

УДК 621.317.732

О.О. Волков<sup>1</sup>, И.П. Захаров<sup>2</sup><sup>1</sup>ГП «Донецкстандартметрология», Донецк, Украина<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

## ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОВЕРКЕ (КАЛИБРОВКЕ) ОДНОЗНАЧНЫХ МЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПАРАТОРА

*Рассмотрена модель передачи размера единицы сопротивления при поверке однозначных мер электрического сопротивления на постоянном токе с помощью компаратора. Описана процедура оценивания неопределенности измерений, составлен бюджет неопределенности. Приведен пример оценивания неопределенности измерений сопротивления.*

**Ключевые слова:** мера сопротивления, компаратор сопротивления, поверка, калибровка, неопределенность измерения, бюджет неопределенности.

### Введение

**Постановка проблемы.** Однозначные меры электрического сопротивления (ОЭМС) широко используются в качестве прецизионных резисторов, встраиваемых в приборы и измерительные комплексы, рабочих и образцовых мер электрического сопротивления, применяемых для поверки (калибровки) цифровых омметров, прецизионных шунтов и добавочных сопротивлений, предназначенных для расширения пределов измерения электроизмерительных приборов по току и напряжению в цепях постоянного и переменного тока до частоты 1 МГц.

Поверку ОЭМС осуществляют в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 8.237-2003 [1]. В стандарте указаны различные методы поверки ОЭМС: прямое измерение с помощью цифрового омметра, измерение с помощью моста постоянного тока (прямое измерение, измерение методом замещения, методом перестановки), с помощью компаратора сопротивлений, с помощью компаратора напряжений или потенциометра постоянного тока. Измерение с помощью компаратора сопротивлений является наиболее точным и распространенным методом поверки ОЭМС.

В аккредитованных на соответствие требованиям ISO 17025:2005 [2] испытательных и калибровочных лабораториях в соответствии п. 5.6.1 этого стандарта «все средства измерений, используемые для испытаний и/или калибровочных работ, включая средства для вспомогательных измерений (например, для контроля параметров окружающей среды), имеющих значительное влияние на точность и достоверность результатов испытания, калибровки или отбора образцов, должны быть откалиброваны перед вводом в эксплуатацию». Поскольку в Украине практически отсутствуют аккредитованные калибровочные лаборатории, потребности в прослежи-

ваемости измерений испытательных лабораторий обеспечивают поверочные лаборатории Госпотребстандарта. Для исправления этой ситуации Национальным агентством по аккредитации утверждено Положение «О переходном периоде по обеспечению прослеживаемости измерений, выполняемых ООВ», согласно которому необходимо в 2012 году перейти от поверки средств измерительной техники (СИТ) к их калибровке. Выполнение этого положения, кроме больших организационных мероприятий по аккредитации сети калибровочных лабораторий, требует создания нормативной базы в виде процедур оценивания неопределенности измерений при калибровках, поскольку, в соответствии с п.п. 5.4.6.1 стандарта [2], «Калибровочная или испытательная лаборатория, осуществляющая свои собственные калибровки, должна иметь и применять процедуру оценки неопределенности измерений при всех калибровках и типах калибровок».

Поскольку операции поверки и калибровки в основном совпадают, процедуры оценивания неопределенности измерений при поверках, востребованные в переходный период, могут служить основой для создания процедур оценивания неопределенности при калибровках. Следует отметить, что в настоящее время процедура оценивания неопределенности измерений, как при поверках, так и при калибровках ОЭМС с помощью компаратора, отсутствуют.

**Целью статьи** является создание процедуры оценивания неопределенности измерений при поверке (калибровке) ОЭМС, применяемых в цепях постоянного тока с помощью компаратора.

### Изложение основного материала

Поверка (калибровка) ОЭМС с помощью компаратора выполняется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.



