

УДК 621.317

**И.В. Григоренко, Т.В. Чунихина**, кандидаты техн. наук

### **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕСТОВЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

*Рассмотрена иерархическая структура системы контроля и управления. Показано, что для повышения точности вводится система “метрологического наблюдателя” на первом и втором уровне, который обеспечивает необходимую точность за счет применения методов тестового контроля первичных измерительных преобразователей в рабочих режимах без демонтажа и остановки системы.*

**Ключевые слова:** тестовый контроль, измерительный преобразователь, точность, статика, динамика, теория нечетких множеств.

**I.V. Grigorenko, PhD., T.V. Chunikhina, PhD.**

### **USING OF THE TEST METHODS OF THE CONVERTERS' ACCURACY INCREASING IN THE MEASURING SYSTEMS**

*The hierarchical structure of the control system was considered. The problem of the increasing of the system's accuracy was decided by including the system of the “metrological inspector” on the first and second level, which supports the required accuracy, using the method of the test check of the sensors without their dismantling and stopping the system.*

**Keywords:** test check, measuring converter, accuracy, static, dynamics, fuzzy logic.

**И.В. Григоренко, Т.В. Чунихина**, кандидаты техн. наук

### **ЗАСТОСУВАННЯ ТЕСТОВИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ**

*Розглянуто ієрархічну структуру системи контролю і керування. Показано, що для підвищення точності вводится система “метрологічного спостерігача” на першому та другому рівнях, який забезпечує необхідну точність за рахунок використання методів тестового контролю первинних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах без демонтажа та зупинки системи.*

**Ключові слова:** тестовий контроль, вимірювальний перетворювач, точність, статика, динаміка, теорія нечітких множин.

**Введение.** На сегодняшний день особенности технологических процессов требуют от автоматизированных информационных систем контроля и управления (АИСКУ) высокой точности измерений входных сигналов. Например, требования к точности измерения температуры на промышленных объектах приближаются к точности рабочих эталонов.

Главным структурным элементом АИСКУ является измерительный канал (ИК). Основной вклад в результирующую погрешность измерения входных сигналов вносят первичные измерительные преобразователи (ПИП) [5]. Задача усложняется тем, что современные измерительные процессы реализуются средствами измерений (СИ) с нелинейными функциями преобразования (ФП) в динамических режимах [6].

Необходимость реализации методов бездемонтажного контроля метрологических характеристик (МХ) ПИП в процессе их эксплуатации обусловлена невозможностью использования для этих целей традиционных методов поверки. Это объясняется следующими обстоятельствами:

1. Особенностью АИСКУ является длительный непрерывный режим эксплуатации, который делает невозможным остановку работы системы для проведения работ по метрологическому обеспечению ИК.

2. Комплексная поверка ИК на месте эксплуатации, по сути, частично комплексная, поскольку осуществляется поверка МХ вторичной части ИК путем имитации выходных сигналов датчиков при помощи калибраторов (“эталонов”). Первичные измерительные преобразователи поверяют отдельно.

3. Невозможен демонтаж ПИП для большей части технических объектов. При помощи встроенных датчиков измеряются параметры, определяющие эффективность и без-

опасность объектов, которые эксплуатируются.

Встроенная система, на которую возложены функции обеспечения необходимого уровня метрологического “качества” АИ-СКУ, получила в [4] название “метрологического наблюдателя” (МН).

В статье рассматриваются реляционно-разностные модели (РМ) и реперные реляционно-разностные модели (РРМ) операторов коррекции погрешностей первичных измерительных преобразователей в статических и динамических режимах. Понятие реляционно-разностной модели было введено в [6]. Под простой тестовой реляционно-разностной моделью понимается отношение двух разностей первого порядка, где разность первого порядка вычислялась как разница между значением выходного сигнала первичного преобразователя до и после тестовых воздействий.

#### **Тесто-калибровочный способ контроля термоэлектрических преобразователей**

Температурные измерения в промышленности составляют порядка 40 % общего объема измерений. Наиболее широко для измерения температуры используются контактные методы, которые реализуются при помощи термоэлектрических преобразователей (ТЭП) и термопреобразователей сопротивления.

Особенностью эксплуатации термоэлектрических преобразователей является то, что в процессе длительной эксплуатации на объекте в составе автоматизированных информационных систем контроля и управления они изменяют свои точностные характеристики вследствие физико-химических деградиционных процессов, протекающих в термоэлектродах термопар. Дрейф функции преобразования ТЭП и обусловленная им прогрессирующая погрешность снижают точность измерения температуры.

