

Evaluation of the measurement uncertainty during the calibration of teraohmmeters and insulation resistance meters

M. Serhiienko¹, I. Skrypka¹, N. Shtefan²

¹ Calibration Laboratory "Metrologia" LLC, Akademika Proskury Str., 1, bld No. 12, 61070, Kharkiv, Ukraine
marina@metr.kh.ua; irina@metr.kh.ua

² Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine
natalya.shtefan@gmail.com

Abstract

When preparing for accreditation, testing and calibration laboratories face the problem of developing methods for evaluating the measurement uncertainty. The interpretation of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement regarding the calibration is given in the document of the European Cooperation for Accreditation. Despite the availability of guidance documents and publications on this issue, each evaluation case requires an analysis.

The paper considers the calibration of teraohmmeters and insulation resistance meters, the feature of which is the lack of appropriate high resistance measures. Therefore, a resistance Y-network is used, which allows generating the reference resistance using three measures, which in turn causes additional components of the uncertainty. The analysis of the uncertainty components and the sensitivity coefficients of the deviation of indications to input values is conducted. The evaluation of the combined standard uncertainty and the expanded measurement uncertainty of the deviation of the calibration object indications is carried out, and the uncertainty budget is provided. An example of applying the developed method is given.

Keywords: teraohmmeter; calibration; measurement uncertainty; evaluation; electrical resistance.

Received: 31.05.2022

Edited: 21.09.2022

Approved for publication: 28.09.2022

1. Introduction

Teraohmmeters are widely used to measure large input and output resistances and insulation resistances for inspecting the power equipment – high-voltage switchgears, powerful transformers, electric motors, etc. To calibrate such instruments, it is necessary that there is a calibration method for evaluating the measurement uncertainty. This is due to the requirements of the standard for accreditation of testing and calibration laboratories DSTU EN ISO/IEC 17025:2019 [1] and the International Laboratory Accreditation Cooperation Policy ILAC P14:12/2010 [2].

The general interpretation of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement JCGM 100:2008 [3] regarding the calibration is given in the document of the European Cooperation for Accreditation EA-4/02 M:2013 [4]. However, each individual case of developing a method for evaluating the measurement uncertainty during the calibration of measuring instruments is of great scientific and practical interest.

The objective of the paper is to develop a method for evaluating the measurement uncertainty during the calibration of teraohmmeters and insulation resistance meters using the substitution method.

2. Method of measuring the electrical resistance over 10 GΩ

A feature of calibrating high-resistance ohmmeters is the lack of electrical resistance measures of the nominal value above 12 GΩ. Therefore, when measuring the electrical resistance over 10 GΩ, an equivalent substitution scheme is used, in which the reference value of the measured resistance R_n is set by reference resistors R_1 , R_2 , R_3 (Fig. 1).

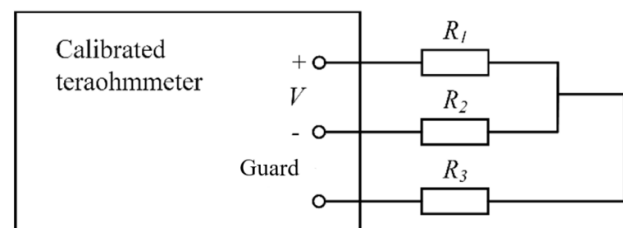


Fig. 1. Measurement of the electrical resistance over 10 GΩ

Multivalued measures are used as reference resistances P40108, P40103 and P40102 or similar ones. The reference value of the measured resistance R_n generated by the measures is determined by formula [5]

$$R_n = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_3} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}, \quad (1)$$

Examples of setting resistance values

$R_1, \text{G}\Omega$	$R_2, \text{G}\Omega$	$R_3, \text{G}\Omega$	$R_n, \text{G}\Omega$
0.1	10	0.10101	20.00001
0.1	10	0.02506	50.00423
0.1	10	0.01252	89.97220
1	10	0.05291	200.00019
1	10	0.02045	499.99756
1	10	0.01124	899.88889
1	10	0.00503	1999.07157
1	10	0.00200	5011.00000
1	10	0.00111	9020.00901

R_1, R_2, R_3 are the values of the resistances set on reference measures P40108, P40103 and P40102 respectively.

Because the measures P40108 (R_1), P40103 (R_2) have limited possibilities for regulation, then, using formula (1), the set of reference values of the measured resistance R_n can be obtained using the formula

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_n - (R_1 + R_2)}.$$

Table 1 shows the examples of setting resistance values.

