

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.317.39 + 681.586.6 + 681.2.08 + 669.15 : 669-157.8

DOI: 10.14529/ctcr190307

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

М.Д. Белоусов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Создание специализированных средств измерения для глубокой интеграции в современные цифровые АСУ ТП стало возможным только при использовании в измерительных преобразователях микропроцессорных устройств. Однако на сегодня улучшение основных характеристик средств измерения в современных системах АСУ ТП за счёт применения микропроцессоров в значительной степени исчерпано при существенном запасе производительности последних. Поэтому именно сейчас актуальной задачей дальнейшего совершенствования средств измерений является поиск новых вариантов создания интеллектуальных средств измерения.

В рамках этой задачи в статье исследованы функциональные схемы интеллектуальных измерительных преобразователей температуры и предложены алгоритмы оценки их метрологической исправности в процессе работы в современных АСУ ТП. Предложен, обоснован и проверен на эксперименте алгоритм оценки точности измерения термопреобразователя сопротивлений в процессе работы.

Ключевые слова: термосопротивление, статусы измерения, оценка состояния средства измерения.

Введение

Одной из основных задач АСУ ТП является процесс измерения и обработки информации о физических величинах, характеризующих производственные технологические процессы [1–3].

Создание высокопроизводительного и высокоэффективного производства, обладающего возможностью быстрой переналадки при переходе с управления одного типа изделия на другой [4, 5], необходимо для своевременных обоснованных принятий решения в сложных и взаимосвязанных процессах. В таких условиях производства многократно повышаются требования к достоверности измерительной информации. Это, в свою очередь, стало возможно с появлением интеллектуальных средств измерений.

Под интеллектуальными средствами измерения мы будем понимать средства измерения с функцией самоконтроля согласно ГОСТу [6]. Оценка состояния средств измерения в процессе работы позволяет повысить достоверность и точность измерения, увеличить межповерочный интервал [6–8], повысить качество функционирования АСУ ТП в целом.

В настоящее время в современных средствах измерения имеется существенный незадействованный резерв производительности встроенных микропроцессоров. Наиболее актуальной задачей использования этих вычислительных резервов для дальнейшего совершенствования средств измерений принято считать поиск новых вариантов создания интеллектуальных средств измерения [9–12].

Работы [13–24] касаются проблем самостоятельной оценки достоверности результатов измерения температуры в процессе эксплуатации. В приведенных источниках рассматриваются подходы и предлагаются варианты измерительных преобразователей и алгоритмы их работы. Возможности самодиагностики таких измерительных преобразователей предлагается реализовать, исходя из физических взаимосвязей измеряемых величин. Однако в этих работах недостаточно

освещены вопросы качественной оценки точности измерения и самостоятельной качественной оценки состояния средств измерения в процессе функционирования.

Актуальность проблем создания интеллектуальных средств измерения подтверждается большим количеством статей и введения ГОСТов [6–8] по данной тематике.

Целью настоящего исследования является создание алгоритма оценки точности измерений, присвоения статусов состояния термопреобразователей сопротивления.

1. Схемы интеллектуальных измерителей температуры на основе металлических сопротивлений

В предыдущих работах автора [25, 26] были исследованы две интеллектуальные схемы измерения температуры на основе термосопротивлений.

На рис. 1 изображена схема термометра термосопротивлений без опорного сопротивления.

Температуру можно вычислить двумя различными способами (1), (2). Температуру, измеренную первым способом, обозначим как $T1$, температуру, измеренную вторым способом, как $T2$:

$$X(T1) = \frac{R_{Tч1}(T1)}{R_{Tч2}(T1)}; \quad (1)$$

$$Y(T2) = \frac{\Delta U_{II}}{\Delta U_{II}} = \frac{I \cdot \Delta R_{II}}{I \cdot \Delta R_{II}} = \frac{\Delta R_{II}}{\Delta R_{II}} = \frac{\Delta T}{\Delta T} \approx \frac{R'_{II}(T2)|_{T2}}{R'_{II}(T2)|_{T2}}. \quad (2)$$

Параметр оценки состояния d можно рассчитать по формуле

$$d = T2_n - \frac{T1_n + T1_{n-1}}{2}, \quad (3)$$

где n – текущее измерение, а $n - 1$ – предыдущее измерение.

Фактически параметр d является разницей двух измеренных разными способами температур единого процесса, характеризуя абсолютные погрешности этих измерений.

Исследования показали целесообразность усовершенствования параметра оценки состояния d , используя данные по диапазону измерений. Для этого можно использовать усреднение по диапазону $|d_{cp}|$:

$$|d_{cp}| = \frac{\sum_{i=1}^n |d|}{n}. \quad (4)$$

Перспективным способом усовершенствования методов оценки состояния средства измерения является метод регуляризации. В работах [27, 28] был получен критерий Δ , определяемый выражением

$$|\Delta| = \frac{\max_k |\Delta_k|}{\max_k \text{ абс. погр }},$$

который также будем рассматривать как критерий оценки исправности средства измерения в некотором диапазоне измерений. Здесь $\max_k |\Delta_k|$ – максимальное по модулю значение Δ в диапазоне измерений, $\max_k \text{ абс. погр}$ – максимальная допустимая абсолютная погрешность в диапазоне измерений, k – набор отсчетов.