Применительно к термоэлектрическим преобразователям можно выделить конструктивно-технологические методы, методы калибраторов и тестовые методы повышения точности. Новым является применение одновременно двух методов: метода калибраторов [1] и тестовых методов контроля [2]. Это позволило определять погрешность измере-

ния сигнала температуры на уровне погрешности определения температуры плавления реперного материала. Предложенный способ [10] получил название тесто-калибровочного способа контроля метрологических характеристик ТЭП. Его суть состоит в создании сопряженных электрических воздействий на термопару за счет эффектов Пельтье и Джоуля в окрестностях рабочей и реперной точек реальной ФП ТЭП. При этом реперная точка определяется температурой фазового перехода встроенного калибратора в составе ТЭП. Оценка действительного значения измеряемой температуры рассчитывается по формуле

$$T_x = \frac{(E_x^{\text{III}} - E_x^{\text{II}})(E_{\Phi}^{\text{III}} + E_{\Phi}^{\text{II}} - 2E_{\Phi}^{\text{I}})^2}{(E_{\Phi}^{\text{III}} - E_{\Phi}^{\text{II}})(E_x^{\text{III}} + E_x^{\text{II}} - 2E_x^{\text{I}})^2} \cdot T_{\Phi}, \quad (1)$$

где  $T_x$  – измеряемая температура;  $T_{\Phi}$  – температура фазового перехода реперного материала;  $E_x^{\text{I}}, E_x^{\text{II}}, E_x^{\text{III}}$  – термоЭДС, соответствующие начальной температуре рабочего спаия термопары и температурам после охлаждения и нагрева термопары после пропускания тока соответствующей полярности (в окрестности температуры  $T_x$ );  $E_{\Phi}^{\text{I}}, E_{\Phi}^{\text{II}}, E_{\Phi}^{\text{III}}$  – термоЭДС, соответствующие начальной температуре рабочего спаия термопары и температурам после охлаждения и нагрева термопары после пропускания тока соответствующей полярности (в окрестности температуры  $T_{\Phi}$ ).

Предложенный тесто-калибровочный способ позволил оценить действительные значения измеряемой температуры в рабочей точке шкалы измерительного преобразователя с нелинейной ФП во всем диапазоне измерения. Система контроля термопар в рабочих условиях имеет измерительную подсистему и систему формирования тестовых воздействий.

При этом рассматривается задача коррекции как систематических аддитивных и мультипликативных погрешностей, так и погрешностей нелинейности. Погрешности нелинейности обуславливаются нелинейностью функций преобразования ТЭП в статическом режиме. В работе [10] проведен анализ погрешности нелинейности функциональных реляционно-разностных и функ-

циональных реперных реляционно-разностных моделей, обусловленной нелинейностью ФП ПИП. Переход к функциональным операторам коррекции позволяет свести анализ МХ РМ и РРМ к анализу простой тестовой РМ. Таким образом, функциональный оператор можно представить в следующем виде

$$C_{\psi} = F(\psi_1, \psi_2, \psi_i, \dots, \psi_n), \quad (2)$$

где  $F$  – функциональный оператор;  
 $\psi_i$  –  $i$ -ые тестовые РМ.

Погрешность нелинейности разности первого порядка

$$\Delta_{\text{нел}}(\Delta y_{10}) = \Delta y_{10\text{л}} - \Delta y_{10\text{нсх}} = y_{1\text{л}} - y_{1\text{нсх}}, \quad (3)$$

где  $\Delta y_{10\text{л}}$  – разность первого порядка, вычисленная путем линейного приближения;  $\Delta y_{10\text{нсх}}$  – разность первого порядка, вычисленная по номинальной статической характеристике (НСХ), если в качестве ПИП используется термоэлектрический преобразователь;  $y_{1\text{л}}$  – выходной сигнал после тестового воздействия, вычисленный путем линейного приближения;  $y_{1\text{нсх}}$  – выходной сигнал после тестового воздействия, определенного по НСХ.

Выходной сигнал после действия теста в линейном приближении определяется первыми двумя членами разложения функции в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки, возле которой проводятся тестовые испытания:

$$y_{1\text{л}} = y(x) + y^{(1)}(x)\theta. \quad (4)$$

Абсолютная погрешность нелинейности тестовой РМ вычислялась с использованием методики обработки нелинейных косвенных измерений.

