

УДК 621.317

А.А. Данилов<sup>1</sup>, А.В. Зинкина<sup>2</sup>, Ю.В. Кучеренко<sup>1</sup>, Н.П. Ординарцева<sup>2</sup>, Е.Г. Цуканова<sup>2</sup><sup>1</sup> ФБУ «Пензенский ЦСМ», Пенза, Россия<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, Россия

## ПОЭЛЕМЕНТНАЯ КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ: АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматриваются вопросы оценивания неопределенности измерений при проведении поэлементной калибровки измерительных каналов измерительных систем. Предложен алгоритм оценивания неопределенности измерений при калибровке измерительного канала в целом на основании оценок неопределенности измерений, полученных при поэлементной калибровке компонентов измерительного канала: первичного измерительного преобразователя в нормальных условиях эксплуатации и вторичной части измерительного канала в рабочих условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** измерительные каналы, измерительные системы, калибровка, неопределенность

### Введение

**Постановка проблемы.** Проведение комплектной калибровки большинства измерительных каналов (ИК) измерительных систем (ИС) экономически не оправдано и технически нереализуемо. Именно поэтому калибровку ИК ИС проводят преимущественно поэлементно [1 – 4]. При этом калибровку первичных измерительных преобразователей (ПИП) обычно проводят после их демонтажа в нормальных условиях эксплуатации, а калибровку оставшейся (недемонтированной) части, так называемой вторичной части (ВЧ), ИК (рис. 1) – в рабочих условиях эксплуатации. Предполагается, что в состав вторичной части ИК включен и вычислительный компонент ИС, относящийся к данному ИК.

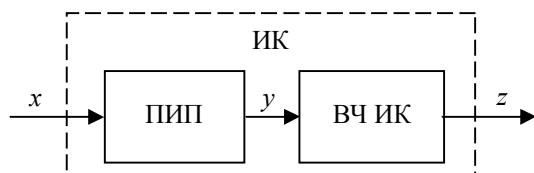


Рис. 1. Схема одного из ИК ИС

Однако знание оценок неопределенности измерений при проведении калибровки компонентов ИК в некоторых точках диапазона их измерений для большинства практических применений, включая измерения в промышленности, недостаточно. Это обусловлено тем, что пользователям ИК нужны сведения о неопределенности измерений не каждого из компонентов ИК, а ИК в целом, и не в некоторых точках диапазона его измерений, а в произвольной его точке.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Одним из значимых документов, принятых МГС в последнее время, устанавливающих алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности измерений при проведении

калибровки средств измерений, стали рекомендации РМГ 115-2011 [5]. Однако даже столь значимый и объемный документ не в состоянии предусмотреть все возможные ситуации, возникающие в практике измерений в промышленности. Именно поэтому в нём не нашли отражения вопросы оценивания неопределенности измерений при проведении поэлементной калибровки ИК ИС.

**Формулирование цели статьи.** Цель статьи состоит в обосновании алгоритма оценивания неопределенности измерений ИК в целом на основании оценок неопределенности измерений, полученных при поэлементной калибровке компонентов измерительного канала: ПИП – в нормальных условиях эксплуатации и ВЧ ИК – в рабочих условиях эксплуатации.

### Изложение основного материала исследования

Предполагается, что проводится поэлементная калибровка ПИП и ВЧ ИК. При этом калибровка ПИП выполняется методом прямых многократных измерений калибруемым ПИП величин, воспроизводимых с помощью первой многозначной эталонной меры (ММ1), а измерение выходной величины ПИП осуществляется с помощью эталонного прибора (ЭП). Калибровка же ВЧ ИК выполняется методом прямых многократных измерений калибруемым ВЧ ИК величин, воспроизводимых с помощью второй многозначной эталонной меры (ММ2), а отсчет показаний ВЧ ИК осуществляется с экрана монитора ЭВМ. Схемы подключения эталонов изображены на рис. 2 и 3 соответственно.

