

# Прикладні аспекти: вимірювання параметрів складних об'єктів

УДК 621.317

С.И. Кондрашов, Т.В. Чунихина

Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ

*Тестовый контроль является единственным возможным методом решения задачи бездемонтажного контроля неопределенности и коррекции погрешностей измерительных преобразователей. В работе проведен анализ неопределенности измерений типа В при реализации тестового контроля. Предложен метод оценивания неопределенности результатов тестовой коррекции для конкретных систем тестового контроля электрических измерительных преобразователей и синтеза тесто-калибровочных систем контроля измерительных преобразователей при заданной неопределенности результатов контроля.*

**Ключевые слова:** *тестовый контроль, измерительный преобразователь, неопределенность измерений, оператор коррекции.*

### Постановка задачи

На сегодняшний день особенность технологических процессов современных производств требует от автоматизированных информационных систем контроля и управления (АИСКУ) очень высокой (иногда – на уровне рабочих эталонов) точности измерения параметров технологических процессов. Точность измерительных каналов АИСКУ определяется, в основном, точностными характеристиками первичных измерительных преобразователей (ПИП). В течение длительной эксплуатации первичных преобразователей на объекте происходит изменение параметров номинальной функции преобразования (ФП), что приводит к возникновению погрешности измерения тех или иных параметров технологического процесса. Задача метрологического обеспечения АИСКУ усложняется тем, что современные измерительные процессы выполняются средствами измерения с нелинейными функциями преобразования в динамических режимах [1]. Для современных АИСКУ характерным является длительный непрерывный режим эксплуатации, который не позволяет демонтировать ПИП для осуществления поверки. Таким образом, разработка бездемонтажных методов контроля и коррекции метрологических характеристик первичных измерительных преобразователей является актуальной задачей.

**Целью** настоящей статьи является исследование неопределенности измерений при проведении тестового контроля первичных измерительных преобразователей.

### Реляционно-разностные модели операторов коррекции

При исследовании систем тестового контроля первичных измерительных преобразователей был сделан вывод, что независимо от физических процессов, протекающих в преобразователях, расчет оценки действительного значения измеряемой величины осуществляется через некоторый безразмерный оператор коррекции. Структура этого оператора обусловила его название – реляционно-разностные модели (РМ) операторов коррекции входных значений измерительных преобразователей [1]. Разностный метод позволяет исключить аддитивную систематическую погрешность. Использование реляционной модели как отношения разностей первого порядка позволяет исключить мультипликативную систематическую погрешность (где разность первого порядка вычислялась как разница между значением выходного сигнала первичного преобразователя до и после тестовых воздействий). В случае, если в расчетную формулу для определения оценки действительного значения измеряемой величины входит некоторое номинальное значение этой величины, то такие модели получили название реперных реляционно-разностных моделей (РРМ) [2].

На основе РМ и РРМ моделей были получены так называемые функциональные РМ, как функционалы от простых тестовых РМ [2]. Последние определялись как безразмерные функции отношений двух разностей первого порядка. Переход к функциональным операторам коррекции позволяет свести анализ МХ РМ и РРМ к анализу простой тесто-

вой РМ. Таким образом, функциональный оператор можно представить в виде

$$C_{\Psi} = F(\psi_1, \psi_2, \psi_i, \dots, \psi_n), \quad (1)$$

где  $F$  – функциональный оператор;  $\psi_i$  – простые тестовые РМ.

### Оценка неопределенности функциональных операторов коррекции

Функциональный оператор  $C_{\Psi}$  представляет собой результат косвенных измерений. Неопределенность оценки выходной величины в соответствии с [3] находят как

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i)},$$

где  $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$  – коэффициенты чувствительности

входных величин;  $u(x_i)$  – стандартная неопределенность входной величины.

В случае использования систем тестового контроля проверка условия пренебрежения высшими членами разложения функции в ряд Тейлора является необходимой процедурой

$$R \leq 0,8u_c(\hat{x}_0), \quad (2)$$

где  $u_c(\hat{x}_0) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial F}{\partial x_j}\right)^2} u(\bar{x}_j)$  – суммарная стандартная неопределенность оценки значения ( $\hat{x}_0$ ).

