

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-162-167

УДК 51–74

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

ALGORITHM OF CALCULATION OF UNCERTAINTY WHEN CONDUCTING CALIBRATION OF MEASURING INSTRUMENTS

Николаева Евгения Александровна¹,

кандидат физ.-мат. наук, заведующий кафедрой, e-mail: nikolaevaea@yandex.ru

Nikolaeva Evgenia A.¹, C. Sc. (Physics and Maths), Head of Department

Николаев Алексей Владимирович²,

главный метролог, e-mail: nikolaevav@sibgenco.ru

Nikolaev Aleksey V.², Chief Instrument Engineer

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

¹T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

²Сибирский инженерно-аналитический центр 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Станционная, 17

²Siberian Engineering and Analytical Center, 17 street Stantsionnaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. В современных условиях рынка каждое предприятие, должно обеспечить конкурентоспособность своей продукции, которая включает в себя один очень важный элемент – качество. Один из факторов, определяющих качество продукции (работ, услуг) является точность измерений.

В настоящее время в Российской Федерации в целях соответствия международным стандартам по оценке качества выпускаемой продукции проводятся мероприятия по стандартизации национальных стандартов в области обеспечения единства измерений. В настоящее время для соблюдения требований международных стандартов РФ в качестве национального стандарта применяется ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009. В данном документе установлено, что «калибровочные лаборатории должны иметь и применять процедуры оценки неопределённости измерений». Из определения, которым ранее использовался небольшим числом метрологов, неопределённость измерения превратилась в определение, характеризующее результат измерения. Использование «неопределённости», при оценке точности измерений, позволяет наглядно решать вопрос о соответствии (несоответствии) измеренной характеристики качества установленным нормам.

В работе рассмотрены подходы к вычислению неопределённости измерений при калибровке аккредитованными лабораториями для подтверждения компетенции в соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009 (общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий).

Данная работа посвящена и описывает метод измерения требуемого уровня точности и сложности измерений при калибровке средств измерений.

Abstract. In modern market conditions, every enterprise must ensure the competitiveness of its products, which includes one very important element – quality. One of the factors determining the quality of products (works, services) is the accuracy of measurements. Currently in the Russian Federation, in order to comply with international standards for assessing the quality of products, measures are being taken to standardize national standards in the field of ensuring the uniformity of measurements. At present, GOST ISO / IEC 17025–2009 is applied as a national standard for compliance with the requirements of international standards of the Russian Federation. This document establishes that "calibration laboratories should have and apply procedures for estimating measurement uncertainty". From the definition that was previously used by a small number of metrologists, the measurement uncertainty turned into a definition characterizing the measurement result. The use of "uncertainty", when evaluating the accuracy of measurements, makes it possible to visually solve the issue of the compliance (incompliance) of the measured quality characteristic with the established norms.

In the study, approaches to calculation of uncertainty of measurements at calibration by the accredited laboratories for acknowledgment of the competence according to GOST ISO / IEC 17025–2009 (general require-

ments to competence of test and calibration laboratories) are considered.

This work is devoted and describes the method of measuring the required level of accuracy and complexity of measurements when calibrating measuring instruments.

Ключевые слова: Средства измерений, калибровка, неопределенность измерений.

Keywords: Means of measurement, calibration, measurement uncertainty.

В настоящее время в Российской Федерации распоряжением правительства РФ от 19 апреля 2017 года N 737-р утверждена стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации. Согласно утвержденной стратегии до 2025 года в РФ планируется существенно увеличить объём калибровочных работ по отношению к поверочным работам. Для соблюдения требований международных стандартов РФ в качестве национального стандарта применяется ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009 (общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий). В документе установлено, что «калибровочные лаборатории должны иметь и применять процедуры оценки неопределенности измерений» [5].

Данная работа посвящена и описывает метод измерения требуемого уровня точности и сложности измерений при калибровке средств измерений. Данный метод определяет общий алгоритм оценивания неопределенности, при этом при применении он требует от оператора критического подхода, компетенции и интеллектуальной честности. Расчет (оценка) неопределенности нельзя рассматривать как типовую задачу, требующую применения стандартных математических процедур. От оператора необходимо знание природы измеряемой величины и процессов измерения. Качество расчета (оценки) неопределенности, зависит, в конечном счете, от критического подхода и технической компетенции всех лиц, принимающих участие при ее получении.

