

## ОЦЕНКА СОБСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ

*М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков, Н.М. Япарова*

## ESTIMATION OF EIGENSTATE OF RESISTIVE THERMOMETERS

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

В предыдущих работах была показана принципиальная возможность создания термопреобразователя сопротивления с самостоятельной оценкой собственного состояния в процессе работы. В данной работе предлагается способ сравнения различных термопреобразователей сопротивления между собой, производится проверка работоспособности предложенных алгоритмов на практике, их корректировка по результатам эксперимента, сравнение характеристик различных схем включения между собой. Обозначаются направления дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* термопреобразователь сопротивления, самостоятельная оценка состояния.

In the previous articles a possibility to design resistance temperature transducers with self-check of eigenstate in the working process is shown. This article proposes the method for comparison of different resistance temperature transducers, verification of given algorithms is performed in practice, their correction by the results of experiment as well as comparison of characteristics of different connection diagrams are done. Further perspectives of research are highlighted.

*Keywords:* resistance temperature transducer, self-check of a condition.

### Введение

В настоящее время актуальной задачей является реализация функций самостоятельной оценки метрологического состояния измерительных приборов в процессе их эксплуатации [1, 2].

В работах [3–5] был предложен и исследован преобразователь температуры без опорного сопротивления, обладающий возможностью оценки собственного состояния в процессе эксплуатации. В рамках предложенной физической модели были исследованы алгоритмы оценки собственного метрологического состояния для названного преобразователя температуры. Поэтому возникла необходимость сравнения его характеристик оценки собственного состояния с другими термопреобразователями с аналогичными свойствами, проверка работоспособности в условиях эксперимента, оценки полученных результатов и постановки задач для дальнейшего совершенствования способов оценки

собственного состояния средств измерения в процессе работы.

### 1. Постановка задачи

Структурная схема термопреобразователя температуры без опорного сопротивления, с двумя сенсорами из различных металлов, описанная в [3–5], приведена на рис. 1.

В работе [4] было показано, что с помощью приведенной схемы возможно рассчитать температуру двумя алгебраически не приводящимися друг к другу способами – на основе отношений измеренных сопротивлений ( $r_1$ ) и на основе приращений измеренных сопротивлений ( $r_2$ ).

Также в работе [4] было показано, что если в процессе эксплуатации у термопреобразователя происходит изменение коэффициентов сенсоров, то это будет приводить к существенному различию в измеренных разными способами температу-

---

**Белоусов Михаил Дмитриевич** – инженер кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет; avangard-susu@mail.ru

**Шестаков Александр Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы, ректор, зав. кафедрой информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет; admin@susu.ac.ru

**Япарова Наталья Михайловна** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математического анализа, Южно-Уральский государственный университет; ddjy@math.susu.ac.ru

---

**Mikhail Dmitrievich Belousov** – engineer of Information and Measurement Technology Department of South Ural State University; avangard-susu@mail.ru

**Alexander Leonidovich Shestakov** – Doctor of Science (Engineering), professor, Honorary Figure of Russian Higher Education, Rector, head of Information and Measurement Technology Department, of South Ural State University; admin@susu.ac.ru

**Natalia Mikhailovna Yaparova** – Candidate of Science (Physics and Mathematics), associate professor of Mathematical Analysis Department of South Ural State University; ddjy@math.susu.ac.ru

рах. Это позволило ввести в работе [4] параметр метрологического состояния, обозначенный в данной работе как  $d_1$ , характеризующий погрешность измеренной температуры как разность независимо измеренных температур:

$$d_1 = t2_n - \frac{t1_n + t1_{n-1}}{2}. \quad (1)$$

Поскольку температура  $t2$  находится на основе зависимостей производных сопротивления от температуры, то для уточнения её оценки используется среднее значение температуры  $t1$  текущего и предыдущего измерения. При неизменных коэффициентах термосопротивлений параметр  $d_1$  принимает значения, близкие к нулю.

Для сравнения характеристик, рассмотрим общепринятую схему преобразователя температуры, но с двумя сенсорами из различных металлов, также обладающего возможностью оценки собственного состояния в процессе эксплуатации. Возможная схема такого преобразователя температуры приведена на рис. 2.

Наличие двух сенсоров позволяет провести два независимых измерения температуры, обозначенных как  $t_{\text{ник}}$  и  $t_{\text{пл}}$ .