Параметр Δ_k здесь также фактически является разницей двух измеренных разными способами температур единого процесса, характеризуя абсолютные погрешности этих измерений.

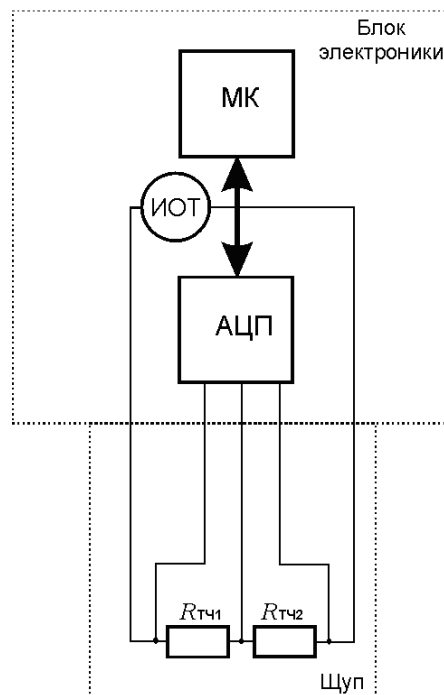


Рис. 1. Схема интеллектуального термометра сопротивления без опорного сопротивления

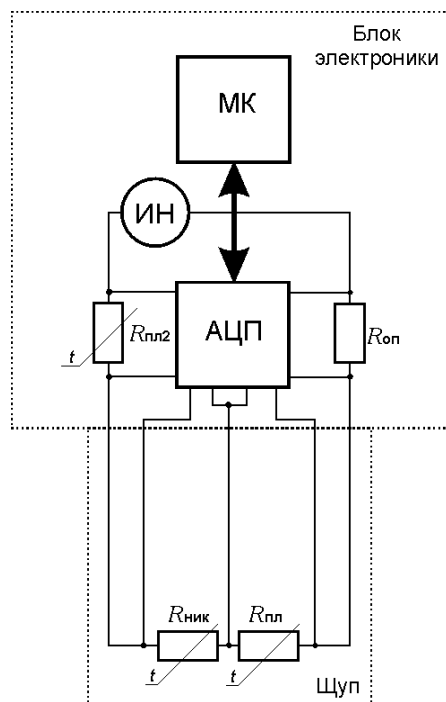


Рис. 2. Интеллектуальная схема термометра сопротивления с двумя измерительными преобразователями из различных металлов

Таким образом, для рассмотренной схемы также получены 2 независимых критерия оценки ее состояния.

2. Метод оценки состояния с помощью параметра D и результаты измерений для предложенных схем

Приведенный выше критерий *d* основан на усреднении полученных оценок в диапазоне измерений, поэтому с его помощью наиболее достоверными оказываются оценки систематической погрешности измерений. Приведенный выше критерий Δ основан на экстремальных оценках диапазона измерений, соответственно, с его помощью наиболее достоверно оцениваются отдельные наибольшие погрешности диапазона измерений. Для более точного принятия решения о выходе измерительного преобразователя температуры за пределы допустимой погрешности предлагается объединить оба критерия в единый критерий *D*:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \frac{|d_{cp}|}{|d_{cp,пор}|} + \frac{1}{2} \cdot \frac{|\Delta|}{|\Delta_{пор}|} \tag{8}$$

Применим полученные критерии для присвоения статусов результатам измерений.

ГОСТы [6–8] определяют статусы измерений, рассмотрим основные из них: подтвержденный, нормальный, ориентирующий, недостоверный. Алгоритмы расчета граничных пороговых значений $|d_{cp}|$ и Δ между статусами измерения для обеих рассматриваемых схем на основе методов имитационного моделирования были рассмотрены автором данной статьи в [25], результаты приведены в табл. 1 и 2. Там же приведены пороговые значения и для статуса *D*.