Согласно ГОСТ Р 54500.3–2011/Руководство ИСО/МЭК 98–3:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения", приняты основные термины и определения.

Неопределенность измерения «включает в себя значительное число составляющих, некоторые из них могут быть рассчитаны из статистического распределения результатов ряда измерений, а другие получены априорно. Результат измерений является наилучшей оценкой измеренной величины, а все составляющие неопределенности, включая обусловленные систематическими эффектами (разного рода поправками, используемым эталонным сравнения), вносят вклад в разброс значений измеряемой величины» [1].

Данный метод определяет способ оценки неопределенности измерений и разработан в целях установления единых подходов при ее оценке в калибровочных лабораториях.

Модель зависимости между входными величинами и выходной величиной имеет вид:

X_1, X_2, \dots, X_n – входные величины; Y – выходная величина; f – функциональная зависимость, между выходной величиной Y и входными величинами X_1, X_2, \dots, X_n .

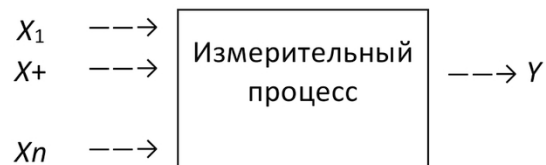


Рис. 1. Модель зависимости между входными величинами и выходной величиной.

Входными величинами являются: сами измеряемые величины, поправки на известные систематические эффекты и погрешности средств измерений т.д.

Для определения оценки входной величины находят ее численное значение путем однократных (многократных) измерений, либо берут его из справочников.

Численными значениями входных величин при многократных измерениях являются их среднее арифметические значения:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i.$$

В полученное численное значение вносятся поправки. Они же добавляются и в модель как входные величины, что является источником неопределенности.

Неопределенность, имеющую систематический характер (погрешность прибора, оператора, условия проведения работ и т. д), вносят в модель в виде поправок, тогда оценку результата измерения получают подстановкой в модель $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ полученных данных.

Стандартную неопределенность $U(X_i)$ входной величины определяют с помощью статистических методов (неопределенность типа A), либо иными методами (неопределенность типа B).

Стандартная неопределенность типа A входной величины выражается в виде СКО, вычисленной по формуле:

$$U_A(X_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (X_{ji} - \bar{X}_j)^2}{n_j(n_j - 1)}}$$

где n_j – количество наблюдений j -й входной величины; i – номер наблюдения; X_{ji} – значение i -го наблюдения j -й входной величины.

Стандартная неопределенность типа B входной величины X_j зависит от априорной информации о ее изменчивости. Если j -ая входная величина изменяется в пределах $\pm \theta_j$ от среднего значения, то ее неопределенность вычисляют по формуле:

$$U_B(X_j) = \frac{\theta_j}{\alpha_j},$$

где θ_j – границы неисключенной систематической погрешности входной величины X_j ; α_j – погрешность, соответствующая входной величине X_j для соответствующего закона распределения (нормальный, равномерный) внутри границ $\pm \theta_j$.

Согласно международному соглашению, полагают: для равномерного распределения $\alpha_j = \sqrt{3}$, для нормального распределения $\alpha_j = 2$, для распределения арксинуса $\alpha_j = \sqrt{2}$, для треугольного распределения $\alpha_j = \sqrt{6}$ (при уровне значимости 0,95).

Стандартная неопределенность типа B зависит от закона распределения. В условиях неполноты сведений о значениях входной величины X_j , допускают, что она распределена по равномерному закону в заданных границах относительно оценки величины X_j .

Коэффициентом чувствительности c_j оценивают, как изменится выходная величина при изменении X_j на 1%:

$$c_j = \frac{\partial f}{\partial X_j}.$$

При прямом измерении коэффициент чувствительности равен единице.