Данная схема, по сравнению со схемой, приведенной на рис. 1, содержит большее количество прецизионных элементов, поэтому мы вправе ожидать от нее лучших характеристик. Однако пара сопротивлений  $R_{\text{оп}}$  и  $R_{\text{пл2}}$ , с помощью которой происходит измерение температуры  $R_{\text{оп}}$ , представляют из себя подсхему, аналогичную схеме на

рис. 1, соответственно обладая идентичными с ней характеристиками.

Аналогично, если в процессе эксплуатации у термопреобразователя происходит изменение коэффициентов сенсоров, то это будет приводить к существенному различию в измеренных разными способами температурах, что позволяет ввести параметр метрологического состояния данной схемы термопреобразователя  $d_2$ :

$$d_2 = t_{\text{ник}} - t_{\text{пл}}. \quad (2)$$

В статье [5] было показано, что для схемы без опорного сопротивления величина параметра  $d$  и абсолютной погрешности имеют существенную корреляцию друг с другом. Проведя аналогичные преобразования для типичной схемы с двумя сенсорами, приведем полученные данные для обеих схем на рис. 3.

Из приведенных данных видно, что схема без опорного сопротивления обладает лучшей оценкой собственного состояния в процессе работы.

Сравнение величины корреляции параметра  $d$  и абсолютной погрешности для различных схем с оценкой собственного состояния в процессе работы, позволяет производить количественную оценку возможностей различных средств измерения с оценкой собственного состояния в процессе работы между собой.

Произведем оценку метрологического состояния термопреобразователей в условиях эксперимента.

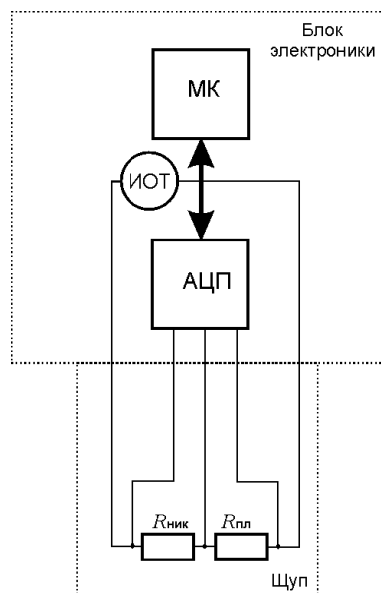


Рис. 1. Структурная схема преобразователя температуры без опорного сопротивления: МК – микроконтроллер, ИОТ – источник опорного тока, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь,  $R_{\text{ник}}$  и  $R_{\text{пл}}$  – никелевое и платиновое термочувствительные сопротивления (находятся в щупе)

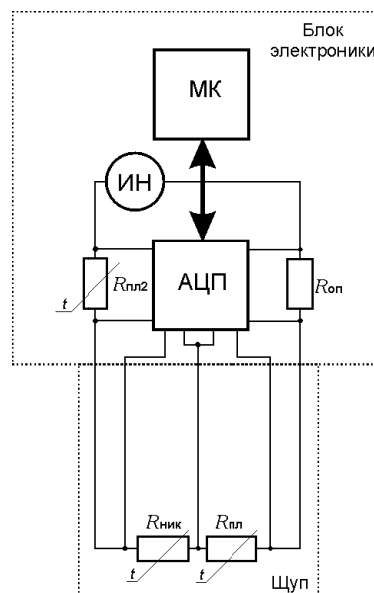


Рис. 2. Структурная схема типичного преобразователя термосопротивлений: ИН – источник напряжения,  $R_{\text{оп}}$  – опорное сопротивление,  $R_{\text{пл2}}$  – второе платиновое термочувствительное сопротивление (находится в блоке электроники). Остальные обозначения совпадают с обозначениями на рис. 1

