



Визначення ймовірності відповідності засобів вимірювальної техніки метрологічним вимогам

І.П. Захаров¹, П.І. Неєжмаков², О.А. Боцюра¹

¹Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна
newzip@ukr.net

²ННЦ «Інститут метрології», вул. Мирносолицька, 42, 61002, Харків, Україна

Анотація

Аналізуються вимоги стандарту ISO/IEC 17025:2017 щодо документування в сертифікатах калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) інформації про невизначеність вимірювань та заяви про їх відповідність вимогам або специфікаціям. Розглядаються положення європейських та міжнародних нормативних документів, що стосуються оцінки відповідності досліджуваного об'єкта вимогам технічної документації.

Показано, що в деяких випадках результат калібрування ЗВТ при оцінюванні його відповідності метрологічним вимогам може знаходитися у зоні невизначеності. В цих ситуаціях, згідно зі стандартами JCGM 106:2012 та OIML G 19:2017, необхідно оцінювати ймовірність відповідності ЗВТ вимогам технічної документації для того, щоб замовник сам мав можливість визначити ризик подальшого використання цього ЗВТ у виробничій практиці.

Наведено вирази для оцінки ймовірності відповідності ЗВТ метрологічним вимогам для різних законів розподілів вимірюваної величини. Побудовано діаграму, яка дозволяє проводити оперативний контроль ймовірності відповідності відкаліброваного ЗВТ.

Розроблено алгоритм застосування методу Монте-Карло для розрахунку ймовірності відповідності ЗВТ на основі бюджету невизначеності, отриманого під час його калібрування для будь-якого закону розподілу вимірюваної величини.

Наведено приклади розрахунку ймовірності відповідності відкаліброваних засобів вимірювальної техніки метрологічним вимогам, що встановлені в технічній документації.

Ключові слова: оцінка відповідності, невизначеність вимірювань, ймовірність відповідності, повірка, калібрування.

Отримано: 10.09.2018

Відредаговано: 25.09.2018

Схвалено до друку: 28.09.2018

Вступ

Міжнародний словник загальних і базових термінів у галузі метрології (VIM-3) [1] чітко розділяє поняття “калібрування” і “повірка” засобів вимірювальної техніки (ЗВТ):

2.39. Калібрування (calibration) — операція, що за певних умов, на першому етапі, встановлює зв'язок між значеннями величин із невизначеностями вимірювання, що забезпечуються еталонами, і відповідними показаннями (ЗВТ, що калібрують) із пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань та, на другому етапі, використовує цю інформацію для встановлення зв'язку з метою отримання результату вимірювання на основі показання (відкаліброваного ЗВТ);

2.44. Повірка (verification) — забезпечення об'єктивних доказів того, що даний об'єкт відповідає певним вимогам.

У зв'язку з цим прийнято вважати, що в сертифікаті калібрування ЗВТ, які видані калібрувальною лабораторією (КЛ), акредитованою на

відповідність вимогам стандарту ISO/IEC 17025–2017 [2], в обов'язковому порядку вказується тільки невизначеність вимірювань. Це підтверджує пп. 7.8.4.1 [2]:

“...сертифікат калібрування *зобов'язаний* (shall) включати до себе наступне:

а) невизначеність результату вимірювання, подану в тих самих одиницях, що й вимірювана величина, або у відносних одиницях (наприклад, у відсотках) ”.

Але надалі в цьому ж підпункті сказано:

“е) якщо це є *суттєвим* (were relevant) — заяву про відповідність вимогам або специфікаціям”.

В пп. 7.8.6.1 [2] підкреслюється: “Коли надається заява про відповідність специфікації або стандарту, лабораторія повинна документувати застосоване нею правило прийняття рішення”. З урахуванням п. 3.7: “правило прийняття рішення (decision rule) — правило, яке описує, як враховується невизначеність вимірювання під час встановлення відповідності зазначеним вимогам”.

Тобто, на відміну від попередньої версії стандарту ISO/IEC 17025–2005, яка допускає можливість приведення в сертифікаті калібрування тільки заяви про відповідність без вказівки про невизначеності вимірювань, нова версія стандарту [2] допускає можливість вказівки заяви про відповідність додатково до обов'язково приведеної невизначеності вимірювань.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Оцінка відповідності технічного об'єкта заданим вимогам розглядається в цілому ряді документів європейських і міжнародних організацій [3–9]. Загальною вимогою цих документів є необхідність врахування невизначеності вимірювань при оцінці відповідності. Дійсно, відповідність виробу вимогам технічної документації вважається доведеною, якщо числове значення результату вимірювання знаходиться в межах області відповідності:

$$LSL + U \leq y \leq USL - U,$$

де LSL і USL — відповідно нижня і верхня границі поля допуску.

Оцінкою результату вимірювання y при калібруванні ЗВТ є оцінка систематичної похибки (bias) $\hat{\Delta}$ показуючого вимірювального приладу (ВП) або дійсне значення (показання) матеріальної міри. При повірці ВП границею поля допуску зазвичай є його максимально допустима похибка (МРЕ). Слід зазначити, що в процесі калібрування ВП основними джерелами невизначеності є: інструментальна невизначеність еталона; поправки на додаткові похибки еталона, пов'язані з його нестабільністю, зміною умов його експлуатації, впливом на еталон каліброваного ЗВТ; розкид показань каліброваного ВП, що спостерігаються; дискретність показань каліброваного ВП [10]. При обліку всіх цих складових розширена невизначеність вимірювань

при калібруванні може виявитися більшою або порівняною з МРЕ, а числове значення результату вимірювання буде виходити за межі області відповідності. Тому в документах [8–9] для такої ситуації пропонується оцінювати ймовірність відповідності за формулою

$$p_c = F_N \left(\frac{\text{МРЕ} - |\hat{\Delta}|}{u} \right),$$

де $F_N(z)$ — функція нормального стандартного розподілу зі змінною $z = (\text{МРЕ} - |\hat{\Delta}|)/u$ та стандартною невизначеністю u .

Для знаходження $F_N(z)$ [9] пропонують користуватися таблицею нормованого нормального розподілу, що не є зручним. Крім того, при калібруваннях багатьох ВП функція розподілу, що приписується Δ , часто є трапецеїдальною, але навіть рівномірною. Це обумовлено тим, що домінуючими джерелами невизначеності каліброваного ЗВТ часто є рівномірно розподілені поправки, такі як поправка, пов'язана з відліком показань [10].

Мета та завдання дослідження

Метою цієї роботи є розробка підходу до визначення ймовірності відповідності засобу вимірювальної техніки вимогам технічної документації у разі відмінності закону розподілу вимірюваної величини від нормального.

Ймовірність відповідності для аномальних законів розподілу

Функція трапецеїдального розподілу, яка являє собою композицію двох рівномірних розподілів зі співвідношенням стандартних невизначеностей $\gamma = u_2/u_1 \leq 1$, має вигляд [11]:

$$F_{TR}(z) = \begin{cases} 0, & z < -\sqrt{3}(1+\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2}; \\ [z\sqrt{1+\gamma^2} + \sqrt{3}(1+\gamma)]^2/24\gamma, & -\sqrt{3}(1+\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2} \leq z < -\sqrt{3}(1-\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2}; \\ \frac{z\sqrt{1+\gamma^2} + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}}, & -\sqrt{3}(1-\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2} \leq z < \sqrt{3}(1-\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2}; \\ 1 - [\sqrt{3}(1+\gamma) - z\sqrt{1+\gamma^2}]^2/24\gamma, & \sqrt{3}(1-\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2} \leq z < \sqrt{3}(1+\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2}; \\ 1, & z \geq \sqrt{3}(1+\gamma)/\sqrt{1+\gamma^2}. \end{cases}$$

При $\gamma = 1$ функція розподілу становиться трикутною та описується виразом [11]:

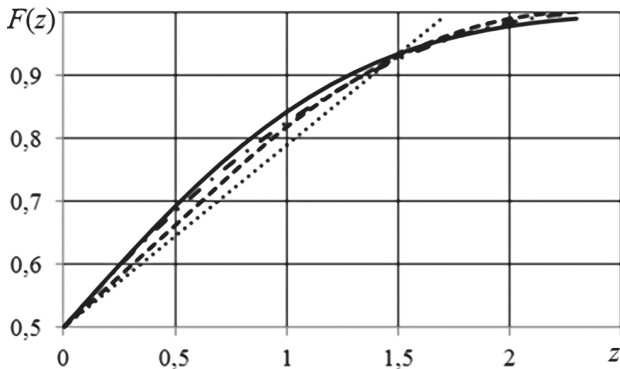
$$F_T(z) = \begin{cases} 0, & z < -\sqrt{6}; \\ (z + \sqrt{6})^2/12, & -\sqrt{6} \leq z < 0; \\ 1 - (\sqrt{6} - z)^2/12, & 0 \leq z < \sqrt{6}; \\ 1, & z \geq \sqrt{6}. \end{cases}$$

При $\gamma = 0$ функція розподілу становиться рівномірною та має ще більш простий вигляд [11]:

$$F_R(z) = \begin{cases} 0, & z < -\sqrt{3}; \\ (z + \sqrt{3})/2\sqrt{3}, & z \in [-\sqrt{3}; \sqrt{3}]; \\ 1, & z > \sqrt{3}. \end{cases}$$

На рисунку наведено залежності $F(z)$ для рівномірного, трикутного, трапецеїдального і нормального законів розподілів, які можна використовувати для оперативного оцінювання ймовірності відповідності.

З рисунка видно, що залежності для трикутного та нормального законів практично співпадають (з похибкою не більше 2 % за ймовірністю), тому замість таблиці зі значеннями нормованого нормального розподілу, наведеної в [9], можна для автоматизації обчислювань використовувати вираз для трикутного закону розподілу.



Залежності $F(z)$ для рівномірного (···), трапецеїдального (— · —) з $\gamma=0,5$, трикутного (— · —) та нормального (—) законів розподілів

Застосування методу Монте-Карло для визначення ймовірності відповідності для довільних законів розподілу

Для більш складних, ніж розглянуті вище, законів розподілу, для знаходження ймовірності відповідності слід використовувати процедуру Монте-Карло [12], яка полягає у виконанні наступних операцій.

1. Запис модельного рівняння:

$$\Delta = f(X_1, X_2, \dots, X_N),$$

де X_1, X_2, \dots, X_N — вхідні величини.

2. Оцінювання вхідних величин x_1, x_2, \dots, x_N .

3. Оцінювання стандартних невизначеностей вхідних величин $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$.

4. Призначення функцій щільності ймовірності (PDF) для вхідних величин із математичними сподіваннями x_1, x_2, \dots, x_N та середніми квадратичними відхиленнями $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$.

5. Генерування першої реалізації випадкових значень вхідних величин $x_{11}, x_{21}, \dots, x_{N1}$ і розрахунок відповідної їм реалізації вимірюваної величини Δ_1 . Повтор цієї операції $M \geq 10^4$ разів для отримання M реалізацій вимірюваної величини Δ_i .

6. Обчислення оцінки $\bar{\Delta}$ вимірюваної величини Δ за формулою:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta_i.$$

7. Розрахунок M значень незміщеної оцінки Δ_i^* за формулою:

$$\Delta_i^* = \Delta_i - \bar{\Delta}.$$

8. Сортування Δ_i^* в порядку зростання для отримання функції розподілу F .

9. Побудова залежності

$$F = \varphi(100 \cdot i / M),$$

яка відповідає залежності:

$$p_c = F(MPE - |\bar{\Delta}|).$$

10. Для заданих MPE і $\bar{\Delta}$ знаходження ймовірності відповідності p_c як значення стовпця $100 \cdot i / M$, яке відповідає значенню стовпця $MPE - |\bar{\Delta}|$.

Приклад оцінювання ймовірності відповідності

Оцінимо ймовірність відповідності для розглянутого в [13] прикладу з калібрування штангенциркуля з роздільною здатністю 0,05 мм, яка дорівнює його MPE. Для такого штангенциркуля сумарна стандартна невизначеність вимірювань становила 0,0325 мм, а закон розподілу вимірюваної величини — трапецеїдальний з $\gamma=0,5$.

Тому при $|\hat{\Delta}|=0$ маємо:

$$z = \frac{0,05}{0,0325} = 1,538,$$

що відповідає $p_c = 0,936 < 0,95$;

при $|\hat{\Delta}|=0,025$ маємо:

$$z = \frac{0,025}{0,0325} = 0,769, \text{ що відповідає } p_c = 0,75;$$

при $|\hat{\Delta}|=0,05$ маємо: $z = 0$, що відповідає $p_c = 0,5$.

Звідси випливає, що такий штангенциркуль виявиться непридатним після перевірки навіть у тому випадку, якщо його показання не мають відхилень від значення кінцевої міри довжини.

Якщо знехтувати невинувато завищеною у прикладі [13] невизначеністю, пов'язаною з впливом вимірального зусилля (це справедливо за наявності досвідченого повірника або для штангенциркулів з обмежувачем вимірального зусилля), то це знизить сумарну стандартну невизначеність вимірювань до 0,015 мм і приведе до рівномірного закону розподілу вимірюваної величини.

Для цього випадку при $|\hat{\Delta}|=0$ маємо:

$$z = \frac{0,05}{0,015} = 3,33 > \sqrt{3}, \text{ що відповідає } p_c = 1;$$

при $|\hat{\Delta}|=0,025$ маємо:

$$z = \frac{0,025}{0,015} = 1,67 < \sqrt{3},$$

що відповідає $p_c = 0,98 > 0,95$;

при $|\hat{\Delta}|=0,05$ маємо: $z=0$, що відповідає $p_c = 0,5 < 0,95$.