Рис. 1. Схема сличения калибруемой и эталонной ОМЭС с помощью компаратора

Модельное уравнение в этом случае имеет вид [3]:

$$R_c = (R_s + \Delta_H) + (\Delta + \Delta_{осн} + \Delta_K + \Delta_t), \quad (1)$$

где  $R_c$  – значение калибруемой меры, получаемое в результате калибровки;  $R_s$  – значение эталонной меры, взятое из свидетельства о поверки;  $\Delta_H$  – поправка на нестабильность эталонной меры в течение межповерочного интервала;  $\Delta$  – значение, индицируемое компаратором;  $\Delta_K$  – поправка на неисключенную систематическую погрешность (НСП) квантования компаратора;  $\Delta_{осн}$  – поправка на основную НСП компаратора;  $\Delta_t$  – поправка на температурную НСП компаратора.

Суммарная неопределенность измерений при поверке (калибровке)  $u(R_c)$  будет определяться через стандартные неопределенности входных величин, входящих в (1), из выражения:

$$u^2(R_c) = [u^2(R_s) + u^2(\Delta_H)] + [u_A^2(\bar{\Delta}) + u^2(\Delta_K) + u^2(\Delta_{осн}) + u^2(\Delta_t)]. \quad (2)$$

Вычисление стандартной неопределенности типа  $B$  эталонной ОЭМС  $u(R_s)$  следует производить по-разному при поверке и калибровке. В случае поверки,  $u(R_s)$  необходимо определять через ее через класс точности  $\delta$  [1] как

$$u(R_s) = \delta \frac{R_s}{\sqrt{3} \cdot 100\%}, \quad (3)$$

а в случае калибровки,  $u(R_s)$  должно рассчитываться через значение расширенной неопределенности  $U(R_s)$ , взятое из свидетельства о ее калибровке:

$$u(R_s) = U(R_s) / 2. \quad (4)$$

Стандартную неопределенность, обусловленная нестабильностью эталонной меры в течение межповерочного интервала  $u(\Delta_H)$  находят через значение относительных границ этой нестабильности  $\delta_H$ :

$$u(\Delta_H) = \delta_H \frac{R_s}{\sqrt{3} \cdot 100\%}. \quad (5)$$

Значение  $\Delta$  определяется по результатам  $n$  показаний компаратора  $z_i$ , %:

$$\Delta = \bar{\Delta} = \frac{R_s}{n \cdot 100\%} \sum_{i=1}^n z_i, \quad (6)$$

тогда стандартная неопределенность типа  $A$ , обусловленная изменчивостью показаний компаратора будет равна

$$u_A(\bar{\Delta}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( z_i \frac{R_s}{100\%} - \bar{\Delta} \right)^2}. \quad (7)$$

Стандартная неопределенность квантования измеряемой величины  $u(\Delta_K)$  рассчитывается как [4]:

$$u_{\Sigma} = \frac{q}{2\sqrt{3}} e^{-30\sqrt{n^3} u_A^3}, \quad (8)$$

где  $q$  – единица младшего разряда компаратора.

Стандартная неопределенность типа  $B$ , обусловленная поправкой на основную НСП компаратора  $u(\Delta_{осн})$  определяется из выражения для относительных для границ этой погрешности  $\delta_{осн}$ , взятого из технического описания на компаратор:

$$u(\Delta_{осн}) = \delta_{осн} \frac{R_s}{\sqrt{3} \cdot 100}. \quad (9)$$

Стандартная неопределенность типа  $B$ , обусловленная поправкой на температурную НСП компаратора  $u(\Delta_t)$  будет определяться через  $u(\Delta_{осн})$  и отклонение температуры окружающей среды  $t_{окр}$  от  $20^\circ\text{C}$  по формуле:

$$u(\Delta_t) = \frac{|t_{окр} - 20^\circ\text{C}|}{10^\circ\text{C}} u(\Delta_{осн}), \quad (10)$$

Расширенная неопределенность вычисляется по формуле:

$$U(\Delta) = k \cdot u_c(\Delta), \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент охвата, определяемый как коэффициент Стьюдента для вероятности 0,95 и эффективного числа степеней свободы, рассчитываемого по формуле Велча-Саттерсвейта:

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \left[ \frac{u_c(R_c)}{u_A(\bar{\Delta})} \right]^4. \quad (12)$$

Бюджет неопределенности для этого случая приведен в табл. 1.