Относительная погрешность нелинейности тестовой РМ

$$\delta_{\text{нел}}\psi_{\text{тест}} = \delta_{\text{н1}} - \delta_{\text{н2}}, \quad (5)$$

где  $\delta_{\text{н1}}$  – относительная погрешность нелинейности разности первого порядка числителя тестовой РМ;  $\delta_{\text{н2}}$  – относительная погрешность нелинейности разности первого порядка знаменателя тестовой РМ.

Функциональный оператор, соответствующий формуле (1), имеет вид

$$C_{\psi} = \psi_3 \frac{(1 + \psi_1)(1 - \psi_2)^2}{(1 + \psi_2)(1 - \psi_1)^2}, \quad (6)$$

где  $\psi_1 = \frac{\Delta y_3^{\text{II}}}{\Delta y_2^{\text{II}}}$ ,  $\psi_2 = \frac{\Delta y_3^{\text{I}}}{\Delta y_2^{\text{I}}}$ ,  $\psi_3 = \frac{\Delta y_2^{\text{I}}}{\Delta y_2^{\text{II}}}$  – тестовые

РМ;  $\Delta y_2^{\text{I}}, \Delta y_3^{\text{I}}$  – разности первого порядка, полученные при действии тестов в окрестности номинальной точки;  $\Delta y_2^{\text{II}}, \Delta y_3^{\text{II}}$  – разности первого порядка, полученные при действии тестов в окрестности рабочей точки.

Абсолютная погрешность нелинейности функционального оператора рассчитывается по следующей формуле

$$\Delta_{\text{нел}}C_{\psi} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_{\psi}}{\partial \psi_i} \Delta_{\text{нел}}\psi_i, \quad (7)$$

где  $\Delta_{\text{нел}}\psi_i$  – абсолютная погрешность нелинейности тестовой РМ  $\psi_i$ .

Относительная погрешность нелинейности функционального оператора при использовании термопары градуировки хромель-капель,  $T_x = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_n = 320^{\circ}\text{C}$ ,  $+\theta = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $-\theta = -7^{\circ}\text{C}$ ,  $\psi_1 = \psi_2 = 0,1$  и  $\psi_3 = 0,9$  составила  $\delta_{\text{нел}}C_{\psi} = 0,14\%$ .

Проведенные исследования указывают на зависимость погрешности нелинейности функциональных операторов коррекции от рабочей точки, в окрестности которой проводятся тестовые воздействия, от значений тестов и от их соотношения. Показано, что минимальное значение относительной погрешности нелинейности простой тестовой РМ будет наблюдаться при воздействии на преобразователь разнополярных, одинаковых по значению тестов.

### Тестовый динамический контроль

В динамических моделях операторов коррекции возникает необходимость определения и коррекции нелинейной динамической составляющей погрешности. Динамический режим тестового контроля был рассмотрен для линейной, параболической и экспоненциальной моделей изменения входного сигнала. Построение интерполяционного полинома позволяет уменьшить динамическую составляющую погрешности. Интегральное значение погрешности определяется методами теории нечетких множеств с учетом погрешностей коэффициента переда-

чи и погрешности определения постоянной времени.

Проблема обеспечения системной метрологической совместимости разных уровней автоматизированной информационной системы контроля и управление для достижения цели ее функционирования включает три взаимосвязанных комплекса задач [6].

На первом уровне АИСКУ – решение задачи назначения соответствующих допусков для каждого параметра, который контролируется. Это дает возможность определить необходимые средства измерений и значения их предельных погрешностей, которые необходимо контролировать в рабочих режимах. На данном уровне, возможно, решать задачу прогноза состояния каждого измерительного преобразователя (ИП).

На втором уровне становится возможным сформировать как технологический, так и метрологический “образ” объекта контроля с учетом действия внешних и внутренних факторов. Метрологический образ объекта является комплексным и многомерным [6]. Это означает, что ИП АИСКУ рассматривается как “простой” объект, который достаточно полно описывается математическими статистическими методами. Система ИП, блок управления и координации метрологического состояния рассматриваются как “сложная” система, в которой значительную часть информации, необходимой для осуществления задач метрологической координации [4], представлено в виде рекомендаций специалистов-технологов и метрологов. Такой подход позволяет соединить теории статистических методов оценки состояния астатических компенсационных преобразователей с теорией нечетких размытых множеств (системы FUZZY logic) [4, 7, 9] для построения системы ситуационного реагирования, которая следит за метрологической ситуацией.

