

УДК 621.317

**О.О. Волков,**  
**И.П. Захаров,** д-р техн. наук,  
**К.Ю. Петрухина**

### **ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОВЕРКЕ (КАЛИБРОВКЕ) МЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ЗАМЕЩЕНИЯ**

*Рассмотрена методика поверки мер электрического сопротивления с помощью двойного моста постоянного тока методом замещения. Разработана процедура оценивания неопределенности измерений, составлен бюджет неопределенности.*

*Ключевые слова:* мера сопротивления, двойной мост, метод замещения, калибровка, неопределенность измерения.

**O. Volkov,**  
**I. Zakharov,** ScD.,  
**K. Petrukhina**

### **MEASUREMENTS UNCERTAINTY EVALUATION AT VERIFICATION (CALIBRATION) OF ELECTRIC RESISTANCE MEASURES BY THE REPLACEMENT METHOD**

*The technique of electric resistance measures verification by means of a double bridge of a direct current by a replacement method is observed. The procedure of a measurement uncertainty evaluations is developed, the uncertainty budget is made.*

*Keywords:* resistance measure, of double bridge, replacement method, calibration, uncertainty in measurement.

**О.О. Волков,**  
**И.П. Захаров,** д-р техн. наук,  
**К.Ю. Петрухина**

### **ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС ПОВІРКИ (КАЛІБРУВАННЯ) МІР ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ МЕТОДОМ ЗАМІЩЕННЯ**

*Розглянуто методику повірки міри електричного опору за допомогою подвійного моста постійного струму методом заміщення. Розроблено процедуру оцінювання невизначеності вимірювань, складено бюджет невизначеності.*

*Ключові слова:* міра опору, подвійний міст, метод заміщення, калібрування, невизначеність вимірювань

**Введение.** Ультрамалые эталонные сопротивления (меньше 0,1 Ом) нашли применение при калибровке (поверке) милли- и микроомметров, предназначенных для измерения переходного сопротивления контактов высоковольтных выключателей, болтовых, сварных и паяных соединений, сопротивления шин, кабелей, плавких вставок, и других частей силового оборудования, сопротивлений обмоток электродвигателей и трансформаторов. Для поверки микроомметров используют однозначные меры электрического сопротивления (ОМЭС) типа Р310 и МС3050.1, производства ОАО «Краснодарский ЗИП» (Россия) с номинальным сопротивлением 0,001 и 0,01 Ом, которые применяются в качестве государственных эталонных, образцовых и рабочих мер электрического сопротивления в цепях постоянного и

переменного тока в воздушной или жидкостной (конденсаторное масло, керосин, кремнийорганическая жидкость) средах. ОМЭС типа МС3050.1, созданные на замену Р310, имеют герметизированный резисторный элемент, повышающий надежность меры, и повышенную в 3–3,5 раз нагрузочную способность.

Особенностью поверки таких ОМЭС является сильное влияние на результат измерения подводящих проводников. Поэтому чаще всего для поверки мер ультрамалых сопротивлений используют двойной мост Томсона в сочетании со специальными методами измерения. На практике чаще всего применяется метод замещения, позволяющий практически исключить систематические погрешности сопротивлений плеч моста, что делает возможным не производить его поверку.

В соответствии с положением Национального агентства по аккредитации «О пе-

© Волков О.О., Захаров И.П.,  
Петрухина К.Ю., 2012

реходном периоде по обеспечению прослеживаемости измерений, выполняемых ООВ», необходимо в 2012 г. перейти от поверки средств измерительной техники (СИТ) к их калибровке. При этом, в соответствии с ДСТУ ISO/IEC 17026:2006 [1], калибровочные лаборатории должны иметь процедуры оценивания неопределенности измерений, проводимых при калибровке.

**Целью статьи** является разработка процедуры оценивания неопределенности измерения при поверке (калибровке) ультрамалых ОМЭС с помощью двойного моста постоянного тока методом замещения.