Рассмотрим поверку ОМЭС типа P321 3-го разряда кл. 0,01 сопротивлением 1 Ом методом сличения с рабочим эталоном 2-го разряда P321 кл. 0,01 с действительным значением сопротивления 1,000020, взятым из свидетельства о его поверке, с помощью компаратора сопротивлений P3015, при температуре окружающего воздуха  $23^\circ\text{C}$ .

Показания компаратора составили, %:

0,00295; 0,00315; 0,00323; 0,00356; 0,00319;  
0,00282; 0,00298; 0,00304; 0,00298; 0,00295.

Определим стандартную неопределенность типа  $B$  эталонной ОЭМС  $u(R_s)$  через ее класс точности  $\delta = 0,01\%$  по формуле (3):

$$u(R_s) = 0,01\% \frac{1,000020 \text{ Ом}}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 0,0000577 \text{ Ом}.$$

Таблица 1

Бюджет неопределенности измерения при поверке ОМЭС  
с помощью компаратора

Входная величина	Оценка входной величины	Стандартная неопределенность	Число степеней свободы	Вклад неопределенности
$R_s$	$\hat{R}_s$	(3), (4)	$\infty$	$u(R_s)$
$\Delta_n$	0	(5)	$\infty$	$u(\Delta_n)$
$\Delta$	(6)	(7)	$n-1$	$u_A(\bar{\Delta})$
$\Delta_k$	0	(8)	$\infty$	$u(\Delta_k)$
$\Delta_{осн}$	0	(9)	$\infty$	$u(\Delta_{осн})$
$\Delta_t$	0	(10)	$\infty$	$u(\Delta_t)$
Выходная величина	Оценка выходной величины	Суммарная стандартная неопределенность	Эффективное число степеней свободы	Расширенная неопределенность
$R_n$	(1)	(2)	(12)	(11)

Стандартную неопределенность, обусловленную нестабильностью эталонной меры в течение межповерочного интервала  $u(\Delta_n)$ , находим через значение относительных границ этой нестабильности  $\delta_n = 0,002\%$  по формуле (4):

$$u(\Delta_n) = 0,002\% \frac{1,00002}{\sqrt{3 \cdot 100\%}} = 0,0000115 \text{ Ом.}$$

Значение  $\bar{\Delta}$ , вычисленное по показаниям компаратора (табл. 2) по формуле (6), составило 0,0000309 Ом, а его стандартная неопределенность типа A, вычисленная по формуле (7) равна  $u_A(\bar{\Delta}) = 0,000066$  Ом.

Стандартная неопределенность квантования измеряемой величины  $u(\Delta_k)$  рассчитана по формуле (9) и равна, с учетом единицы младшего разряда  $q = 0,0000001$  Ом:

$$u(\Delta_k) = 0,000000029 \text{ Ом.}$$

Стандартная неопределенность типа B, обусловленная поправкой на основную НСП компаратора  $u(\Delta_{осн})$  определяется по формуле (9) через выражение для относительных для границ этой погрешности  $\delta_{осн} = 0,003 + 0,001 \cdot z$ , взятого из технического описания на компаратор, в котором  $z = 0,00309\%$ . В этом случае  $\delta_{осн} = 0,00303\%$  и  $u(\Delta_{осн}) = 0,0000174$  Ом.

Стандартная неопределенность типа B, обусловленная поправкой на температурную НСП компаратора  $u(\Delta_t)$  будет определяться через  $u(\Delta_{осн})$  и отклонение температуры окружающей среды 23 °C от 20 °C по формуле (10):

$$u(\Delta_t) = \frac{3}{10} 0,0000174 = 0,0000052 \text{ Ом.}$$

Бюджет неопределенности для этого случая приведен в табл. 2.