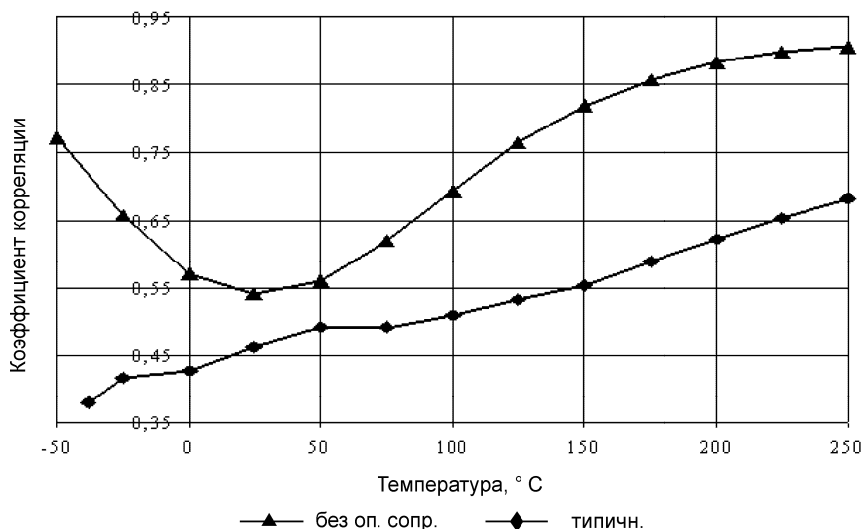


Рис. 3. Корреляция параметра метрологического состояния  $d$  и абсолютной погрешности измеренной температуры  $\Delta T_{абс}$  для рассматриваемых схем включения при  $P_{ош}=0,5$

## 2. Оценка метрологического состояния термопреобразователей в условиях эксперимента

Эталонный термометр сопротивления ЭТС-100 [6], работающий макет никелевого термосопротивления, платиновое термосопротивление, в качестве которого также используется отдельный эталонный термометр сопротивления ЭТС-100, помещались либо в калибратор температуры Элемер – КТ-500 [7], либо в калибратор температуры КТ-110 [8] в зависимости от температуры. С помощью прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивлений и термопар «Теркон» в комплекте с коммутатором выходных сигналов «Теркон-К» [9] измеренные данные передавались на компьютер.

Калибровка термосопротивлений проводилась по экспериментальным данным в точках температуры от +250 °C до –25 °C с шагом 25 °C, а также в точке –38 °C на основе метода наименьших квадратов.

Для оценки метрологического состояния проводилась имитация погрешности измерения по схеме, приведённой на рис. 4.

Параллельно одной паре проводов термосопротивления с одинаковой полярностью к клеммам «Теркон-К» подключен магазин сопротивлений. При короткозамкнутом магазине сопротивлений ( $R_{ош}=0$ ) сопротивление соединительных проводов одной полярности практически полностью добавляется к измеряемому значению термосопротивления. При большом значении  $R_{ош}$  вносимая погрешность измерения практически отсутствует. Подбирая необходимые промежуточные значения  $R_{ош}$ , можно добиться необходимых значений погрешности термосопротивления. Экспериментально подобранные значения  $R_{ош}$  для различных величин погрешностей при уставке температуры 250 °C приведены в таблице.

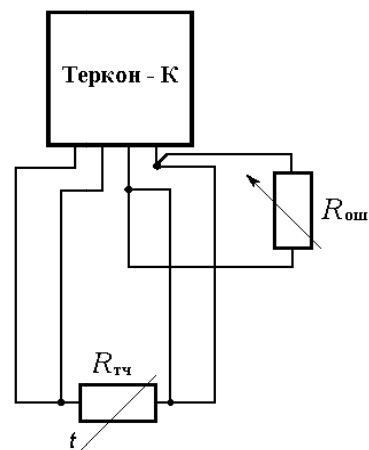


Рис. 4. Схема включения магазина сопротивлений для имитации погрешности измерения

Экспериментально подобранные  $R_{ош}$  для различных величин погрешностей при уставке температуры 250 °C

$R_{ош}, \text{Ом}$		Абс. погр/ допуст. погр.
никель	платина	
100к	100к	<< допуст.
52	27	0,2
19,4	11	0,5
6,8	4,5	1
0	0	$\approx 2$

При этом значения допустимой погрешности для никеля взяты из [10], для платины из [11]. Для всех полученных значений  $R_{ош}$  при всех калибровочных значениях температуры измерены соответствующие значения сопротивлений сенсоров.

Абсолютные значения погрешностей калибровки термопреобразователей в виде графиков приведены на рис. 5.