3. Evaluation of the measurement uncertainty during the calibration of teraohmmeters

In calibration, the deviation of the calibration object indications is determined as the difference between the measured value of the electrical resistance and the actual (reference) value set on the standard (multivalued electrical resistance measure) [6]. For similar calibration objects, the deviation is the largest deviation of the value from the deviations obtained by smoothly summing the pointer, first from the lower resistance values, and then from the higher ones.

The equation for measuring the deviation of the electrical resistance is

$$\Delta R = R_x + \delta R_x - \frac{(R_1 + \delta R_1)(R_2 + \delta R_2) + (R_1 + \delta R_1)(R_3 + \delta R_3) + (R_2 + \delta R_2)(R_3 + \delta R_3)}{R_3 + \delta R_3}, \quad (2)$$

ΔR is the deviation of the calibration object indications; R_x is the electrical resistance value measured by the calibration object; δR_x is the correction of the indication error of the calibration object; $\delta R_1, \delta R_2, \delta R_3$ are the corrections of the indication error of multivalued electrical resistance measures P40108, P40103, P40102 respectively.

For budgeting the measurement uncertainty of the deviation of the calibration object indications, we use approach [7] and recommendations [4].

With the uniform distribution of the error within the limits q/α , the evaluation of type B standard uncertainty of the deviation of the calibration object indications is obtained by the formula

$$u_B(\delta R_x) = \frac{q}{\alpha\sqrt{3}},$$

for similar calibration objects, q is the scale-division value, $\alpha = 2; 3; 4$ or 5 depending on q ; for digital calibration objects, q is the unit of the lowest digit, $\alpha = 2$.

The evaluation of type B standard uncertainty of the deviation of the indications of working standards is obtained by the formula

$$u_B(\delta R_i) = \frac{U(R_i)}{k_i}, \quad (3)$$

$U(R_i)$ and k_i are the expanded measurement uncertainties of the deviation of indications or permissible error limits and coverage factor specified in the calibration certificate of the working standard, $i = 1; 2; 3$.

The sensitivity coefficient of the deviation of indications to input values is calculated using expression (2) by formulas:

– associated with the correction of the indication error of the calibration object

$$c(\delta R_x) = \frac{\partial \Delta R}{\partial \delta R_x} = 1; \quad (4)$$

– associated with the correction of the indication error of working standards

$$c(\delta R_1) = \frac{\partial \Delta R}{\partial \delta R_1} = -\left(\frac{R_2 + \delta R_2}{R_3 + \delta R_3} + 1\right); \quad (5)$$

$$c(\delta R_2) = \frac{\partial \Delta R}{\partial \delta R_2} = -\left(\frac{R_1 + \delta R_1}{R_3 + \delta R_3} + 1\right); \quad (6)$$

$$c(\delta R_3) = \frac{\partial \Delta R}{\partial \delta R_3} = \frac{(R_1 + \delta R_1)(R_2 + \delta R_2)}{(R_3 + \delta R_3)^2}. \quad (7)$$

The uncertainty budget of the deviation of the calibration object indications for the resistance over 10 GΩ

Input value	Evaluation of input value	Standard uncertainty of input value	Distribution of input value	Sensitivity coefficient of output value to input value	Contributions of uncertainty of input value to combined standard uncertainty
R_x	R_x	–	–	–	–
δR_x	0	$u_B(\delta R_x)$	uniform	1	$u_{\delta R_x}(\Delta R)$
R_1	R_1	–	–	–	–
δR_1	0	$u_B(\delta R_1)$	normal	$c(\delta R_1)$	$u_{\delta R_1}(\Delta R)$
R_2	R_2	–	–	–	–
δR_2	0	$u_B(\delta R_2)$	normal	$c(\delta R_2)$	$u_{\delta R_2}(\Delta R)$
R_3	R_3	–	–	–	–
δR_3	0	$u_B(\delta R_3)$	normal	$c(\delta R_3)$	$u_{\delta R_3}(\Delta R)$
Output value	Evaluation of output value	Combined standard uncertainty	Distribution of output value	Coverage factor	Expanded measurement uncertainty
ΔR	ΔR	$u_c(\Delta R)$	normal	2	$U(\Delta R)$

The contributions of the standard uncertainty of input values to the combined standard uncertainty of output values are calculated as the product of the evaluation of type B standard measurement uncertainty of the deviation of the indications of working standards (formula (3)) and the sensitivity coefficient of the deviation of indications to input values (formulas (4) – (7)):

– for the correction of the indication error of the calibration object

$$u_{\delta R_x}(\Delta R) = c(\delta R_x) \cdot u_B(\delta R_x) = u_B(\delta R_x); \quad (8)$$