Статистическую зависимость оценок входных величин можно выразить с помощью коэффициентов корреляции. Коэффициент корреляции r_{ij} величин X_j и X_i оценивает их статистическую зависимость. При наличии согласованных пар измерений X_{jk} и X_{ik} коэффициент корреляции вычисляется по формуле:

$$r_{ij} = \frac{1}{U_A(\bar{X}_i)U_A(\bar{X}_j)} \sum_{k=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_i)(X_{jk} - \bar{X}_j)$$

Проверить значимость коэффициента корреляции для его дальнейшего учета (или игнорирования) позволяет критерий Стьюдента:

$$\frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \geq t_p(n-2).$$

Если корреляция между оценками входных величин равна нулю, то суммарная стандартная неопределенность $U_c(Y)$ измеряемой величины, определяется по формуле:

$$U_c(Y) = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2(Y)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n c_j^2 U^2(X_j)},$$

где $U_j^2(Y)$ – вклад стандартной неопределенности входной величины в суммарную стандартную неопределенность выходной величины Y ; $U(X_j)$ – стандартная неопределенность входной величины X_j ; n – количество оценок входных величин; c_j – коэффициент чувствительности входной величины X_j ; j – порядковый номер вклада стандартной неопределенности входной величины X_j .

Если корреляция между оценками входных величин отлична от нуля, то суммарная стандартная неопределенность выходной величины рассчитывается по формуле:

$$U_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i^2 U^2(X_i) + 2r_{ij} U(X_i) U(X_j)]}$$

где c – коэффициент чувствительности выходной величины по отношению к входной величине; $U(X)$ – стандартная неопределенность входной величины, вычисленная по типу A или типу B ; r_{ij} – коэффициент корреляции.

Коэффициент охвата k – это множитель, на который умножают стандартную суммарную неопределенность измеряемой величины для получения расширенной неопределенности измерения. Для уровня значимости 0,95 коэффициент охвата приблизительно равен 2.

Коэффициент охвата k зависит от закона распределения входных величин X_1, X_2, \dots, X_n и степеней свободы ν_j для каждой входной величины X_j . Коэффициент охвата:

$$k = t_{0,95}(\nu_{eff}),$$

Калибруемый		Эталон, показания ед. изм.			Основная погрешность		Вариация показаний
Отметка шкалы, дел.	Показания прибора, ед. изм.	При прямом направлении.	При обратном направлении.	Действительное значение	Основная абсолютная погрешность, ед. изм.	Основная погрешность калибруемого прибора, %	
10	0,25	0,247	0,247	0,247	0,003	0,12	0,000
20	0,50	0,499	0,497	0,498	0,002	0,08	0,0020
30	0,75	0,751	0,747	0,749	0,001	0,04	0,0040
40	1,00	1,004	1,001	1,003	–0,002	0,10	0,0030
50	1,25	1,258	1,256	1,257	–0,007	0,28	0,0020
60	1,50	1,512	1,508	1,510	–0,010	0,40	0,0040
70	1,75	1,759	1,758	1,759	–0,008	0,34	0,0010
80	2,00	2,009	2,007	2,008	–0,008	0,32	0,0020
90	2,25	2,250	2,245	2,248	0,002	0,10	0,0050
100	2,50	2,490	2,491	2,491	0,010	0,38	0,0010
60	3,00	3,021	3,018	3,020	–0,019	0,39	0,0030
100	5,00	4,978	4,976	4,977	0,023	0,46	0,0020
Вариация показаний прибора не превышает					0,1000		
Основная погрешность не превышает					0,5		

где ν_{eff} – эффективное число степеней свободы, определяемое по формуле Велча – Саттерсвейта:

$$\nu_{eff} = \frac{U^4(Y)}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i^4(Y)}{\nu_i}}$$

где $t_{0,95}$ – коэффициент распределения Стьюдента.