Таблица 2

Бюджет неопределенности измерения при поверке ОМЭС Р321  
с помощью компаратора Р3015

Входная величина	Оценка входной величины, Ом	Стандартная неопределенность, Ом	ЧСС	Вклад неопределенности, Ом
$R_s$	1,00002	0,0000577	$\infty$	0,0000577
$\Delta_n$	0	0,0000115	$\infty$	0,0000115
$\Delta$	0,0000309	0,000066	9	0,000066
$\Delta_k$	0	0,000000029	$\infty$	0,000000029
$\Delta_{осн}$	0	0,0000174	$\infty$	0,0000174
$\Delta_t$	0	0,0000052	$\infty$	0,0000052
Выходная величина	Оценка выходной величины, Ом	Суммарная стандартная неопределенность, Ом	ЭЧСС	Расширенная неопределенность, Ом
$R_n$	0,9999892	0,0000907	32	0,0001848

Суммарная стандартная неопределенность измерения сопротивления поверяемой ОМЭС, вычисленная по формуле (2), будет равна 0,0000907 Ом.

Эффективное число степеней свободы, рассчитываем по формуле (12):

$$v_{\text{eff}} = 9 \left[ \frac{0,0000907}{0,000066} \right]^4 = 3.$$

Коэффициент Стьюдента, соответствующий этому числу степеней свободы для вероятности 0,95 будет равен 2,03.

Расширенная неопределенность, вычисленная по формуле (11), составила:

$$U(\Delta) = 2,03 \cdot 0,0000907 = 0,00018 \text{ Ом.}$$

### Выводы

1. Поверочные лаборатории ЦСМС в соответствии с требованиями заказчика – аккредитованными по ISO 17025:2005 испытательными лабораториями, вынуждены оценивать неопределенность измерений, проводимых при поверке СИТ. С этой целью им необходимо разработать процедуру оценивания неопределенности измерений при поверке, которая в дальнейшем (после окончания переходного периода) может быть использована как процедура оценивания неопределенности при калибровке.

2. Рассмотрена процедура оценивания неопределенности при поверке однозначной меры электрического сопротивления на постоянном токе, составлен бюджет неопределенности, который может служить основой для создания программного средства для автоматизации оценивания неопределенности измерений при поверке (калибровке).

3. Рассмотрены результаты поверки ОМЭС типа Р321 3-го разряда кл. 0,01 сопротивлением 1 Ом с помощью рабочего эталона 2-го разряда Р321 кл. 0,01 с действительным значением сопротивления 1,000020, взятым из свидетельства о поверке рабочего эталона, с помощью компаратора сопротивлений Р3015, при температуре окружающего воздуха 23 °С.

### Список литературы

1. ДСТУ ГОСТ 8.237-2008. Метрологія. Міри електричного опору однозначні. Методика повірки (ГОСТ 8.237-2003, IDT).

2. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT).

3. Захаров И.П. Оценивание неопределенности измерений при проведении калибровок / И.П. Захаров // Метрологія та прилади. – 2007. – № 1. – С. 31-42.

4. Захаров И.П. Учет погрешности квантования при оценивании неопределенности результатов измерений с многократными наблюдениями / И.П. Захаров, С.В. Водотыка // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 8 (98). – С. 39-44.

Поступила в редколлегию 5.01.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

### ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС ПОВІРКИ ОДНОЗНАЧНИХ МІР ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПАРАТОРА

О.О. Волков, І.П. Захаров

*Розглянуто модель передачі розміру одиниці опору під час повірки однозначних мір на постійному струмі за допомогою компаратора. Описано процедуру оцінювання невизначеності вимірювань, складено бюджет невизначеності. Наведено приклад оцінювання невизначеності вимірювань електричного опору.*

**Ключові слова:** міра опору, компаратор опору, повірка, калібрування, невизначеність вимірювання, бюджет невизначеності.

### EVALUATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY DURING VERIFICATION OF SINGLE-VALUE STANDARDS OF ELECTRIC RESISTANCE WITH HELP OF COMPARETOR

O.O. Volkov, I.P. Zakharov

*A model of the transmission quantity of resistance unit during the verification of single-value standards on DC with help of comparator was considered. The procedure for evaluation of measurement uncertainty was described, the uncertainty budget is given. An example of the evaluation of measurement uncertainty of resistance is given.*

**Keywords:** measure of resistance, comparator of resistance, verification, calibration, measurement uncertainty, uncertainty budget.