### 1. Методика измерений

Поверку однозначных мер электрического сопротивления осуществляют в соответствии с ГОСТ 8.237-2003 [2].

Суть метода замещения заключается в поочередном включении сравниваемых равных сопротивлений (эталонного  $R_3$  и поверяемого  $R_x$ ) в одно из плеч моста и уравновешивание его с последующим отсчетом показаний (рис. 1). В другое плечо моста включается тарный резистор  $R_T$ .

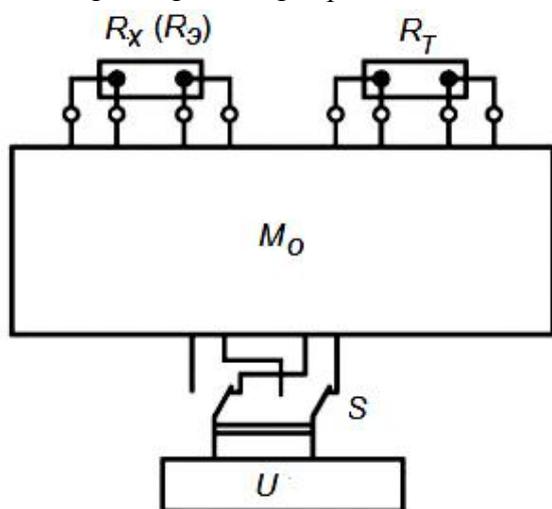


Рис. 1. Схема реализации метода замещения с помощью двойного моста постоянного тока  $M_0$

Значение поверяемого сопротивления определяется

$$R_x = R_3 + R_n (r_x - r_3), \quad (1)$$

где  $R_n$  – номинальное значение эталонной меры;  $r_x$  и  $r_3$  – отсчеты показаний моста в

относительном выражении при включении сопротивления  $R_x$  и  $R_3$  соответственно.

### 2. Процедура оценивания неопределенности измерений

При оценивании неопределенности проводимых измерений необходимо учитывать следующие соображения:

1. Для уменьшения случайной погрешности измерения производятся  $n$  раз с вычислением среднего арифметического отсчетов  $\bar{r}_x$  и  $\bar{r}_3$ .

2. При задании сопротивления эталонной ОМЭС необходимо учитывать поправку  $\Delta_n$  на его нестабильность в течение межповерочного интервала.

3. Показания моста  $r_x$  и  $r_3$  имеют ограниченное разрешение, поэтому в уравнение (1) необходимо вводить поправки на погрешности квантования  $\Delta_{кx}$ ,  $\Delta_{к3}$ .

4. Поправки  $\Delta_n$  и  $\Delta_k$  имеют нулевое математическое ожидание и стандартные неопределенности  $u(\Delta_n)$  и  $u(\Delta_k)$  соответственно.

С учетом высказанных соображений модельное уравнение измерений сопротивления ОМЭС при поверке (калибровке) должно иметь следующий вид:

$$R_x = R_3 + \Delta_n + R_n (\bar{r}_x + \Delta_{кx} - \bar{r}_3 - \Delta_{к3}). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует формула для суммарной стандартной неопределенности  $u_c(R_x)$  (закон распространения неопределенности)

$$u_c^2(R_x) = \left[ u^2(R_3) + u^2(\Delta_n) \right] + R_n^2 \left[ u_A^2(\bar{r}_x) + u^2(\Delta_{кx}) + u_A^2(\bar{r}_3) + u^2(\Delta_{к3}) \right], \quad (3)$$

где

$$u(R_3) = \delta \frac{R_n}{\sqrt{3} \cdot 100\%} - \quad (4)$$

стандартная неопределенность типа  $B$  эталонной ОЭМС, определяемая через ее класс точности  $\delta$ ;

$$u(\Delta_n) = \delta_n \frac{R_n}{\sqrt{3} \cdot 100\%} - \quad (5)$$

стандартная неопределенность, обусловленная нестабильностью эталонной меры в течение межповерочного интервала и определяемая через значение относительных гра-