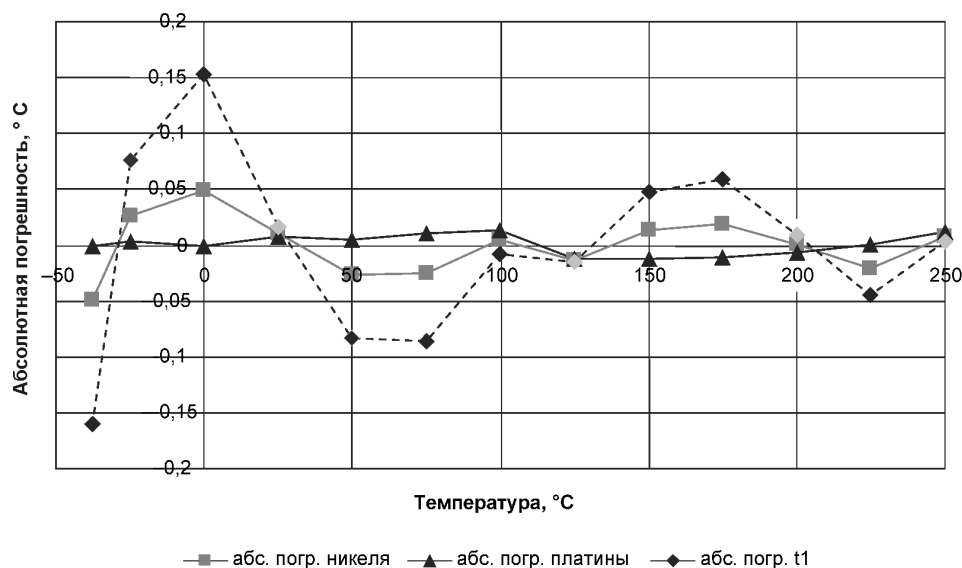


Рис. 5. Абсолютные значения погрешностей калибровки термопреобразователей

Из графиков на рис. 5 видно, что точность измерения температуры  $t_1$  изначально ниже точностей измерения температуры никелевого и платинового сенсоров в отдельности. Это объясняется более простой схемой измерения температуры  $t_1$ , имеющей меньшее количество прецизионных элементов.

Применение к экспериментальным данным алгоритма оценки погрешности температуры  $t_1$ , предложенного в статье [5], показало его адекватность, однако результаты эксперимента позволили улучшить полученные результаты, учитывая условия реального эксперимента. Поэтому возникла необходимость усовершенствования предложенного в [5] алгоритма для его уточнения на основе полученных экспериментальными данными. Возникла необходимость существенного увеличения рассматриваемого приращения температуры между измерениями. Поэтому существенным становится начальное смещение параметра  $d1_{см}$ .

Это смещение является функцией от температуры и приращения температуры между измерениями. Наиболее простым и эффективным вариантом расчета  $d1_{см}$  в каждом конкретном случае по алгоритмам, предложенным в статье [5], видится индивидуальный расчет параметра  $d$  при измеренных температурах и отсутствии погрешности. Скорректированное с учётом смещения значение ожидаемой температуры  $t1_{ожд}$  рассчитывается по формуле (3)

$$t1_{ожд} = k1(d1 - d1_{см}). \quad (3)$$

Коэффициент  $k1$ , предложенный в статье [5], также рассчитывался индивидуально, в каждом конкретном случае, для конкретной измеренной температуры  $t1_n$  и  $t1_{n-1}$ . Знак коэффициента выбирается таким образом, чтобы величина корреляции между ожидаемой и эталонной температурой принимала положительные значения.

Значение ожидаемой температуры  $t_{ожд}$  для типичной схемы преобразователя сопротивлений аналогично преобразованиям, полученным в работе [5], можно рассчитать из формулы (4):

$$t_{ожд} = k_2 d_2, \quad (4)$$

где коэффициент  $k_2$  может также быть рассчитан из преобразований, аналогичных для коэффициента  $k_1$ , приведенных в [5]. Результаты численного моделирования показывают, что для типичной схемы включения с двумя термосопротивлениями коэффициент  $k_2$  близок к единице вне зависимости от  $P_{ош}$  и измеряемой температуры.

Сравним характеристики оценки собственного состояния в процессе работы для приведённых схем на основе экспериментальных данных.

Эксперимент был проведён для температур от +125 °C до +250 °C включительно, с шагом 25 °C. В указанном диапазоне измерений согласно [5] для различных величин погрешностей из таблицы рассчитывалась средняя абсолютная погрешность измерений в сравнении с эталоном, а также средняя ожидаемая величина абсолютной погрешности для обеих схем. Полученные результаты представлены на рис. 6.