Метод оценивания неопределенности функциональных операторов рассмотрим на примере функционального оператора, который соответствует тестовому способу контроля метрологических характеристик термоэлектрических преобразователей [4]. Функциональный оператор имеет вид

$$C_{\Psi} = \frac{(\Delta y_2^{\text{II}} + \Delta y_3^{\text{II}})(\Delta y_2^{\text{I}} - \Delta y_3^{\text{I}})^2}{(\Delta y_2^{\text{I}} + \Delta y_3^{\text{I}})(\Delta y_2^{\text{II}} - \Delta y_3^{\text{II}})^2} = \psi_3 \frac{(1 + \psi_1)(1 - \psi_2)^2}{(1 + \psi_2)(1 - \psi_1)^2},$$

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 тестовых воздействиях в окрестности номинальной точки;  $\Delta y_2^{\text{II}}$ ,  $\Delta y_3^{\text{II}}$  – разности первого порядка, полученные в окрестности рабочей точки.

Был предложен общий метод определения оценки дисперсии тестовых РМ и погрешностей тестовых

РМ. Разности первого порядка свободны от систематических погрешностей средства измерительной техники, однако, при вычислении разностей первого порядка увеличивается случайная погрешность, обусловленная погрешностью квантования АЦП

$$M \left[ \Delta \left( \Delta^{(1)} y_i \right) \right] = 0;$$

$$u^2 \left[ \Delta y_i \right] = \frac{q^2}{12}; \quad u^2 \left[ \Delta \left( \Delta^{(1)} y_i \right) \right] = \frac{q^2}{6},$$

где  $q$  – шаг квантования АЦП.

Неопределенность типа В разностей первого порядка для многократных измерений вычисляется

$$u(\Delta y_2^{\text{I}}) = u(\Delta y_2^{\text{II}}) = u(\Delta y_3^{\text{I}}) = u(\Delta y_3^{\text{II}}) = \frac{q}{\sqrt{6k}}, \quad (3)$$

$k$  – число измерений.

С учетом (3) дисперсия для тестовых РМ определяется

$$u^2(\psi_1) = \frac{q^2}{6k \cdot (\Delta y_2^{\text{II}})^2} (1 + \psi_1^2),$$

$$u^2(\psi_2) = \frac{q^2}{6k \cdot (\Delta y_2^{\text{I}})^2} (1 + \psi_2^2),$$

$$u^2(\psi_3) = \frac{q^2}{6k \cdot (\Delta y_2^{\text{II}})^2} (1 + \psi_3^2).$$

Максимальное значение случайной погрешности тестовой РМ определяется как

$$\psi_{1\text{max}} = \frac{\Delta y_3^{\text{II}} + q}{\Delta y_2^{\text{II}} - q} = \frac{\Delta y_3^{\text{II}} (1 + D_q^{-1})}{\Delta y_2^{\text{II}} (1 - D_q^{-1})} = \psi_1 \frac{1 + D_q^{-1}}{1 - D_q^{-1}},$$

где  $D_q = \frac{\Delta^{(1)} y}{q}$  – динамический диапазон значений

теста по отношению к шагу квантования.

Тогда предельная абсолютная погрешность  $\psi_1$

$$\Delta \psi_1 = \psi_{1\text{max}} - \psi_1 = \psi_1 \cdot \frac{2D_q^{-1}}{1 - D_q^{-1}}.$$

Поскольку  $D_q = \frac{\Delta^{(1)} y}{q} \approx 10$ , то  $1 - D_q^{-1} \approx 1$ ,

$$\Delta \psi_1 \approx \psi_1 \cdot 2D_q^{-1}.$$

Представим случайную погрешность, обусловленную погрешностью квантования, через разрядность АЦП

$$q = \Delta_{\text{кв}} = \frac{Y_{\text{max}}}{N} = \frac{Y_{\text{max}}}{2^n - 1} \approx \frac{Y_{\text{max}}}{2^n},$$

где  $Y_{\text{max}}$  – максимальное значение диапазона измерения АЦП;  $n$  – число разрядов АЦП.

Из условия (2) было получено критическое число разрядов АЦП  $n_{кр}$ , при котором можно пренебречь высшими членами ряда Тейлора.