Для прямых и косвенных многократных измерений с числом наблюдений n только одной входной величины:

$$\nu_{eff} = (n-1) \left(\frac{U_c(Y)}{U_A} \right)^4.$$

Расширенная неопределенность измерения U_p равна:

$$U_p = k \cdot U_c(Y),$$

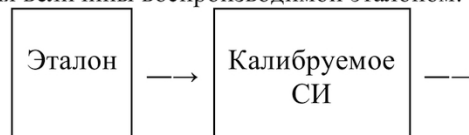
где $U(Y)$ – суммарная стандартная неопределенность измеряемой величины Y ; k – коэффициент охвата.

Конечный результат измерения содержит в себе оценку значения выходной величины Y и значение расширенной неопределенности измерения U_p :

$$Y = y \pm U_p, \quad p = 0,95(k).$$

В настоящее время, расчет неопределенности четко не описан, что вызывает затруднения при практическом применении большинством калибровочных лабораторий. Ниже, приведем для примера, алгоритм расчета неопределённости, чаще всего применяемого метода измерений при калибровке.

Прямое измерение калибруемым средством измерения величины воспроизводимой эталоном.



Погрешность измерений равна:

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - (X_s + \Delta_s)$$

где X_c – результат измерения калибруемым СИ; Δ_c – поправка на погрешность калибруемого СИ; X_s – действительное значение, воспроизводимое эталоном; Δ_s – поправка на погрешность эталона. Рассчитаем показатель неопределенности измерений:

$$U_p = t_{0,95}(\nu_{eff}) \cdot U_c(\Delta)$$

Для этого найдем:

$$\overline{X_c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ci};$$

$$U_A(X_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ci} - \bar{X}_c)^2}{n(n-1)}};$$

$$U_B(\Delta_c) = \frac{q}{2\sqrt{3}};$$

$$U_B(x_s) = \frac{U_s}{k_s}; \quad U_B(\Delta_s) = \frac{\theta_s}{\sqrt{3}};$$

$$U_c(\Delta) = \sqrt{U_A^2(x_c) + U_B^2(\Delta_c) + U_A^2(x_s) + U_B^2(\Delta_s)} \quad (Y),$$

$$; \quad v_{eff} = \frac{U_c^4(\Delta)}{\frac{U_A^4(\bar{x}_c)}{n-1} + \frac{U_B^4(\bar{x}_s)}{v_s}}$$

Эталоном является Установка У358, калибруется амперметр Э538. Проводим операции согласно ГОСТ 8.497 «(ГСИ). Амперметры, вольтметры, ваттметры, варметры. Методика поверки» и получаем следующие результаты.

Используя полученные результаты проводим расчет неопределенности и получаем $U_p = \pm 0,44 \text{ А}$, при $k = 2$ и уровне значимости 95%. То есть большая часть (95%) ожидаемых значений, которые могли бы быть обосновано приписаны к измеренной нами величине силы $(Y - 0,44; Y + 0,44)$, находятся в интервале $k = 2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54500.3–2011/Руководство ИСО/МЭК 98–3:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения".
2. Захаров, И. П. Учебное пособие «Неопределенность измерений». – Санкт – Петербург : Консум, 2016. – 36 с.
3. Захаров, И. П. Справочное пособие «Калибровка 17025». – Санкт – Петербург : Политехника–Серви. 2016. – 68 с.
4. Филиола, Р. С. Теория и планирование механических измерений / Р. С. Филиола, Д. Э. Бизли. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2016. – 744 с.
5. ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
6. Миронов, Э. Г. Метрология и технические измерения: учебное пособие / Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – М. : КНОРУС, 2015. – 422 с.
7. Леонов, О. А. Экономика качества, стандартизации и сертификации : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению 27.03.01 (200500) "Метрология и стандартизация" / О. А. Леонов, Г. Н. Темасова, Н. Ж. Шкаруба ; под общ. ред. О. А. Леонова – М. : ИНФРА–М, 2017. – 251 с.
8. Схиртладзе, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям "Конструкторско–технологическое обеспечение машиностроительных производств", "Автоматизация технологических процессов и производств" / А. Г. Схиртладзе, Я. М. Радкевич. – Старый Оскол : ТНТ, 2015. – 540 с.
9. Dobrovolskii, V.I. Investigation of metrological characteristics of silver–silver chloride electrodes of GET 54–2011, the state primary standard for the ph activity of hydrogen ions in aqueous solutions / V.I. Dobrovolskii, S.V. Prokunin, I.V. Morozov, A.A. Glazdov // «Measurement techniques» Springer, T 59 № 9. P. 1013–1016.
10. Vinge, A.F. National primary standard for the units of relative humidity of gases, molar (volume) fraction of moisture, and dew/frost point temperature, GET 151–2014 / A.F. Vinge, M.A. Vinge, V.N. Egorov, O.A. Podmurnaya // «Measurement techniques» Springer, T 59 № 9. P. 1–8.
11. Aslanyan, A.E. National primary standard for hardness according to the martens scales and indentation scales, GET 211–2014 / A.E. Aslanyan, E.G. Aslanyan, S.M. Gavrilkin, A.S. Doinikov, I.N. Temnitskii, A.N. Shchipunov // «Measurement techniques» Springer. T 59 № 6. P. 555–559.
12. Аристов, А.И. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие / А.И. Аристов, В.М. Приходько, И.Д. Сергеев, Д.С. Фатюхин. – М. : НИЦ ИНФРА–М, 2013. – 256 с.
13. Боларев, Б.П. Стандартизация, метрология, подтверждение соответствия: Учебное пособие / Б.П. Боларев. – М.: НИЦ ИНФРА–М, 2013. – 254 с.
14. Дубовой, Н.Д. Основы метрологии, стандартизации и сертификации: Учебное пособие / Н.Д. Дубовой, Е.М. Портнов. – М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА–М, 2013. – 256 с.
15. Сергеев, А.Г. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник для бакалавров / А.Г. Сергеев, В.В. Терегеря. – М.: Юрайт, ИД Юрайт, 2013. – 838 с.