ниц этой нестабильности  $\delta_n$ ;  

$$u(\Delta_k) = \frac{q}{2\sqrt{3}} e^{-30\sqrt{n^3}(u_A/q)^3} - \quad (6)$$

стандартная неопределенность квантования измеряемой величины [3], которая рассчитывается через единицу младшего разряда моста  $q$  и стандартную неопределенность типа  $A$   $u_A(\bar{r})$ , получаемую при измерении сопротивлений  $R_x$  и  $R_9$ ,

$$u_A(\bar{r}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}. \quad (7)$$

Расширенную неопределенность  $U(R_x)$  измерения  $R_x$  вычисляют по формуле:

$$U(R_x) = k u_c(R_x), \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент охвата, определяемый как коэффициент Стьюдента для эффективного числа степеней свободы, вычисляемого по формуле Велча-Саттерсвейта

$$v_{ef} = (n-1) \frac{u_c^4(R_x)}{R_n^4 [u_A^2(r_x) + u_A^2(r_9)]^2}. \quad (9)$$

Бюджет неопределенности для этого случая приведен в табл. 1.

1. Бюджет неопределенности измерения при поверке ОМЭС методом замещения

Величины	Оценка входной величины	Стандартная неопределенность	Число степеней свободы	Вклад неопределенности
Входные $R_9$	$\hat{R}_9$	(4)	$\infty$	$u(R_9)$
$\Delta_n$	0	(5)	$\infty$	$u(\Delta_n)$
$r_x$	$\bar{r}_x$	(7)	$n-1$	$R_n u_A(\bar{r}_x)$
$\Delta_{kx}$	0	(6)	$\infty$	$R_n u(\Delta_{kx})$
$r_9$	$\bar{r}_9$	(7)	$n-1$	$R_n u_A(\bar{r}_9)$
$\Delta_{k9}$	0	(6)	$\infty$	$R_n u(\Delta_{k9})$
Выходная $R_x$	Оценка $R_x$ (2)	Суммарная $(u_c) R_x$ (3)	Эффективное (9)	Расширенная $(U_c) R_x$ (8)

\* Номера зависимостей, по которым определяются величины.

3. Пример оценивания неопределенности измерений при поверке (калибровке) ОМЭС методом замещения

Рассмотрим пример оценивания неопределенности измерений при поверке (калибровке) ОМЭС третьего разряда типа Р310 с номинальным сопротивлением 0,01 Ом методом замещения равнономинальной ОМЭС второго разряда типа Р310 кл. 0,01 с действительным значением сопротивления 0,00999938 Ом, взятым из свидетельства о его поверке, с помощью двойного моста УМИС-2М при температуре окружающего воздуха 20 °С, относительной влажности воздуха 64 % и атмосферном давлении 98,3 кПа.

Показания моста  $r_x$  и  $r_9$  при десятикратных измерениях сопротивлений  $R_x$  и  $R_9$  приведены в табл. 2.

2. Показания моста при поверке ОМЭС Р310 методом замещения

№	$r_9 \cdot 10^4, \%$	$r_x \cdot 10^4, \%$
1	3515	3616
2	3515	3615
3	3515	3617
4	3516	3616
5	3514	3616
6	3515	3616
7	3516	3616
8	3514	3616
9	3515	3616
10	3515	3616
$\bar{r}$	3515	3616
$u_A(\bar{r}), \%$	$0,210819 \cdot 10^{-4}$	$0,149071 \cdot 10^{-4}$

По формуле (2) определяем:

$$R_x = 0,00999938 + 0,01 \cdot (3616 - 3515) \cdot 10^{-6} ] = 0,01000039 \text{ Ом.}$$

Находим стандартную неопределенность типа  $B$  эталонной ОЭМС через ее класс точности 0,01 по формуле (4):

$$u(R_9) = 0,01 \frac{0,01}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 5,77 \cdot 10^{-7} \text{ Ом.}$$

Рассчитаем стандартную неопределенность, обусловленную нестабильностью эталонной меры в течение поверочного интервала через значение относительных границ

этой нестабильности  $\delta_H = 0,0008\%$  [2]:

$$u(\Delta_H) = 0,0008 \frac{0,01}{\sqrt{3} \cdot 100\%} = 4,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом.}$$

Значения стандартных неопределенностей типа А, получаемую при измерении сопротивлений  $R_x$  и  $R_3$ , приведены в табл. 2.