Таблица 1

Соответствие оценки критериев $d_{cp,пор}$ и Δ для схемы без опорного сопротивления

Статус измерений	$ d_{cp,пор} , ^\circ C$	$ \Delta_{пор} $	<i>D</i>
Подтвержденный	< 0,023	< 0,035	< 0,49
Нормальный	0,023...0,0467	0,035...0,71	0,49...1
Ориентирующий	0,0467...0,093	0,071...0,176	1...2,23
Недостоверный	> 0,093	> 0,176	> 2,23

Таблица 2

Соответствие оценки критериев $d_{\text{ср. пор}}$ и Δ для схемы с двумя термопреобразователями
из различных металлов

Статус измерений	$ d_{\text{ср. пор}} , ^\circ\text{C}$	$ \Delta_{\text{пор}} $	D
Подтвержденный	$< 0,101$	$< 0,104$	$< 0,46$
Нормальный	$0,101 \dots 0,196$	$0,104 \dots 0,257$	$0,46 \dots 1$
Ориентирующий	$0,196 \dots 0,262$	$0,257 \dots 0,501$	$1 \dots 1,64$
Недостовверный	$> 0,262$	$> 0,501$	$> 1,64$

Далее рассмотрим результаты экспериментальной оценки.

3. Результаты экспериментальной оценки точности исследуемых измерительных преобразователей

3.1. Результаты экспериментальной оценки точности исследуемых измерительных преобразователей для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов

Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов с помощью объединяющего два разных метода параметра D представлены на рис. 3–5. Границы статусов промаркированы: границы статусов *подтвержденный* – *нормальный* ($\eta = 0,5$) – кружками, *нормальный* – *ориентирующий* ($\eta = 1$) – ромбами, *ориентирующий* – *недостовверный* ($\eta = 2$) – треугольниками.

Изображенная на рис. 3 оценка исправности характерна для средства измерения, находящегося в начале межповерочного интервала. Состояние средства измерения соответствует границе статусов *подтвержденный* – *нормальный*.

Изображенная на рис. 4 оценка исправности характерна для средства измерения, незначительно превысившего свой межповерочный интервал, что соответствует границе статусов *нормальный* – *ориентирующий*.

Изображенная на рис. 5 оценка исправности характерна для средства измерения, существенно превысившего свой межповерочный интервал. Данная ситуация соответствует границе статусов *ориентирующий* – *недостовверный*.