– for the correction of the indication error of working standards

$$\begin{aligned} u_{\delta R_1}(\Delta R) &= c(\delta R_1) \cdot u_B(\delta R_1) = \\ &= -\left(\frac{R_2 + \delta R_2}{R_3 + \delta R_3} + 1\right) \cdot u_B(\delta R_1); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u_{\delta R_2}(\Delta R) &= c(\delta R_2) \cdot u_B(\delta R_2) = \\ &= -\left(\frac{R_1 + \delta R_1}{R_3 + \delta R_3} + 1\right) \cdot u_B(\delta R_2); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u_{\delta R_3}(\Delta R) &= c(\delta R_3) \cdot u_B(\delta R_3) = \\ &= \frac{(R_1 + \delta R_1)(R_2 + \delta R_2)}{(R_3 + \delta R_3)^2} \cdot u_B(\delta R_3). \end{aligned} \quad (11)$$

The evaluation of the combined standard measurement uncertainty of the deviation of the calibration object indications is calculated by the formula

$$u_c(\Delta R) = \sqrt{\left(u_{\delta R_x}(\Delta R)\right)^2 + \left(u_{\delta R_1}(\Delta R)\right)^2 + \left(u_{\delta R_2}(\Delta R)\right)^2 + \left(u_{\delta R_3}(\Delta R)\right)^2},$$

the contributions of the standard uncertainty of input values are calculated by formulas (8) – (11).

The evaluation of the expanded measurement uncertainty of the deviation of the calibration object indications is calculated by the formula

$$U(\Delta R) = k u_c(\Delta R),$$

k is the coverage factor. With the normal (Gaussian) distribution, $k = 2$ at coverage probability $P = 0.95$.

The uncertainty budget is provided in Table 2.

4. Example of evaluating the measurement uncertainty during the calibration of teraohmmeters

Let us consider the algorithm for evaluating the measurement uncertainty on the example of the Megger MIT515 Insulation Resistance Tester calibration at 89.972 GΩ with the test voltage of 1 kV.

The unit of the lowest digit of the teraohmmeter in the measuring range of 100 GΩ is 0.1 GΩ.

The acceptable limit of relative errors of resistance multipliers P40108 and P40102 (according to the values of resistances R_1 and R_3) is 0.02%, and the acceptable limit of relative error of resistance multiplier P40103 (the value of resistance R_2) is 0.1%.

The uncertainty budget of the electrical resistance deviation of the Megger MIT515 Insulation Resistance Tester at 89.972 GΩ with the test voltage of 1 kV is presented in Table 3.

Thus, the result of measuring the deviation of the electrical resistance indications is

$$\Delta R = (0.23 \pm 0.12) \text{ G}\Omega, \quad p = 0.95.$$

It should be noted that type A measurement uncertainty can be neglected, since the teraohmmeter is an integrating device and averages many multiple

The uncertainty budget of the electrical resistance deviation of the Megger MIT515 Insulation Resistance Tester

Input value	Evaluation of input value, GΩ	Standard uncertainty of input value, GΩ	Distribution of input value	Sensitivity coefficient of output value to input value	Contributions of uncertainty of input value to the combined standard uncertainty, GΩ
R_x	90.2				
δR_x	0	0.02887	uniform	1	0.02887
R_1	0.1				
δR_1	0	0.0000115	uniform	-799.722	-0.009197
R_2	10				
δR_2	0	0.005774	uniform	-8.987	-0.05189
R_3	0.01252				
δR_3	0	1.5×10^{-6}	uniform	6379.569	0.009569
Output value	Evaluation of output value	Combined standard uncertainty	Distribution of output value	Coverage factor	Expanded measurement uncertainty
ΔR	0.228	0.0608	normal	2	0.122

measurements, so the measurements were performed in a single mode.

5. Conclusion

A method for evaluating the measurement uncertainty of the absolute deviation of the cali-

bration object indications during the calibration of teraohmmeters and insulation resistance meters has been developed.

The example of applying the developed method by calibrating the Megger MIT515 Insulation Resistance Tester is given.