Исходными данными для оценивания неопределенности измерений ИК в целом являются таблицы показаний ПИП (табл. 1) и ВЧ ИК (табл. 2) в каждой калибруемой точке диапазона измерений и соответствующие суммарные стандартные неопределенности

(или расширенные неопределённости с указанием коэффициента охвата). При этом количество точек диапазона измерений ПИП ( $n$ ) и ВЧ ИК ( $m$ ) может не совпадать. Следовательно, номинальные значения выходной величины калибруемого ПИП и величины, воспроизводимой ММ2 могут быть различными.



Рис. 2. Схема подключения эталонов при калибровке ПИП

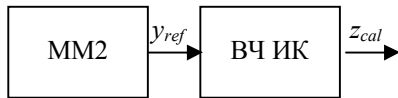


Рис. 3. Схема подключения эталона при калибровке ВЧ ИК

Таблица 1

Таблица показаний ПИП и соответствующие суммарные стандартные неопределённости

№	$X_{ref}$	$Y_{ref} (Y_{cal})$	$U(x)$
1	$x_{ref 1}$	$Y_{ref} (y_{cal 1})$	$U(x_1)$
2	$x_{ref 2}$	$Y_{ref} (y_{cal 2})$	$U(x_2)$
...	...	...	...
$n$	$x_{ref n}$	$Y_{ref} (y_{cal n})$	$U(x_n)$

Таблица 2

Таблица показаний ВЧ ИК и соответствующие суммарные стандартные неопределённости

№	$Y_{ref}$	$Z_{cal}$	$U(y)$
1	$y_{ref 1}$	$z_{cal} (y_{ref 1})$	$U(y_1)$
2	$y_{ref 2}$	$z_{cal} (y_{ref 2})$	$U(y_2)$
...	...	...	...
$m$	$y_{ref m}$	$z_{cal} (y_{ref m})$	$U(y_m)$

Здесь принято:

$X_{ref}$  и  $x_{ref i}$  – величина и её  $i$ -е значение, воспроизводимое ММ1;  $Y_{cal}$  и  $y_{cal i}$  – выходная величина калибруемого ПИП и её  $i$ -ое значение;  $Y_{ref} (Y_{cal})$  и  $Y_{ref} (y_{cal i})$  – показания ЭП, соответствующие  $i$ -му значению выходной величины калибруемого ПИП;  $Y_{ref}$  и  $y_{ref j}$  – величина и её  $j$ -е значение, воспроизводимое ММ2;  $Z_{cal} (Y_{ref})$  и  $z_{cal} (y_{ref j})$  – показания ВЧ ИК, соответствующие  $j$ -му значению, воспроизводимым ММ2.  $U(x)$  и  $U(x_i)$  – суммарная стандартная неопределённость и её значение, соответствующее  $i$ -му значению, воспроизводимому ММ1;

$U(y)$  и  $U(y_j)$  – суммарная стандартная неопределённость и её значение, соответствующее  $j$ -му значению, воспроизводимому ММ2.

Дальнейшие рассуждения проведём в предположении, что значения суммарной стандартной неопределённости получены в соответствии с [5] и учитывают следующие источники:

- случайные погрешности эталонных ММ1, ММ2, ЭП и калибруемых ПИП и ВЧ ИК;
- неопределённость действительных значений эталонных ММ1 и ММ2;
- неопределённость калибровочной характеристики ЭП;
- нестабильность эталонных ММ1, ММ2 и ЭП;
- нестабильность калибруемых ПИП и ВЧ ИК, обусловленную в том числе одновременным проведением калибровки ПИП и ВЧ ИК;
- нелинейность калибровочной характеристики ЭП;
- дополнительные погрешности измерений при калибровке ВЧ ИК, обусловленные отклонением условий измерений от нормальных;
- округление результатов измерений, в том числе в ВЧ ИК и др.

Оценивание неопределённости измерений при калибровке ИК в целом состоит из следующих этапов.

