находится в блоке электроники); ТП₁ и ТП₂ – термопары хромель-алюмелевая (К) и хромель-копелевая (L) [7]. Под выводы напряжения используется хромелевый провод (обозначен на рисунке двумя штрихами).

ИОН генерирует напряжение U , которое вызывает ток i через контур: ИОН, $R_{оп}$, копельевый провод ТП₂ (3 штриха), $R_{Tч1}$, алюмелевый провод

ТП1 (1 штрих), $R_{Тч2}$. Измерив величину напряжения ИОН в кодах АЦП, можно рассчитать значения измеренных напряжений из кодов напряжений АЦП. Токи, протекающие через АЦП не учитываются, поскольку входное сопротивление АЦП на несколько порядков больше сопротивления резисторов и термопар в измеряемой цепи. В качестве $R_{оп}$ используется прецизионное сопротивление, например P1-37 [8], в качестве $R_{Тч1}$, $R_{Тч2}$ используются платиновые термосопротивления, например [2].

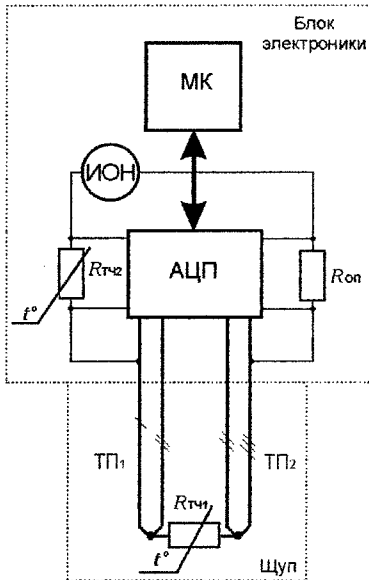


Рис. 4. Функциональная схема термопреобразователя сопротивлений с термопарами в термокомпенсационных проводах

Температура опорного сопротивления $R_{оп}$ и температура холодных спаев термопар равны. Обозначим эту температуру T_x . Через эти сопротивления протекает одинаковый ток, вызванный ИОН. Поэтому отношение напряжений и отношение сопротивлений на этих резисторах:

$$\frac{U_{R_{оп}}}{U_{R_{Тч2}}} = \frac{R_{оп}}{R_{Тч2}} \times \frac{1 + A_{оп} \cdot T_x}{1 + A_2 \cdot T_x + B_2 \cdot T_x^2 - 100 \cdot C_2 \cdot T_x^3 + C_2 \cdot T_x^4} \quad (12)$$

Числитель правой части уравнения определяет зависимость опорного сопротивления от его температуры [8]. Знаменатель правой части уравнения определяет зависимость платинового термочувствительного сопротивления от температуры [2].

Зная температуру опорного сопротивления T_x , из работы [8] можно вычислить значение опорного сопротивления $R_{оп}$.

По значению опорного сопротивления, можно рассчитать ток, протекающий через него:

$$I = \frac{U_{R_{оп}}}{R_{оп}} \quad (13)$$

Этот же ток протекает через $R_{Тч1}$, откуда можно найти его значение:

$$R_{Тч1} = \frac{U_{R_{Тч1}}}{I} \quad (14)$$

Зная сопротивление $R_{Тч1}$ из [3], можно найти его температуру T_1 , решая уравнение (15):

$$R_{Тч1} = \begin{cases} R_{0Тч1} \cdot [1 + A_1 \cdot T_1 + B_1 \cdot T_1^2 + C_1 \cdot T_1^3 \cdot (T_1 - 100)], & T_1 \leq 0; \\ R_{0Тч1} \cdot (1 + A_1 \cdot T_1 + B_1 \cdot T_1^2), & T_1 \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

Зная зависимости ЭДС термопар от температуры, описанные в ГОСТе [7], вычисляются температуры горячих спаев термопар T_2 и T_3 по уравнениям:

$$U_{ТП1} = \sum_{i=0}^8 (C_{Li} \cdot T_2^i - C_{Li} \cdot T_x^i); \quad (16)$$

$$U_{ТП2} = \sum_{i=0}^8 (C_{Ki} \cdot T_3^i - C_{Ki} \cdot T_x^i), \quad (17)$$

где C_{Ki} и C_{Li} – степенные коэффициенты термопар K и L .

Параметры метрологического состояния d_{12} , d_{13} , d_{23} , определяются из следующих выражений:

$$d_{12} = |T_1 - T_2|; \quad (18)$$

$$d_{23} = |T_2 - T_3|; \quad (19)$$

$$d_{13} = |T_1 - T_3|. \quad (20)$$

Аналогично предыдущему, при неисправности одного из сенсоров имеется возможность исключить из расчетов температуры ошибку, вызванную этим сенсором, а в случае неисправности двух и более сенсоров имеется возможность обнаружить данную ошибку.