Оцінювання невизначеності вимірювання при калібруванні тераомметрів та вимірювачів опору ізоляції

М.П. Сергієнко¹, І.О. Скрипка¹, Н.В. Штефан²

¹ ТОВ "Калібрувальна лабораторія "Метрологія", вул. Ак. Проскури, 1, корп. 12, оф. 307, 61070, Харків, Україна
marina@metr.kh.ua; irina@metr.kh.ua

² Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна
natalya.shtefan@gmail.com

Анотація

Під час підготовки до акредитації випробувальні та калібрувальні лабораторії стикаються з проблемою розроблення методик оцінки невизначеностей вимірювання, що вимагаються базовим стандартом ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019, а також задекларовані Політикою Міжнародного співробітництва з акредитації лабораторій. Трактуювання Настанови з подання невизначеності вимірювання відносно калібрування наведено в документі Європейської кооперації з акредитації. Попри наявність керівних документів та публікацій щодо цього питання, кожна ситуація оцінки вимагає окремого аналізу.

У статті розглядається оцінювання невизначеності вимірювання при калібруванні шляхом використання замість двовивідної міри опору трививідної схеми імітатора опору заміщення тераомметрів та вимірювачів опору ізоляції, що широко застосовуються при обстеженні силового обладнання. Особливістю калібрування високоомних омметрів є дефіцит відповідних мір великого опору. Тому застосовується схема-імітатор, яка дозволяє сформувати еталонний опір за допомогою трьох мір. Це призводить до виникнення додаткових складових невизначеності вимірювання. Через те, що зразкові міри мають обмежені можливості щодо регулювання, еталонне значення опору встановлюється за допомогою комбінації значень відповідних мір. Проводиться аналіз складових невизначеності та коефіцієнтів чутливості відхилення показів до вхідних величин. Наводиться оцінка сумарної стандартної невизначеності

та розширеної невизначеності вимірювання відхилення показів об'єкта калібрування. Внески стандартних невизначеностей вхідних величин у сумарну стандартну невизначеність вихідної величини розраховуються як добуток оцінки стандартних невизначеностей типу *B* вимірювання виправлень на відхилення показів робочих еталонів на коефіцієнти чутливості відхилення показів до вхідних величин. Наводиться бюджет невизначеності та приклад застосування розробленого методу для оцінювання невизначеності вимірювання відхилення показів електричного опору понад 10 ГОм при калібруванні тераомметра.

Ключові слова: тераомметр; калібрування; невизначеність вимірювань; оцінювання; електричний опір.

Оценивание неопределенности измерения при калибровке тераомметров и измерителей сопротивления изоляции

М.П. Сергиенко¹, И.А. Скрипка¹, Н.В. Штефан²

¹ ООО "Калибровочная лаборатория "Метрология", ул. Ак. Проскуры, 1, корп. 12, оф. 307, 61070, Харьков, Украина
marina@metr.kh.ua, irina@metr.kh.ua

² Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, 61166, Харьков, Украина
natalya.shtefan@gmail.com

Аннотация

При подготовке к аккредитации испытательные и калибровочные лаборатории сталкиваются с проблемой разработки методик оценки неопределенности измерения. Трактовка Руководства по выражению неопределенностей измерений относительно калибровки приведена в документе Европейской кооперации по аккредитации. Несмотря на наличие руководящих документов и публикаций, каждая ситуация оценки требует отдельного анализа.

В статье рассматривается калибровка тераомметров и измерителей сопротивления изоляции, особенностью которой является дефицит соответствующих мер большого сопротивления. Поэтому применяется эквивалентная схема, которая позволяет сформировать эталонное сопротивление с помощью трех мер, что обуславливает дополнительные составляющие неопределенности. Проводится анализ составляющих неопределенности и коэффициентов чувствительности отклонения показаний к входным величинам. Приводится оценка суммарной стандартной неопределенности и расширенной неопределенности измерения отклонения показаний объекта калибровки, формируется бюджет неопределенности. Приводится пример применения разработанной методики.

Ключевые слова: тераомметр; калибровка; неопределенность измерения; оценивание; электрическое сопротивление.

References

1. DSTU EN ISO/IEC 17025:2019. General requirements to the competence of testing and calibration laboratories (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). Kyiv, 2020. 25 p. (in Ukrainian).
2. ILAC P14:12/2010 – ILAC Policy for Uncertainty in Calibration. ILAC, 2010. 14 p.
3. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM, 2008. 120 p.
4. EA-4/02M:2013. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Geneva, 2013.
5. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: Elektricheskie tsepi [Theoretical basics of electrical engineering: Electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 528 p. (in Russian).
6. Zakharov I.P., Vodotyka S.V., Shevchenko E.N. Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, issue 4, pp. 387–399.
7. Zakharov I.P. Neopredelennost izmereniy: obshche podhodyi k sostavleniyu byudzheta neopredelennosti [Uncertainty of measurement: general approaches to uncertainty budgeting]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2004, no. 2, pp. 10–15 (in Russian).