Рассмотрим линейную инвариантную во времени систему со следующей передаточной функцией

$$H(p; T, k) = \frac{k}{Tp + 1}, \quad (8)$$

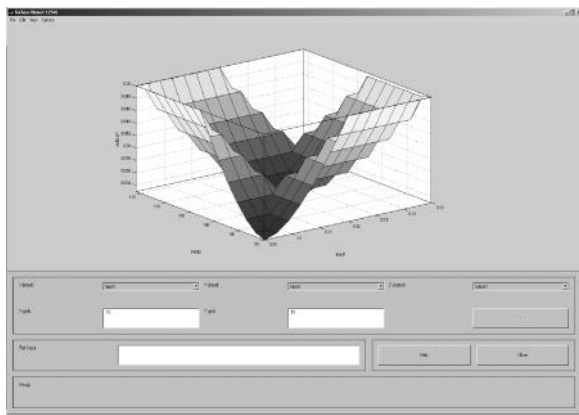
где  $T$  – постоянная времени звена;  $k$  – коэффициент преобразования звена.

Было установлено [3], что на динамическую погрешность астатической замкнутой системы влияют два параметра: нестабильность постоянной времени  $\Delta T$  и нестабильность коэффициента преобразования звеньев  $\Delta k$ . При анализе динамических характеристик астатических систем целесообразно использовать интегральный критерий ошибки, который в свою очередь, удобно представить с помощью аппарата теории нечетких множеств. Нечеткий анализ определяется во временной области и не имеет никаких ограничений, в то время как традиционный анализ пригоден только в пределах определенных частотных границ.

Для определения минимума динамической погрешности необходимо создать на втором уровне АИСКУ ситуационную модель системы метрологического контроля измерительного канала на базе задания метрологических ситуаций в терминах теории нечетких множеств. В работе [3] предложен метод описания метрологических ситуаций на уровне отдельного астатического электрического компенсационного измерительного преобразователя (ЭКИП). Обосновано, что наиболее целесообразно задавать три опорные ситуации для значений погрешностей “малая”, “средняя” и “большая”. Разработаны модели фаззификации и дефаззификации сигналов, которые позволяют учитывать как систематическую, так и случайную составные погрешности определения входных сигналов ЭКИП.

На рисунке представлена фигура, полученная при помощи программы MatLab, центр тяжести которой указывает на минимум динамической погрешности при заданных значениях  $\Delta T$  и  $\Delta k$  [3].

Предложенный подход приводит на втором уровне АИСКУ к понятию “метрологического образа”, который необходимо анализировать согласно состоянию ЭКИП на базе оценок отклонений реальных технологических параметров от их номинальных, заданных значений.



### Дефаззификация

**Заключение.** Рассмотренная концепция “метрологического наблюдателя” на первом уровне системы охватывает устройства получения информации и методы повышения точности измерений. Это тестовые методы контроля. Они обеспечивают метрологическую надежность первичных измерительных преобразователей. Задача координации на втором уровне системы должна решаться с учетом принятого метода координации, например, координации по времени выполнения измерения и контроля. Дальнейшие исследования тестовых методов видятся в анализе измерительных преобразователей с иными моделями функций преобразования и алгоритмами интегрирования и дифференцирования для построения новых классов реляционно-разностных и реперных реляционно-разностных моделей операторов коррекции.

### Список использованной литературы

1. А. с. 1796919 А1 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 K 7/02. Способ определения температуры / Ю. В. Поздняков, В. Н. Учанин, Ю. М. Мирош, В. Р. Фесенко (СССР). – № 4866630/10; заявл. 21.06.90; опубл. 23.02.93, Бюл. № 7. – 5 с.: ил.
2. Головки Д. Б. Структурно – алгоритмічні методи підвищення точності вимірювання температури / Д. Б. Головки, Ю. О. Скрипник, Г. І. Хімічева. – К.: ФАДА ЛТД, 1999, – 206 с.
3. Григоренко І. В. Розвиток тестових методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворю-

вачів у динамічних режимах: дис. ... кандидата техн. наук: 05.11.05 / Григоренко Ігор Володимирович. – Харків: 2010. – 224 с.

4. Диденко К. И. Метрологический наблюдатель в системах контроля и управления / К. И. Диденко, С. И. Кондрашов // Український метрологічний журнал. – 1997. – № 2. – С. 44 – 47.

5. Карцев Б.А. Состояние и тенденции развития датчиков физических величин / Б. А. Карцев // Измерительная техника. – 1991. – № 12. – С. 8–11.

6. Кондрашов С. І. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах: моногр. / С. І. Кондрашов. – Харків.: НТУ “ХП”, 2004. – 224 с.

7. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

8. Пат. 45037 А Україна, МПК G 01 K 7/02. Спосіб вимірювання температури та пристрій для його здійснення / Діденко К. І., Кондрашов С. І., Чуніхіна Т. В.; заявник та патентовласник Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – № 2001031746; заявл. 15.03.2001; опубл. 15.03.2002, Бюл. № 3. – 9 с.: іл.

9. Рональд Р. Ягер. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / под ред. Рональда Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.

10. Чуніхіна Т. В. Тесто – калібрувальні методи підвищення точності електричних вимірювальних перетворювачів: дис. ... кандидата техн. наук: 05.11.05 / Чуніхіна Тетяна Віталіївна. – Харків, 2010. – 203 с.

Получено 11.05.2012

### References

1. А. с. 1796919 А1 USSR, G 01 K 7/02. The method of the determined of the temperature / Y. V. Pozdnykov, V. N. Uchanin, Y. M. Mirosh, V. R. Fesenko (USSR). – № 4866630/10; declared 21.06.90; published 23.02.93, Bull. № 7. – 5 p. [in Russian].
2. Golovko D. B. – The structure-algorithmic methods of the increasing of the accuracy of the measurements of the temperature /

D. B. Golovko, Y. A. Skrypnik, A. I. Himicheva – Kiev: FADA LTD, 1999. – 206 p. [in Ukrainian].

3. Grigorenko I. V. Development of test methods increase exactness of electric compensative measurings transformers in the dynamic modes: thesis ... PhD.: 05.11.05 / Grigorenko Igor Vladimirovich. – Kharkiv: – 2010. – 224 p. [in Ukrainian].

4. Golovko D. B. The metrological inspector in the systems of the check and control / D. B. Golovko, Y. A. Skrypnik, A. Himicheva // The Ukrainian metrological journal. – 1997. – № 2. – P. 44–47 [in Russian].

5. Karzev B. A The state and the tendencies of the development of the sensors of the physical values / B. A. Karzev // The measurement technique. – 1991. – № 12. – P. 8–11 [in Russian].

6. Kondrashov S. I. The methods of the increasing of the accuracy of the systems of the test check of the electrical measuring converters at the working regime: monograph / S. I. Kondrashov. – Kharkiv: NTU “KPI”, 2004. – 224 p. [in Ukrainian].

7. Kofman A. The introduction to the fuzzy theory / A. Kofman. – Moscow: Radio and connection, 1982. – 432 p. [in Russian].

8. Pat. 45037 A Ukraine, G 01 K 7/02 The methods of the measurement of the temperature and the device to its realizations / Didenko K. I., Kondrashov S. I., Chunikhina T. V.; declarant and patent holder The National technical university “Kharkov polytechnic institute”. – № 2001031746; declared 15.03.2001; published 15.03.2002, Bull. № 3. – 9 p. [in Ukrainian].

9. Ronald R. Yager. The fuzzy logic and the theory of the possibility. The last achievement / Ronald R. Yager. – Moscow: Radio and connection, 1986. – 408 p. [in Russian]

10. Chunikhina T. V. The test-calibration methods of the increasing of the electrical measuring converters’ accuracy: thesis ... PhD.: 05.11.05 / Chunikhina Tetiana Vitaliivna. – Kharkiv: 2010. – 203 p. [in Ukrainian].



Григоренко  
Игорь Владимирович,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
информационно измери-  
тельных технологий и  
систем Нац. технич. ун-та  
“Харьковский политехни-  
ческий институт”,  
тел. 707-60-15



Чунихина  
Татьяна Витальевна,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
информационно-измери-  
тельных технологий и  
систем Нац. технич. ун-та  
“Харьковский политехни-  
ческий институт”,  
тел. 707-60-15  
e-mail: ctv@kpi.kharkov.ua