REFERENCIS

1. GOST R 54500.3–2011 / ISO / IEC Guide 98–3: 2008 "Measurement uncertainty – Part 3 : Guidelines for the expression of measurement uncertainty".
2. Zakharov, I. P. Textbook "Uncertainty of measurements". – St. Petersburg : Consum, 2016. – p.36.
3. Zakharov, I. P. Reference manual "Calibration 17025". – St. Peterburg : Politechnica – Servis. 2016. – p.68.
4. Filiola, R. S. Theory and planning of mechanical measurements / R. S. Filiola, D. E. Bizli. – Izhevsk : Regular and chaotic dynamics, 2016. – p.744.
5. GOST ISO / IEC 17025–2009 General requirements for the competence of test and calibration laboratories.
6. Mironov, E. G. Metrology and Technical Measurements: A Training Manual / E. G. Mironov, N. P. Bessonov. – M. : KNORUS, 2015. – p.422.
7. Leonov, O. A. The Economics of Quality, Standardization and Certification: a textbook for university students studying in the field of 27.03.01 (200500) "Metrology and Standardization" / O. A. Leonov, G. N. Temasova, N. J. Shkaruba; Under the Society. Ed. O. A. Leonova – M. : INFRA–M, 2017. – p.251.
8. Skhirtladze, A. G. Metrology, standardization and certification: a textbook for university students studying in the fields "Design and technological support of machine–building productions", "Automation of technological processes and productions" / A. G. Shirladze, Ya. M. Radkevich. – Sary Oskol : TNT, 2015. – p.540.
9. Dobrovolskii, V. I. Investigation of the metrological characteristics of the silver–silver chloride electrodes of GET 54–2011, the state primary standard for the ph activity of hydro–gen ions in aqueous solutions / V. I. Dobrovolskii, S. V. Prokunin, I. V. Morozov, A. A. Glazdov // "Measurement techniques" Springer, T 59 No. 9. pp. 1013–1016.
10. Vinge, A. F. National primary standard for the units of relative humidity of gases, molar (volume) fraction of moisture, and dew / frost point temperature, GET 151–2014 / A. F. Vinge, M. A. Vinge, V. N. Egorov, O. A. Podmurnaya // "Measurement techniques" Springer, T 59 No. 9. pp. 1–8.
11. Aslanyan, A. E. National primary standard for hardness according to the martens scales and indentation scales, GET 211–2014 / A. E. