

**И. П. Захаров,
П. И. Неежмаков,
О. А. Боцюра**

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
(ХНУРЭ),

Украина, г. Харьков.

E-mail: info@nure.ua

Национальный научный
центр (ННЦ)

«Институт метрологии»,

Украина, г. Харьков

УДК 006:91.053.088

УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИГОДНОСТИ ОТКАЛИБРОВАННОГО СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СООТВЕТСТВИЯ ЕГО МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕБОВАНИЯМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

**THE SUITABILITY OF A CALIBRATED MEASURING
INSTRUMENT DETERMINED ON THE BASIS
OF THE PROBABILITY OF COMPLIANCE
OF ITS METROLOGICAL CHARACTERISTICS
WITH THE REQUIREMENTS OF TECHNICAL DOCUMENTATION**

Рассмотрены положения европейских и международных нормативных документов, рассматривающих оценку соответствия исследуемого объекта требованиям технической документации. Отмечено, что в отличие от процедуры поверки средств измерений, применяемой в сфере законодательной метрологии, процедура верификации откалиброванных средств измерений должна учитывать неопределенность измерений. Получены выражения для оценивания вероятности соответствия средства измерения метрологическим требованиям для законов распределения, отличных от нормального. Разработана процедура оценивания вероятности соответствия для произвольного закона распределения измеряемой величины, основанная на методе Монте-Карло. Приведены примеры вычисления вероятности соответствия откалиброванного штангенциркуля.

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

The provisions of European and international normative documents reviewing the conformity assessment of the object under investigation with the requirements of technical documentation are considered. It is noted that, in contrast to the verification procedure for measuring instruments used in the field of legal metrology, the verification procedure for calibrated measuring instruments must take into account the measurement uncertainty. The expressions are described for estimating the probability of compliance of the measuring instruments with the metrological requirements for distribution laws that are different from normal. A procedure for evaluation of the probability of compliance for an arbitrary law of distribution of a measurand, based on the Monte Carlo method, is developed. Examples of calculating the probability of compliance for a calibrated caliper are given.

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

Введение.

Международный словарь общих и базовых терминов в области метрологии (VIM-3) [1] четко разделяет понятия «калибровка» и «поверка» средств измерений (СИ):

2.39. Калибровка (calibration) – операция, в ходе которой при заданных условиях, на первом этапе устанавливают соотношение между значениями величин с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующим показаниями с присущими им неопределенностями, а на втором этапе на основе этой информации устанавливают соотношение, позволяющее получить результат измерения исходя из показания;

2.44. Поверка (verification) – предоставление объективных свидетельств того, что данный объект полностью удовлетворяет установленным требованиям.

В связи с этим принято считать, что в сертификате калибровки средств измерений (СИ), выданным калибровочной лабораторией (КЛ), аккредитованной на соответствие требованиям стандарта ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 [2] в обязательном порядке указывается только неопределенность измерений. Однако пп. 5.6.2.1.1 и 5.10.4.1. b этого стандарта предписывают, что сертификаты калибровки СИ должны включать



в себя «неопределенность измерения и/или утверждение о соответствии установленным метрологическим требованиям или отдельным метрологическим характеристикам». Из этого требования следует, что наличие указания о соответствии калибруемого средства измерений (СИ) установленным метрологическим требованиям или отдельным метрологическим характеристикам может присутствовать в сертификате калибровки при наличии или без наличия указания неопределенности измерений. При этом в п. 5.10.4.2 уточняется: «если указание о соответствии имеется, неопределенность измерений должна учитываться».

Оценка соответствия технического объекта заданным требованиям рассматривается в целом ряде документов европейских и международных организаций [3–9]. Общим требованием этих документов является необходимость учета неопределенности измерений при оценке соответствия. Действительно, соответствие изделия требованиям технической документации считается доказанным, если числовое значение результата измерения y находится в пределах области соответствия:

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

где LSL и USL – соответственно нижняя и верхняя границы поля допуска.