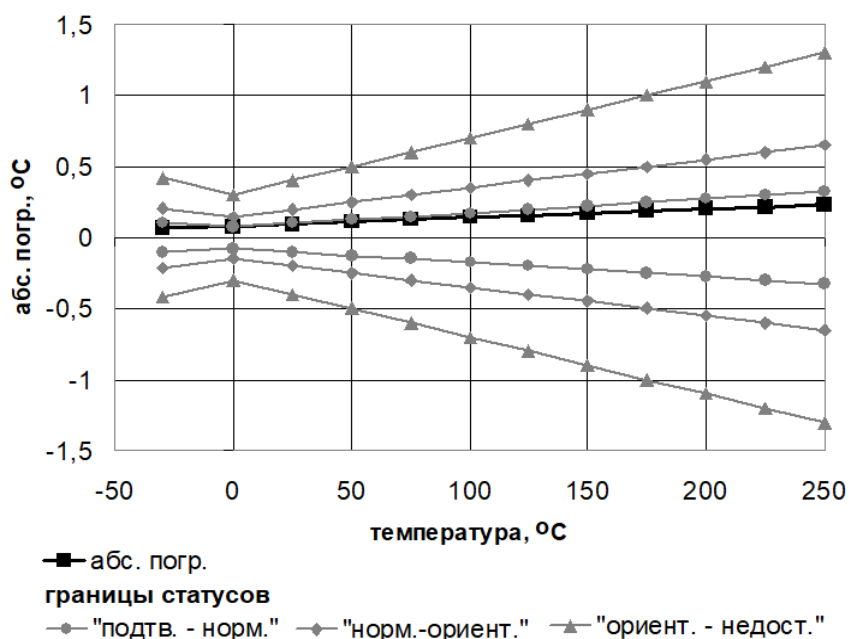


Рис. 3. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов. $D = 0,454$

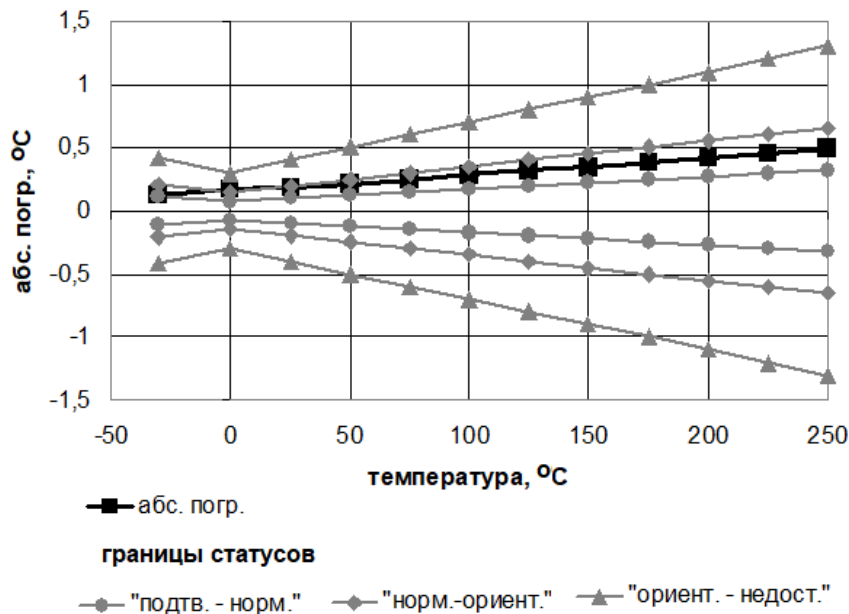


Рис. 4. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов. $D = 0,997$

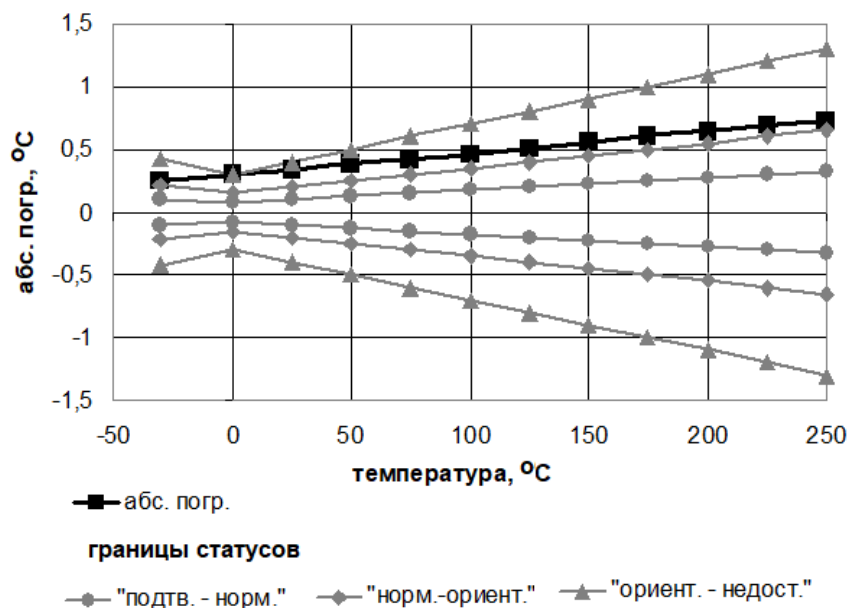


Рис. 5. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов. $D = 1,621$

Как видно из приведенных графиков, для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов предложенный алгоритм оценки погрешности показал адекватность своей работы.

3.2. Результаты экспериментальной оценки точности исследуемых измерительных преобразователей для схемы с двумя первичными преобразователями для схемы без опорного сопротивления

Далее рассмотрим абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры с помощью объединяющего два разных метода параметра D для схемы без опорного сопротивления. Они представлены на рис. 6–8. Границы статусов здесь промаркированы: гра-

ницы статусов *подтвержденный – нормальный* ($\eta = 0,5$) – кружками, *нормальный – ориентирующий* ($\eta = 1$) – ромбами, *ориентирующий – недостоверный* ($\eta = 2$) – треугольниками.

Изображенная на рис. 6 оценка исправности характерна для средства измерения, находящегося в начале межповерочного интервала. Состояние средства измерения соответствует границе статусов *подтвержденный – нормальный*.

Изображенная на рис. 7 оценка исправности характерна для средства измерения, незначительно превысившего свой межповерочный интервал, что соответствует границе статусов *нормальный – ориентирующий*.

Изображенная на рис. 8 оценка исправности характерна для средства измерения, существенно превысившего свой межповерочный интервал. Данная ситуация соответствует границе статусов *ориентирующий – недостоверный*.

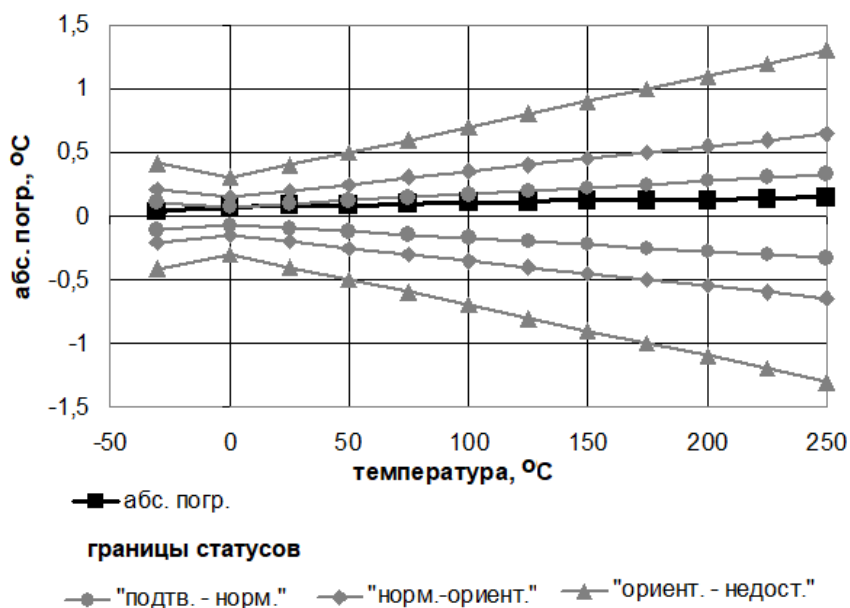


Рис. 6. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы без опорного сопротивления. $D = 0,489$

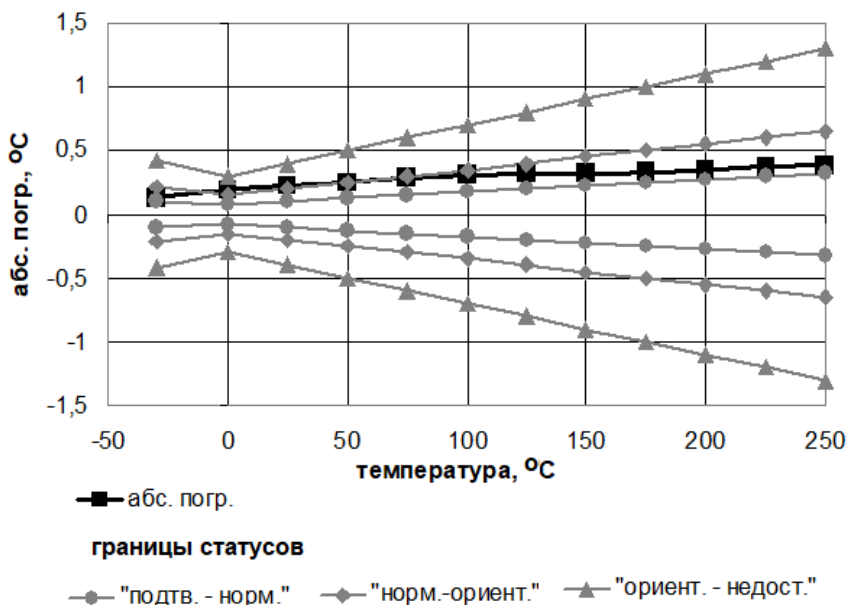


Рис. 7. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы без опорного сопротивления. $D = 0,99$

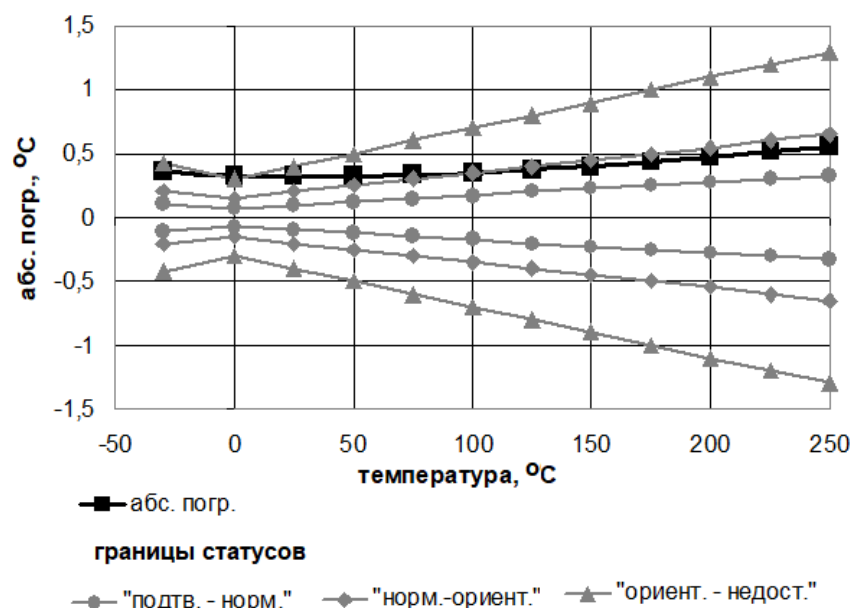


Рис. 8. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы без опорного сопротивления. $D = 2,224$

Как видно из приведенных графиков, для схемы без опорного сопротивления предложенный алгоритм оценки погрешности также показал адекватность своей работы.

Заключение

1. Рассмотрены две схемы измерительных преобразователей температуры на основе термосопротивлений: без опорного сопротивления и с двумя первичными преобразователями из различных металлов, обеспечивающие избыточность измерительной информации.

2. Для обеих рассмотренных схем введен параметр оценки состояния D , характеризующий величину абсолютной погрешности измерения, сформированный на основе двух разных методов, на основе параметров d и Δ_k .

3. Для обеих рассмотренных схем предложен алгоритм присвоения статусов состояния интеллектуальных измерительных преобразователей температуры на основе термосопротивлений.

4. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенных в работе алгоритмов определения оценки исправности и присвоения статусов состояния для рассмотренных схем измерительных преобразователей.

Литература

1. Тайманов, Р.Е. Метрологический самоконтроль датчиков / Р.Е. Тайманов, К.В. Сапожникова // Сборник трудов Второй российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (теория, методы, алгоритмы, исследования и разработки)». – М.: ИПУ РАН, 2010. CD-ROM.

2. Джонсон, Р. Системы и руководство (Теория систем и руководство системами) / Р. Джонсон, Ф. Каст, Д. Розенцверг. – Изд. 2-е, доп. – М.: Советское радио, 1971. – 650 с.

3. Ицкович, Э.Л. Оперативное управление непрерывным производством / Э.Л. Ицкович, Л.Р. Сорокин. – М.: Наука, 1989. – 155 с.

4. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учеб. для вузов / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высшая школа, 2004. – 415 с.

5. Тучинский, С.В. Использование контроллеров серии БАЗИС при поэтапной модернизации производства / С.В. Тучинский, И.Н. Андриянов // Технические и программные средства систем автоматизации. Промышленные контроллеры в энергетике. – 2011. – № 5 (22). – С. 19–24.

6. ГОСТ Р 8.673–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики

интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 8 с.

7. ГОСТ Р 8.734–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.

8. ГОСТ Р 8.825–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 10 с.

9. Раннев, Г.Г. Интеллектуальные средства измерений: учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Г.Г. Раннев. – М.: Издат. центр «Академия», 2011. – 272 с.

10. Романов, В.Н. Интеллектуальные средства измерений / В.Н. Романов, В.С. Соболев, Э.И. Цветков; под ред. Э.И. Цветкова. – М.: Татьяна день, 1994. – 280 с.

11. Концепция «Идеальный завод (VigilantPlant)» от компании «Йокогава». – <http://www.yokogawa.com/business/vigilantplant/index.htm>.

12. Каталог датчиков температуры компании «Метран». – <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Metran%20Documents/Catalog/Catalogues/Датчики-температуры-каталог.pdf>.

13. Новый этап в развитии метрологического обеспечения датчиков / Ю.В. Тарбеев, А.Ю. Кузин, Р.Е. Тайманов, А.Л. Лукашев // Измерительная техника. – 2007. – № 3. – С. 69–72.

14. Meijer, G.C.M. Smart Sensor Systems / G.C.M. Meijer. – John Wiley & Sons, Ltd, 2008. DOI: 10.1002/9780470866931

15. A Self-Validating Digital Coriolis Mass-Flow Meter: An Overview / M.P. Henry, D.W. Clarke, N. Archer et al. // Control Engineering Practice. – 2000. – Vol. 8, iss. 5. – P. 487–506. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00177-X

16. Zhigang Feng. Design and Implementation of Self-validating Pneumatic Actuator Hardware System Based on DSP and MCU / Zhigang Feng, Meng Qiu // International Journal of Hybrid Information Technology. – 2014. – Vol. 7, no. 6. – P. 101–114. DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.6.08

17. Ицкович, Э.Л. Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства / Э.Л. Ицкович // Датчики и системы. – 2002. – № 2. – С. 42–47.

18. Duta, M. The Fusion of Redundant SEVA Measurements / M. Duta, M. Henry // Control Systems Technology, IEEE Transactions. – 2005. – Vol. 13, iss. 2122. DOI: 10.1109/TCST.2004.840448

19. Ларионов, В.А. Определение межповерочных интервалов для интеллектуальных датчиков технологических производств / В.А. Ларионов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 6. – С. 25–27.

20. Фридман, А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений / А.Э. Фридман // Измерительная техника. – 1991. – № 11. – С. 3–10. DOI: 10.1007/BF00979675

21. Application of Self-Calibrating Thermocouples with Miniature Fixed-Point Cells in a Temperature Range from 500°C to 650°C in Steam Generators / F. Bernhard, D. Boguhn, S. Augustin et al. – <https://clck.ru/HfXRw>. DOI: 10.1063/1.1627133

22. Huijising, J.H. Developments in Integrated Smart Sensors / J.H. Huijising, F.R. Riedijk, G. van der Horn // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. – Vol. 43, no. 1-3. – P. 276–288. DOI: 10.1016/0924-4247(93)00657-P

23. Murawski, K. New Vision Sensor to Measure Gas Pressure / K. Murawski // Measurement Science Review. – 2015. – Vol. 15, no. 3. DOI: 10.1515/msr-2015-0020

24. Werthschutzky, R. Sensor Self-Monitoring and Fault-Tolerance / R. Werthschutzky, R. Muller // Technisches Messen. – 2007. – Vol. 74, no. 4. – P. 176–184. DOI: 10.1524/teme.2007.74.4.176

25. Белоусов, М.Д. Оценка собственного состояния термометров сопротивлений / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков, Н.М. Япарова // Измерения: Состояние, перспективы развития: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. (г. Челябинск, 25–27 сентября 2012). – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 39–47.

26. Сенсоры температуры с функцией самостоятельной калибровки и градуировки в процессе работы на основе фазовых переходов 2-го рода / М.Д. Белоусов, В.В. Дьячук, Д.А. Мирзаев, А.Л. Шестаков // Труды Третьей российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения»: тр. и пленар. докл. участников конф. УКИ'12. – М.: ИПУ РАН, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 1786–1794.

27. Yaparova, N.M. *Mathematical modelling and method for solving a parametric identification problem for self-test of measuring devices* / N.M. Yaparova // *Inverse problems in science and engineering*. – 2015. – Vol. 24, iss. 1. – p. 77–91. DOI: 10.1080/17415977.2015.1017482

28. Yaparova, N.M. *Mathematical modelling and order-optimal method for solving a parametric identification problem for self-calibration measuring devices* / N.M. Yaparova // *International Conference Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing (AMCTM 2014)*. D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia, 9 and 10–12 September, 2014.

Белоусов Михаил Дмитриевич, инженер кафедры информационно-измерительной техники Высшей школы электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; belousovmd@susu.ru.

Поступила в редакцию 11 марта 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190307

EVALUATION OF MEASUREMENT ACCURACY OF THE RTD TRANSDUCER DURING OPERATION

M.D. Belousov, belousovmd@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The creation of specialized measurement tools for deep integration into modern digital process control systems is became possible only when using microprocessor devices in measuring converters. However, today the improvement of the main characteristics of measuring instruments in modern systems of automatic control systems through the use of microprocessors is largely exhausted with a significant margin of performance of the latter. Therefore, it is now an urgent task for the further improvement of means of measurements is to search for new variants of creation of intellectual means of measurement.

Within the framework of this task, the functional schemes of intelligent temperature measuring transducers are studied in the article and the algorithms for assessing their metrological serviceability in the process of operation in modern ACS are proposed. Proposed, justified and tested on the experiment an algorithm for evaluating the accuracy of the measurement of thermocouple resistance in the process.

Keywords: RTD, status of measurement, the evaluation of the measuring instruments.

References

1. Taimanov R.E., Sapozhnikova K.V. Sapozhnikova K.V. [Metrological Self-Checking of Sensors]. *Sbornik trudov Vtoroy rossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya (teoriya, metody, algoritmy, issledovaniya i razrabotki)"* [Proceedings of the Second Russian Conference with International Participation "Technical and Software Control Systems, Control and Measurement (Theory, Methods, Algorithms, Research and Development)"]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2010. CD-ROM. (in Russ.)

2. Johnson R., Kast F., Rosenzweig D. *Sistemy i rukovodstvo (Teoriya sistem i rukovodstvo sistemami)* [Systems and Management (Systems Theory and Systems Management)]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 650 p.

3. Itskovich E.L., Sorokin L.R. *Operativnoe upravlenie nepreryvnym proizvodstvom* [Operational Management of Continuous Production]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 155 p.

4. Kapustin N.M., Kuznetsov P.M., Skhirtladze A.G. et al. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii: ucheb. dlya vtuzov* [Automation of Production Processes in Mechanical Engineering: Studies for Technical Colleges]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 2004. 415 p.
5. Tuchinsky S.V., Andriyanov I.N. [Use of Controllers of the BASIS Series at Step-by-Step Modernization of Production]. *Technical and Software Tools of Automation Systems. Industrial Controllers in Energetic*, 2011, no. 5 (22), pp. 19–24. (in Russ.)
6. GOST R 8.673–2009. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Osnovnye terminy i opredeleniya* [State Standard R 8.673–2009. The State System of Ensuring the Unity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Basic Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 8 p.
7. GOST R. 8.734–2011. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Metody metrologicheskogo samokontrolya* [State Standard R 8.734–2011. The State System of Ensuring the Unity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Methods of Metrological Self-Control]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 20 p.
8. GOST R 8.825–2013. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Metody uskorenykh ispytaniy* [State Standard R 8.825–2013. The State System of Ensuring the Unity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Methods of Accelerated Tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 10 p.
9. Rannev G.G. *Intellektual'nye sredstva izmereniy: uchebnyk dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Intellectual Measuring Instruments: Textbook for Students of Higher Educational Institutions]. Moscow, Academy Publ., 2011. 272 p.
10. Romanov V.N., Sobolev V.S., Tsvetkov E.I. *Intellektual'nye sredstva izmereniy* [Intellectual Measuring Instruments]. Moscow, Tanyanin den' Publ., 1994.
11. *Kontseptsiya "Ideal'nyy zavod (VigilantPlant)" ot kompanii "Yokogava"* [The Concept of "Ideal Plant (VigilantPlant)" from the Company "Yokogawa"]. Available at: <http://www.yokogawa.com/business/vigilantplant/index.htm>.
12. *Katalog datchikov temperatury kompanii "Metran"* [Catalog of Temperature Sensors of the Company "Metran"]. Available at: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Metran%20Documents/Catalog/Catalogues/Датчики-температуры-каталог.pdf>.
13. Tarbeyev Yu.V., Kuzin A.Yu., Taimanov R.E., Lukashev A.L. [A New Stage in the Development of Metrological Support of Sensors]. *Measurement Technology*, 2007, no. 3, pp. 69–72. (in Russ.)
14. Meijer G.C.M. *Smart Sensor Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. DOI: 10.1002/9780470866931
15. Henry M.P., Clarke D.W., Archer N. et al. A Self-Validating Digital Coriolis Mass-Flow Meter: An Overview. *Control Engineering Practice*, 2000, vol. 8, iss. 5, pp. 487–506. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00177-X
16. Zhigang Feng, Meng Qiu. Design and Implementation of Self-Validating Pneumatic Actuator Hardware System Based on DSP and MCU. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 101–114. DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.6.08
17. Itskovich E.L. Modern Intelligent Sensors for General Industrial Purposes, Their Features and Advantages. *Sensors and Systems*, 2002, no. 2, pp. 42–47. (in Russ.)
18. Duta M., Henry M. The Fusion of Redundant SEVA Measurements. *Control Systems Technology, IEEE Transactions*, 2005, vol. 13, iss. 2122. DOI: 10.1109/TCST.2004.840448
19. Larionov V.A. Determination of Calibration Intervals for Intelligent Sensors of Technological Productions. *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2009, no. 6, pp. 25–27. (in Russ.)
20. Friedman A.E. Theory of Metrological Reliability of Measuring Instruments. *Measurement Technology*, 1991, no. 11, pp. 3–10. (in Russ.) DOI: 10.1007/BF00979675
21. Bernhard F., Boguhn D., Augustin S., Mammen H., Donin A. *Application of Self-Calibrating Thermocouples with Miniature Fixed-Point Cells in a Temperature Range from 500°C to 650°C in Steam Generators*. Available at: <https://clck.ru/HfXRw>. DOI: 10.1063/1.1627133
22. Huijising J.H., Riedijk F.R., van der Horn G. Developments in Integrated Smart Sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, vol. 43, no. 1-3, pp. 276–288. DOI: 10.1016/0924-4247(93)00657-P

23. Murawski K. New Vision Sensor to Measure Gas Pressure. *Measurement Science Review*, 2015, vol. 15, no. 3. DOI: 10.1515/msr-2015-0020

24. Werthschutzky R., Muller R. Sensor Self-Monitoring and Fault-Tolerance. *Technisches Messen*, 2007, vol. 74, no. 4, pp. 176–184. DOI: 10.1524/teme.2007.74.4.176

25. Belousov M.D., Shestakov A.L., Yaparova N.M. [Self-made Evaluation of Own State of RTD Sensor]. *Izmereniya: Sostoyaniye, perspektivy razvitiya: tezisy докладов mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Chelyabinsk, 25–27 sentyabrya 2012 g.)* [Measurement: Condition, Prospects of Development: Abstracts of the International Scientific-Practical Conference (Chelyabinsk, September 25–27, 2012)]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012, pp. 39–47. (in Russ.)

26. Belousov M.D., Dyachuk V.V., Mirzaev D.A., Shestakov A.L. [Temperature Sensors with the Function of Self-Calibration and Calibration during Operation on the Basis of Phase Transitions of the Type 2]. *Trudy Tret'ey rossiyской konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya": trudy i plenarnye doklady uchastnikov konferentsii* [Proceedings of the Third Russian Conference with International Participation "Technical and Software of Control, Control and Measurement Systems": Proc. and Plenary Reports of the Participants of the UCI Conference'12]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2012, CD-ROM, pp. 1786–1794. (in Russ.)

27. Yaparova, N.M. Mathematical Modeling and Method for Solving a Parametric Identification Problem for Self-Test of Measuring Devices. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2015, vol. 24, iss. 1, pp. 77–91. DOI: 10.1080/17415977.2015.1017482

28. Yaparova N.M. Mathematical Modeling and Order-Optimal Method for Solving a Parametric Identification Problem for Self-Calibration Measuring Devices. *International Conference Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing (AMCTM 2014). D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia, 9 and 10–12 September, 2014.*

Received 11 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Белуосов, М.Д. Оценка точности измерения термомпреобразователей сопротивления в процессе работы / М.Д. Белуосов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 68–78. DOI: 10.14529/ctcr190307

FOR CITATION

Belousov M.D. Evaluation of Measurement Accuracy of the RTD Transducer during Operation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 68–78. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190307