Для определения эффективного числа степеней свободы была использована формула Велча-Саттерсвейта

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^m \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{v_i}}$$

где  $v_i$  – число степеней свободы при определении оценки  $x_i$  входной величины  $X_i$ .

Поскольку суммарная стандартная неопределенность  $C_{\psi}$  содержит лишь неопределенности по типу В, то  $v_{eff} = \infty$ . Предполагая нормальный закон распределения  $C_{\psi}$ ,  $t_{0,95}(\infty) = 2$  [5].

Тогда расширенная неопределенность оценки  $C_{\psi}$  для  $P_D = 0,95$  определяется по формуле

$$\delta_p(C_{\psi}) = 2,0 u(C_{\psi}). \quad (4)$$

Формула (4) позволяет рассчитывать необходимое число разрядов АЦП  $n$ . Условие выбора разрядов АЦП:  $n = n_{кр}$ . Из этого условия находим константу модели  $C$ :  $k\delta_p(C_{\psi}) = C$ . Константа модели представляет собой неопределенность результатов тестового контроля при однократном измерении. Приняв,  $\psi_1 = \psi_2 = 0,1$ ,  $\psi_3 = 0,9$ , получим  $C = 0,35$ . Для систем тестового контроля  $D_y = 5$ ,  $D_{\Delta(1)y} = 40$ .

При таких исходных данных формула для расчета необходимого числа разрядов АЦП принимает вид

$$n = 11,7 + 0,5 \log_2 k$$

Полученная формула позволяет рассчитывать необходимую разрядность АЦП с учетом критерия (2). Так, для обеспечения неопределенности результатов тестового контроля на уровне 0,1% число дополнительных измерений должно составлять 350, число разрядов АЦП  $n = 16$ .

## Выводы

Предложен метод оценивания неопределенности результатов тестовой коррекции для конкретных систем тестового контроля и синтеза систем при заданной неопределенности результатов контроля.

## Список литературы

1. Кондрашов С.И. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах [Текст]: моногр. / С.И. Кондрашов. – Х.: НТУ “ХП”, 2004. – 224 с.
2. Чуніхіна Т.В. Тесто-калібрувальні методи підвищення точності електричних вимірювальних перетворювачів [Текст]: дис. на здобуття наук. ступеня кандидата техн. наук: 05.11.05 / Чуніхіна Тетяна Віталіївна. – Харків, 2010. – 203 с.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements [Text]. - Geneva: ISO, First Edition, 1995. - 101 p.
4. Пат. 45037 А Україна, МПК G 01 K 7/02 Спосіб вимірювання температури та пристрій для його здійснення [Текст] / 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.
5. Захаров, И.П. Теория неопределенности в измерениях [Текст] / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков: Консум, 2002. - 256 с.

Поступила в редколлегию 12.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.Ф. Павленко, Национальный научный центр “Институт метрологии”, Харьков.

## ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ В СИСТЕМАХ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ

С.И. Кондрашов, Т.В. Чуніхіна

Тестовий контроль є єдиним можливим методом для вирішення задачі бездемонтажного контролю невизначеності і корекції похибок вимірювальних перетворювачів. У роботі проведено аналіз невизначеності типу В при реалізації тестового контролю. Запропоновано метод оцінювання невизначеності результатів тестової корекції для конкретних систем тестового контролю електричних вимірювальних перетворювачів та синтезу тесто-калібрувальних систем контролю вимірювальних перетворювачів при заданій невизначеності результатів контролю.

**Ключові слова:** тестовий контроль, вимірювальний перетворювач, невизначеність вимірювань, оператор корекції.

## THE ESTIMATION OF THE MEASUREMENTS' UNCERTAINTY IN THE TEST CHECK SYSTEMS

S.I. Kondrashov, T.V. Chuniuhina

The one of the probable methods for the solve of the problem of the non-dismantling check of the uncertainty and correction of the measuring converters' errors is the test check. The analysis of the measurements' uncertainty for type B was done. The method of the estimation of the uncertainty of the results of the test correction for the concrete systems of the test check of the electrical measuring converters and the synthesis the test-calibration system of the check of the measuring converters with account the criterion of the uncertainty were proposed.

**Keywords:** test check, measuring converter, measurements' uncertainty, operator of the correction.