Оценкой результата измерения y при калибровке СИ являются оценка систематической погрешности (bias) $\hat{\Delta}$ индицирующего измерительного прибора (ИП) или действительное значение (показание) материальной меры. При поверке ИП границей поля допуска обычно является его максимально допускаемая погрешность (МРЕ). Следует отметить, что в процессе калибровки ИП основными источниками неопределенности являются: инструментальная неопределенность эталона; поправки на дополнительные погрешности эталона, связанные с его нестабильностью, изменением условий его эксплуатации, влиянием на эталон калибруемого СИ; наблюдаемый разброс показаний калибруемого ИП; дискретность показаний калибруемого ИП [10]. При учете всех составляющих неопределенности расширенная неопределенность измерений при калибровке может оказаться больше или сравнимой с МРЕ, а числовое значение результата измерения y будет выходить за пределы области соответствия.

Поэтому в документах [8–9] для такой ситуации предлагается оценивать вероятность соответствия по формуле:

$$p_c = F_N \left(\frac{MPE - |\hat{\Delta}|}{u} \right), \quad (1)$$

где $F_N(z)$ – функция нормального стандартного распределения с переменной $z = (MPE - |\hat{\Delta}|)/u$ и стандартной неопределенностью u .

Для нахождения $F_N(z)$ [9] предлагает пользоваться таблицей нормированного нормального распределения.

Однако, при калибровках многих ИП функция распределения, приписываемая Δ , часто является трапециевидальной или даже равномерной. Это обусловлено тем, что доминирующими источниками неопределенности калибруемого СИ часто является равномерно распределенные поправки, такие как поправка, связанная с отсчетом показаний [10].

Функция трапециевидального распределения, которая представляет собой композицию двух равномерных распределений с соотношением стандартных неопределенностей $\gamma = u_2/u_1 \leq 1$, имеет вид [11]:

При $\gamma=1$ функция распределения становится треугольной и описывается выражением [11]:

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

Функция равномерного распределения имеет еще более простой вид [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 рис. 1 приведены зависимости $F(z)$ для равномерного, трапециевидального и нормального законов распределения.

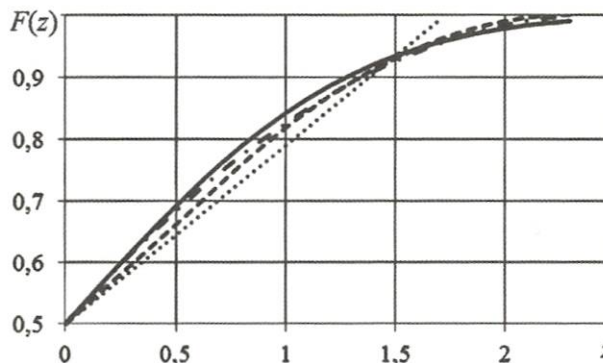


Рис. 1. Зависимости $F(z)$ для равномерного (···), трапециевидального (---) с $\gamma=0,5$, треугольного (— · —), и нормального (—) законов распределения

Из рис. 1 видно, что зависимости для треугольного и нормального законов практически совпадают (с максимальным относительным отклонением значений вероятности не более 2%), поэтому вместо таблицы со значениями нормированного нормального распределения, приведенной в [9] можно для автоматизации вычислений использовать выражение для треугольного закона распределений.

Для более сложных, чем рассмотренные выше, законов распределения, для нахождения вероятно-

сти соответствия следует использовать процедуру Монте-Карло [12], которая заключается в выполнении следующих операций.

1. Запись модельного уравнения:

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

где $X_1, X_2, \dots, X_N$ – входные величины.

2. Оценивание входных величин $X_1, X_2, \dots, X_N$.
3. Оценивание стандартных неопределенностей входных величин $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$.
4. Назначение функций плотности вероятности (PDF) для входных величин с математическими ожиданиями $X_1, X_2, \dots, X_N$ и средними квадратическими отклонениями $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$.
5. Генерирование первой реализации случайных значений входных величин $X_{11}, X_{21}, \dots, X_{N1}$ и расчет соответствующей им реализации измеряемой величины Δ . Повтор этой операции $M \geq 10^4$ раз для получения M реализаций измеряемой величины Δ_i .
6. Вычисление оценки $\bar{\Delta}$ измеряемой величины Δ по формуле:

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

7. Расчет M значений несмещенной оценки Δ_i^* по формуле:

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

8. Сортировка Δ_i^* в возрастающем порядке, для получения функции распределения F .
11. Построение зависимости $F = \varphi(100 \cdot i/M)$, которая соответствует зависимости:

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

12. Для заданных MPE и $\bar{\Delta}$ нахождение вероятности соответствия p_c как значения столбца $100 \cdot i/M$, соответствующего значению столбца $MPE - |\Delta_i|$.

Оценим вероятность соответствия для рассмотренного в [13] примера по калибровке штангенциркуля с разрешением 0,05 мм, равным его MPE. Для такого штангенциркуля суммарная стандартная неопределенность измерений составила 0,0325 мм, а закон распределения измеряемой величины – трапецидальный с $\gamma=0,5$.

Поэтому при $|\Delta|=0$, имеем: $z=0,05:0,0325=1,538$, что соответствует $p_c=0,936<0,95$;

при $|\Delta|=0,025$, имеем: , что соответствует $p_c=0,75$;

при $|\Delta|=0,05$, $z=0$, что соответствует $p_c=0,5$.

Отсюда следует, что такой штангенциркуль окажется непригодным после поверки даже в том случае, если его показания не имеют отклонений от значения концевой меры длины.

Если пренебречь неоправданно завышенной в примере [13] неопределенностью, связанной с влиянием измерительного усилия (это справедливо при наличии опытного поверителя или для штангенциркулей

с ограничителем измерительного усилия), то это снизит суммарную стандартную неопределенность измерений до 0,015 мм и приведет к равномерному закону распределения измеряемой величины.

Для этого случая при $|\Delta|=0$, имеем: $z=0,05:0,015=3,33>\sqrt{3}$, что соответствует $p_c=1$;

при $|\Delta|=0,025$, имеем: $z=0,025:0,015=1,67<\sqrt{3}$, что соответствует $p_c=0,98>0,95$;

при $|\Delta|=0,05$, имеем: $z=0$, что соответствует $p_c=0,5<0,95$.

Отсюда следует, что годным с вероятностью более 0,95 окажется штангенциркуль в том случае, если его показания не имеют отклонений от значения концевой меры длины или равны 0,5MPE. Практика показывает, что число таких штангенциркулей составляет около 60% от поступивших на поверку. Т. о. 40% поверенных штангенциркулей оказывается «годными» с вероятностью 50%.

Выводы:

1. Вероятность соответствия является надежным показателем пригодности откалиброванного СИ. Для ее вычисления можно воспользоваться рекомендациями Руководства OIML G 19:2017 или приведенными в статье формулами для равномерного, треугольного и трапецидального законов распределения измеряемой величины, а также процедурой, основанной на методе Монте-Карло для более сложных ситуаций.
2. В существующих нормативных документах на поверку СИ, за исключением некоторых [14], нет никаких упоминаний о неопределенности измерений при поверке. Предполагается, что требования к процедуре поверки в этих документах составлены таким образом, что этой неопределенностью можно пренебречь или она включена в границы поля допуска. Это избавляет сотрудников ЦСМ от необходимости оценивания и учета неопределенности измерений при поверке и объясняет их негативное отношение к процедуре калибровки.
3. Рассмотренные примеры показывают, что при осуществлении поверки СИ, предположения об «идеальности» процедур поверки могут быть безосновательными, а при их пересмотре необходимо было бы учитывать неопределенность проводимых измерений.
4. Достоверность оценки соответствия откалиброванных СИ метрологическим требованиям существенно зависит от корректности процедур оценивания неопределенности измерения при калибровке, что требует высокой квалификации сотрудников калибровочных лабораторий, составляющих эти процедуры.