Рассчитывая по формуле (6) стандартную неопределенность квантования при измерении сопротивлений  $R_x$  и  $R_3$  через единицу младшего разряда моста  $q = 10^{-4}\%$ , получаем  $u(\Delta_{кx}) = 3,98 \cdot 10^{-9}\%$ ,  $u(\Delta_{к3}) = 1,25 \cdot 10^{-6}\%$ .

Результаты расчета составляющих неопределенности измерений представлены в табл. 3

### 3. Бюджет неопределенности измерения при поверке ОМЭС Р310 методом замещения

Величины	Оценка входной величины, Ом	Стандартная неопределенность, Ом	Число степеней свободы	Вклад неопределенности, Ом
Входные $R_3$ , Ом	$0,999938 \cdot 10^{-2}$	$5,77 \cdot 10^{-7}$	$\infty$	$5,77 \cdot 10^{-7}$
$\Delta_H$ , Ом	0	$4,62 \cdot 10^{-8}$	$\infty$	$4,62 \cdot 10^{-8}$
$r_x$ , %	0,3616	$1,49 \cdot 10^{-5}$	9	$1,49 \cdot 10^{-9}$
$\Delta_{кx}$ , %	0	$3,98 \cdot 10^{-9}$	$\infty$	$3,98 \cdot 10^{-13}$
$r_3$ , %	0,3515	$2,11 \cdot 10^{-5}$	9	$2,11 \cdot 10^{-9}$
$\Delta_{к3}$ , %	0	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$\infty$	$1,25 \cdot 10^{-10}$
Выходная	Оценка выходной величины	Суммарная	Эффективное	Расширенная
$R_x$	$1,000039 \cdot 10^{-2}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$\infty$	$0,67 \cdot 10^{-3}$

#### Выводы

1. Рассмотрена процедура оценивания неопределенности при поверке ОМЭС методом замещения, 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 Р310 3-го разряда кл. 0,01 сопротивлением 0,01 Ом методом замещения с помощью двойного моста УМИС-2М.

#### Список использованной литературы

1. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT).
2. ДСТУ ГОСТ 8.237:2008. Метрологія. Міри електричного опору однозначні. Методика повірки (ГОСТ 8.237-2003, IDT).
3. Водотыка С. В. Учет погрешности квантования при оценивании неопределенности результатов измерений с многократными наблюдениями / С. В. Водотыка, И. П. Захаров // Системи обробки інформації. – Вып. 8 (98). – 2011. – С. 39–44.

Получено 25.05.2012

#### References

1. ISO/IEC 17025:2005 General requirement for the competence of testing and calibrating laboratories. 2005 [In English].
2. DSTU GOST 8.237:2008 Metrology. Single-value electrical resistance measures. Verification procedure [in Russian].
3. Vodotyka S. V. Accounting error due to finite resolution during measurement uncertainty estimating with multiple observations / S. V. Vodotyka, I. P. Zakharov // Information processing system. – 2011. – N 8 (98). – P. 39–44 [in Russian].



Волков Олег Олегович, начальник отдела электрических измерений ГП «Донецкстандарт-метрология»



Захаров Игорь Петрович, д.т.н., проф., каф. Метрологии и измерительной техники» Харьковского нац. ун-та радиоэлектроники



Петрухина Каролина Юрьевна, студентка Харьковского нац. ун-та радиоэлектроники