Звідси випливає, що придатним з імовірністю більше 0,95 виявиться штангенциркуль у тому випадку, якщо його показання не матимуть відхилень від значення кінцевої міри довжини, які є більшими або дорівнюють 0,5 МРЕ. Практика показує, що кількість таких штангенциркулів становить близько 60 % від тих, що пройшли перевірку. Слід зазначити, що при проведенні звичайної перевірки штангенциркулів придатними вважаються такі, похибка яких не перевищує МРЕ. Таким чином, 40 % повірених штангенциркулів виявляються “придатними” з імовірністю 50 %.

Висновки

1. Ймовірність відповідності є надійним показником придатності відкаліброваного ЗВТ. Для її обчислення можна скористатися рекомендаціями стандарту OIML G 19:2017 або наведеними в статті формулами для рівномірного, трикутного і трапецеїдального законів розподілу вимірюваної величини, а також процедурою, заснованою

на методі Монте-Карло для більш складних ситуацій.

2. В існуючих нормативних документах на перевірку ЗВТ, за винятком окремих, немає ніяких згадок про невизначеності вимірювань при повірці. Передбачається, що вимоги до процедури перевірки в цих документах складені таким чином, що цією невизначеністю можна знехтувати або її включено в межі поля допуску. Це позбавляє співробітників метрологічних центрів необхідності оцінювання та обліку невизначеності вимірювань при повірці та пояснює їх негативне ставлення до процедури калібрування.

3. Приклади, розглянуті у статті, показують, що при здійсненні перевірки ЗВТ припущення про “ідеальність” процедур перевірки можуть бути безпідставними, а при їх перегляді необхідно було б урахувувати невизначеність проведених вимірювань.

4. Достовірність оцінки відповідності еталонних ЗВТ метрологічним вимогам суттєво залежить від коректності процедур оцінювання невизначеності вимірювання при калібруванні, що вимагає високої кваліфікації співробітників калібрувальних лабораторій, які розробляють ці процедури.

Определение вероятности соответствия средства измерительной техники метрологическим требованиям

И.П. Захаров¹, П.И. Неєжмаков², О.А. Боцюра¹

¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, 61166, Харьков, Украина
newzip@ukr.net

²ННЦ “Институт метрологии”, ул. Мироносицкая, 42, 61002, Харьков, Украина

Аннотация

Анализируются требования стандарта ISO/IEC 17025:2017, затрагивающие указания в сертификате калибровки информации о неопределенности измерений и заявления о соответствии требованиям или спецификациям. Рассматриваются положения европейских и международных нормативных документов, касающихся оценки соответствия исследуемого объекта требованиям технической документации.

Показано, что во многих случаях результат калибровки средства измерительной техники (СИТ) при оценке соответствия метрологическим требованиям может находиться в зоне неопределенности. В этом случае, в соответствии со стандартами JCGM 106:2012 и OIML G 19:2017, необходимо оценивать вероятность соответствия СИТ требованиям технической документации для того, чтобы заказчик сам мог определить риск дальнейшего использования этого СИТ в производственной практике.

Приведены выражения для оценки вероятности соответствия СИТ метрологическим требованиям для различных законов распределений измеряемой величины. Построена диаграмма, которая позволяет проводить оперативный контроль вероятности соответствия откалиброванного СИТ.

Разработан алгоритм применения метода Монте-Карло для расчета вероятности соответствия СИТ на основе бюджета неопределенности, полученного во время его калибровки для любого закона распределения измеряемой величины.

Приведены примеры расчета вероятности соответствия откалиброванных средств измерительной техники метрологическим требованиям, установленным в технической документации.

Ключевые слова: оценка соответствия, неопределенность измерений, вероятность соответствия, поверка, калибровка.

Determination of the probability of compliance of the measuring instruments with the metrological requirements

I.P. Zakharov¹, P.I. Neyezhnikov², O.A. Botsiura¹

¹Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine
newzip@ukr.net

²National Scientific Centre "Institute of metrology", Myronosytska Str. 42, 61002, Kharkiv, Ukraine

Abstract

The requirements of ISO/IEC 17025:2017, which affect the indication of the information about measurement uncertainty and statement of compliance with the requirements or specifications in the calibration certificates of measuring instruments (MIs), are analyzed. The provisions of European and International reference documents concerning the conformity assessment of the investigated object with the requirements of the technical documentation are considered.