**Этап 1** – построение калибровочных характеристик ПИП и ВЧ ИК методом наименьших квадратов [5-6]. В общем случае калибровочная характеристика может быть представлена и нелинейной зависимостью.

При оценивании неопределённости калибровочных характеристик ПИП и ВЧ ИК среди прочих следует учесть и возможные корреляции между собой значений  $x_{ref i}$ , воспроизводимых как с помощью ММ1, и значений  $y_{ref j}$ , воспроизводимых с помощью ММ2 [6].

**Этап 2** – построение калибровочной характеристики ИК в целом на основании калибровочных характеристик ПИП и ВЧ ИК [3].

При оценивании неопределённости калибровочной характеристики ИК в целом следует учесть возможную корреляцию между собой величин, измеряемых с помощью ЭП, и воспроизводимых с помощью ММ2, в том случае, если их калибровка была проведена с использованием одного и того же эталона [2].

При оценивании неопределённости измерений следует также учесть дополнительную погрешность, обусловленную тем, что калибровка ПИП была проведена в нормальных условиях измерений, а калибровка ИК в целом должна быть выполнена в рабочих условиях эксплуатации.

**Этап 3** – представление калибровочной характеристики ИК в целом в форме функции с указанием стандартной неопределённости измерений.

## Выводы

Предложен алгоритм оценивания неопределённости измерений при проведении калибровки ИК в целом на основании оценок неопределённости измерений, полученных при поэлементной калибровке компонентов измерительного канала: ПИП – в нормальных условиях эксплуатации и ВЧ ИК – в рабочих условиях эксплуатации.

## Список литературы

1. Данилов А.А. Метрологическое обеспечение измерительных систем / А.А. Данилов. – Пенза: Професионал, 2008. – 63 с.
2. Данилов А.А. О калибровке измерительных каналов измерительных систем / А.А. Данилов, Ю.В. Кучеренко, Т.А. Федосеева // Измерительная техника. – 2011. – № 5. – С. 61-63.

3. Данилов А.А. Калибровка измерительных каналов измерительных систем после их градуировки / А.А. Данилов, Ю.В. Кучеренко // Измерительная техника. – 2012. – № 12. – С. 58-60.

4. Яковлев Ю.Н. Проблемы калибровки измерительных каналов / Ю.Н. Яковлев // Главный метролог. – 2010. – №2. – С. 28-31.

5. РМГ 115-2011. ГСИ. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределённости.

6. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995).

Поступила в редколлегию 1.03.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ПОЕЛЕМЕНТНЕ КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ: АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

О.О. Данілов, А.В. Зінкіна, Ю.В. Кучеренко, Н.П. Ордінарцева, Е.Г. Цуканова

Розглядаються питання оцінювання невизначеності вимірювань при проведенні поелементного калібрування вимірювальних каналів вимірювальних систем. Запропоновано алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювального каналу в цілому. Він базується на оцінках невизначеності вимірювань, отриманих при поелементному калібруванні компонентів вимірювального каналу: первинного вимірювального перетворювача в нормальних умовах експлуатації і вторинної частини вимірювального каналу в робочих умовах експлуатації.

**Ключові слова:** вимірювальні канали, вимірювальні системи, калібрування, невизначеність.

## THE ELEMENTWISE CALIBRATION OF MEASURING SYSTEMS' MEASURING CHANNELS: THE UNCERTAINTY ESTIMATION ALGORITHM OF MEASUREMENTS

A.A. Danilov, A.V. Zinkina, Yu.V. Kucherenko, N.P. Ordinarova, E.G. Cukanova

This article describes issues with the measurements' uncertainty estimation during the elementwise calibration of measuring systems' measuring channels. The uncertainty estimation algorithm of measurements during the calibration of a measuring channel is offered as a whole. It's based on uncertainty measurement estimates obtained by the elementwise calibration of measuring channel components: the primary measuring transducer in normal operating conditions and the secondary part of a measuring channel in working conditions.

**Key words:** measuring channels, measuring systems, calibration, uncertainty.