3. Обобщение полученных результатов

Для всех рассмотренных вариантов оценки собственного состояния средств измерения в процессе справедливы следующие закономерности.

1. Для рассмотренных примеров преобразователей сопротивлений с двумя терморезисторами (см. рис. 1) и преобразователем сопротивлений с одинаковыми термопарами в компенсационных проводах (см. рис. 3) – имеются два независимых измерения искомой температуры. Как следствие эти схемы имеют одинаковые возможности оценки собственного состояния – обнаружение ошибки измерения.

Для рассмотренных примеров преобразователей сопротивлений с тремя терморезисторами (см. рис. 2) и преобразователем сопротивлений с разными термопарами в компенсационных проводах (см. рис. 4) – имеются три независимых измерения искомой температуры. Как следствие этого данные схемы имеют одинаковые возможности оценки собственного состояния – исправление ошибки одного сенсора и обнаружение ошибки двух и более сенсоров.

Определим количество независимых измерений, которое необходимо для исправления произвольного наперед заданного числа ошибочных

измерений. Для этого используем аппарат Теории кодов, контролирующих ошибки [9].

Допустим, сделано n независимых одновременных измерений одной и той же физической величины. Расположим их на одномерной координатной прямой, при этом m из них можно расположить внутри отрезка метрологического состояния длиной d , а остальные k – за пределами этого отрезка так, чтобы $m \rightarrow \max$ (а следовательно, $k \rightarrow \min$). Из условий задачи следует

$$n = m + k. \quad (21)$$

Отсюда можно считать множество значений m – достоверными значениями измеренного параметра, а k – недостоверными значениями измеренного параметра при условии, что $m > k$. Так как m , n , k – натуральные числа (количества измерений), то

$$m \geq k + 1. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21), получаем

$$n \geq 2k + 1. \quad (23)$$

Таким образом, для создания средства измерения с исправлением двух ошибок измерений сенсоров понадобится не менее 5 сенсоров, для исправления трех ошибок измерения – не менее 7 сенсоров и т. д.

2. Под оценкой собственного состояния средств измерения понимается оценка величины его погрешности в процессе работы. Получать информацию о состоянии средства измерения в общем случае возможно из избыточных объективных физических зависимостей, не участвующих в исходном расчете измеряемой величины.

Полученные результаты позволяют определить метрологическое состояние сенсора в процессе работы. Однако данный подход может быть распространен и для определения собственного состояния других элементов средств измерений.

3. В общем случае оценка собственного состояния средств измерения на основе использования избыточных физических закономерностей, определяющих состояние средства измерения, может быть получена следующим образом:

Аппаратная избыточность. Здесь оценка собственного состояния реализуется за счет аппаратного усложнения.

Информационная избыточность. В этом случае оценка собственного состояния реализуется за счет усложнения или уточнения физической модели средства измерения без изменения его аппаратной части.

Комбинация аппаратной и информационной избыточности.

Заключение

В данной работе предложены и проанализированы схемы реализации оценки собственного

состояния средств измерения температуры в процессе их функционирования на основе параметра метрологического состояния d . Предложен единый подход для классификации оценки собственного состояния средств измерения температуры. Он позволяет оценивать и сравнивать между собой возможности различных реализаций оценки собственного состояния средств измерения на этапе их проектирования в совокупности с другими характеристиками средства измерения.

Предложенный подход может быть применён для любых средств измерения.

Литература

1. 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. 17–20.

2. Resistance Temperature Detectors (RTD'S). – access mode: <http://www.specsensors.com/pdfs/rtd.pdf>, free.

3. ГОСТ Р 8.625–2006 Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2006.

4. Патент на полезную модель 77108, Рос. Федерация, МПК⁷ H01L35/00. Термопреобразователь / М.Д. Белоусов, А.А. Кучеров; заявитель и патентообладатель ЗАО ПГ «МЕТРАН». – № 2008118325/22; заявл. 08.05.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28.

5. JMS Southeast, Inc. Temperature Measurement. – access mode: http://www.jms-se.com/pdf/JMS_Catalog_final.pdf, free. – P. 4–11.

6. Патент на полезную модель 86306, Рос. Федерация, МПК⁷ G01K7/04. Измеритель температуры с самодиагностикой неисправности чувствительных элементов в процессе работы / М.Д. Белоусов, А.А. Кучеров; заявитель и патентообладатель ЗАО ПГ «МЕТРАН». – № 2009117848/22; заявл. 12.05.2009; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24.

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

8. Технические характеристики резистора постоянного непроволочного прецизионного P1–37, Элмиком – ТВС. – Режим доступа: http://www.elmicom.ru/r1_37.shtml, свободный.

9. Блейхут, Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки: пер. с англ. / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

Поступила в редакцию 6 декабря 2010 г.