ЛИТЕРАТУРА

1. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр./ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, БелГИМ. Изд. 2-е, испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 82 с.
2. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий (ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. IDT).
3. Eurachem/CITAC Guide, 3rd Ed. (2012), «Quantifying uncertainty in analytical measurement».
4. ISO 10576-1:2003 Statistical methods – Guidelines for the evaluation of conformity with specified requirements – Part 1: General principles.
5. Eurachem/Citac Guide, (2007) Use of uncertainty information in compliance assessment.
6. ISO 14253-1:2013 Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications
7. EUROLAB «Cook Book» – Doc No. 8.0 Determination of conformance with specifications or limit values with particular reference to measurement uncertainties – possible strategies.
8. JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment.
9. OIML G 19:2017 The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology.
10. Захаров И.П. Калибровка-17025: справочное пособие, изд. 2, испр. и дополн. С.-Петербург: Политехника-Сервис, 2016, 68 с.
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, 29–31 May 2017, p. 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 27th International Scientific Symposium, September 8–12, 2017, Sozopol, Bulgaria, p. 37–39.
13. EA-4/02 M: 2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration.
14. ГОСТ Р 8.624-2006. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 2007 – 27 с.

Дата принятия 25.06.2018

НОВОСТИ ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ

100-ЛЕТИЕ ДЕКРЕТА СНК РСФСР «О ВВЕДЕНИИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ДЕСЯТИЧНОЙ МЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕР И ВЕСОВ» (продолжение со стр. 18)

НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева), при которой была создана специальная Метрическая комиссия.

Согласно Декрету, на Палату было возложено составление и распространение правил для изготовления метрических гирь и мер, их поверки, клеймения и применения в торговле и промышленности, также в ее задачи (совместно с Народным комиссариатом просвещения) входили пропаганда и популяризации метрической системы среди всего населения. Например, в 1919 г. Главной палатой мер и весов был объявлен конкурс на лучшее сочинение о метрической системе. Результаты конкурса огласили в 1920 г. Лучшие работы – «Все для народа», «На все времена, для всех народов», «Семь раз примерь», «Наши версты не меряны» – были написаны учеными и специалистами-метрологами. С образованием в 1922 году СССР пропагандистская кампания расширилась: во всех правительственных, кооперативных и общественных учреждениях; в военных и гражданских учебных заведениях; в банках и акционерных обществах; в промышленных и торговых предприятиях, а также в театрах, клубах должны были размещены наглядные плакаты по метрической системе официального образца, утвержденные Главной палатой мер и весов.

Использовались и нестандартные подходы, так поэт Владимир Маяковский предложил пропагандировать метрическую систему на конфетных фантиках. Ярким примером такой работы стали серии конфет «Новый вес» и «Новые меры». Серия конфет «Новый вес» включала 12 видов обертки, на которых потребителям в доходчивой форме поэтических четверостиший разъяснялось соотношение фунта к килограмму («двум с половиною равен

фунтам»), золотника к грамму («четверть лишь золотника») и прочих старинных русских мер к метрическим. Обертки для конфет «Новый вес» в числе прочей продукции были представлены на Международной художественно-промышленной выставке, проходившей в Париже в 1925 году. Работа Маяковского получила высокую оценку экспертов, а сам поэт был награжден серебряной медалью.

С восстановлением народного хозяйства страны и проведением индустриализации, социально – экономические трудности, препятствующие метрической реформе, преодолевались. К 1 января 1927 г. почти все наркоматы отчитались о введении метрической системы. Однако в повседневной жизни и некоторых областях промышленности, там, где применялись англо-американские станки и оборудование, использование до- метрических мер продолжалось вплоть до 50-х годов 20 века.

Сегодня метр тесно связан с единицей частоты и времени. Он стал первой из основных единиц Международной системы SI, определяемой через фундаментальную физическую константу – длину световой волны. В 1952 году Международный комитет по мерам и весам решил исследовать возможность переопределения метра через длины волн света и учредил консультативный комитет для способствования решения данной задачи. Идею квантового измерения во многом сформировали советские метрологи. Мария Романова – выдающийся советский ученый – была одним из наиболее авторитетных членов Международного консультативного комитета по новому определению метра. Метр стал первой из основных единиц Международной системы SI, реализованный через фундаментальную физическую константу.

Продолжение на стр. 36