Экспериментальные результаты оценки собственного состояния подтверждают адекватность приведенного выше способа сравнения для оценок собственного состояния средств измерения в процессе работы.

Оценки собственного состояния термопреобразователей в процессе работы, приведенные на рис. 6, позволяют утверждать, что полученное решение задачи является неустойчивым по отношению к экспериментальным погрешностям, т. е. несущественные погрешности исходных данных оказывают существенное влияние на погрешность получаемого результата. Поэтому истинная по-

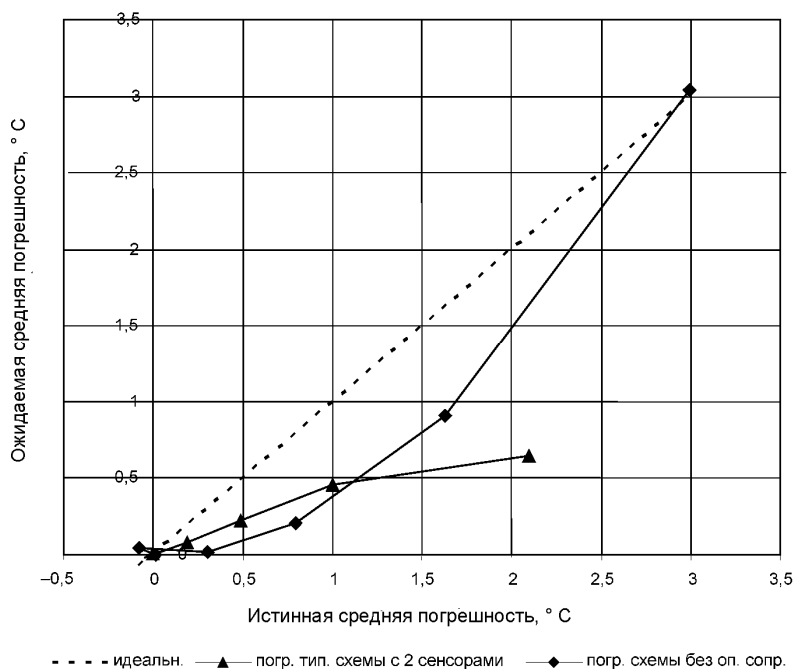


Рис. 6. Средние по диапазону абсолютные погрешности для рассматриваемых схем

грешность в приведенных алгоритмах заметно отклоняется от ожидаемой.

Это послужило основой для дальнейших исследований совершенствования предложенных алгоритмов с помощью теории решения обратных неустойчивых задач.

### Заключение

На практике проверена работоспособность оценки собственного состояния для схемы термометра, рассмотренной в работах [3–5]. По результатам эксперимента произведена корректировка алгоритмов работы. Произведено сравнение полученной оценки собственного состояния для типичной схемы термометра с двумя различными чувствительными элементами. Предложены пути дальнейшего совершенствования алгоритмов оценки собственного состояния термометра в процессе работы с помощью теории решения обратных неустойчивых задач.

### Литература

1. Концепция бизнеса компании «Йокогава». — <http://yokogawa.ru/conceptbusiness>
2. ГОСТ Р 8.673–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
3. Белоусов, М.Д. Преобразователь температуры без опорного сопротивления / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Ком-

пьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». — 2008. — № 3(103). — С. 29–33.

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

5. Белоусов, М.Д. Метод принятия решения в процессе работы о выходе термометра сопротивления за предел допустимой погрешности / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». — 2011. — № 23 (240). — С. 19–25.

6. Эталонные термометры сопротивления ЭТС-100. — <http://termexlab.ru/products/metrologyequipment/accessory/?id=98>

7. Характеристики калибратора температуры «Элемер-КТ-500». — [http://www.elemer.ru/production/metrology/kt/kt\\_500.php](http://www.elemer.ru/production/metrology/kt/kt_500.php)

8. Характеристики калибратора температуры «КТ-110». — [http://www.elemer.ru/production/metrology/kt/kt\\_110.php](http://www.elemer.ru/production/metrology/kt/kt_110.php)

9. Прецизионный преобразователь сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон». — <http://www.termexlab.ru/products/metrologyequipment/meters/?id=103>

10. Resistance Temperature Detectors (RTD'S). — <http://www.atpsensor.com/pdfs/rtd.pdf>

11. ГОСТ Р 8.625–2006. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний.

Поступила в редакцию 5 сентября 2012 г.