It has been shown that in some cases the result of calibration of a MI in its compliance assessment with metrological requirements may be in the uncertainty zone. In these situations, in accordance with JCGM 106:2012 and OIML G 19:2017, it is necessary to assess the probability of compliance of the MI with the requirements of the technical documentation in order for the customer to determine the risk of further use of this MI in production practice.

Expressions for assessing the probability of compliance of MI with metrological requirements for different distribution laws of the measurand are presented. The diagram, which allows carrying out operative control of probability of compliance of calibrated MI, is constructed.

An algorithm for applying the Monte Carlo method to calculate the probability of a MI correspondence based on the uncertainty budget obtained during its calibration for any law of the distribution of the measurand is developed.

Examples for calculating the probability of compliance of calibrated measuring instruments with the metrological requirements established in the technical documentation are given.

Keywords: conformity assessment, uncertainty of measurement, probability of compliance, verification, calibration.

Список літератури

1. International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd Edition, 2007. 146 p.
2. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2017. 38 p.
3. EURACHEM/CITAC Guide CG4, 3rd Edition (2012). Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Available at: <http://www.citac.cc/guides.html>
4. ISO 10576-1:2003(E). Statistical methods — Guidelines for the evaluation of conformity with specified requirements. Part 1: General principles. ISO, Geneva, Switzerland, 2003. 15 p.
5. EURACHEM/CITAC Guide, First Edition (2007). Use of uncertainty information in compliance assessment. Available at: <http://www.citac.cc/guides.html>
6. ISO 14253-1:2013(E). Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications. ISO, Geneva, Switzerland, 2013. 15 p.
7. Determination of conformance with specifications or limit values with particular reference to measurement uncertainties — possible strategies. EUROLAB "Cook Book", 2008. Doc no. 8.0. Available at: www.eurolab.org/documents/Cook-book_No_8.pdf.
8. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.
9. OIML G 19:2017(E). The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology. International Organization of Legal Metrology, France, Paris, 2017. 72 p.
10. Zakharov I. P., Vodotyka S. V., Shevchenko E. N. Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration. *Measurement Techniques*, July, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 387–399.
11. Zakharov I., Neyezhnikov P. Peculiarity of measurement instruments verification by results of their calibrations. *Measurement-2017: Proceedings of the 11th International Conference* (Smolenice, Slovakia, May 29–31, 2017). Institute of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, 2017, pp. 19–22.
12. Zakharov I., Neyezhnikov P., Botsiura O. Compliance probability determination on basis of the Monte Carlo method. *Metrology and Metrology Assurance 2017: Proceedings of 27-th International Scientific Symposium* (Sozopol, Bulgaria, Sep-

tember 8–12, 2017). Sozopol, Bulgaria, 2017, pp. 37–39.

13. EA-4/02 M:2013. Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration. EA Laboratory Committee, 2013. 75 p.

References

1. International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd Edition, 2007. 146 p.
2. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2017. 38 p.
3. EURACHEM/CITAC Guide CG4, 3rd Edition (2012). Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Available at: <http://www.citac.cc/guides.html>
4. ISO 10576–1:2003(E). Statistical methods — Guidelines for the evaluation of conformity with specified requirements. Part 1: General principles. ISO, Geneva, Switzerland, 2003. 15 p.
5. EURACHEM/CITAC Guide, First Edition (2007). Use of uncertainty information in compliance assessment. Available at: <http://www.citac.cc/guides.html>
6. ISO 14253–1:2013(E). Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications. ISO, Geneva, Switzerland, 2013. 15 p.
7. Determination of conformance with specifications or limit values with particular reference to

measurement uncertainties — possible strategies. EUROLAB “Cook Book”, 2008. Doc no. 8.0. Available at: www.eurolab.org/documents/Cook-book_No_8.pdf.

8. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.
9. OIML G 19:2017(E). The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology. International Organization of Legal Metrology, France, Paris, 2017. 72 p.
10. Zakharov I. P., Vodotyka S. V., Shevchenko E. N. Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration. *Measurement Techniques*, July, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 387–399.
11. Zakharov I., Neyezhnikov P. Peculiarity of measurement instruments verification by results of their calibrations. *Measurement-2017: Proceedings of the 11th International Conference* (Smolenice, Slovakia, May 29–31, 2017). Institute of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, 2017, pp. 19–22.
12. Zakharov I., Neyezhnikov P., Botsyura O. Compliance probability determination on basis of the Monte Carlo method. *Metrology and Metrology Assurance 2017: Proceedings of 27-th International Scientific Symposium* (Sozopol, Bulgaria, September 8–12, 2017). Sozopol, Bulgaria, 2017, pp. 37–39.
13. EA-4/02 M:2013. Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration. EA Laboratory Committee, 2013. 75 p.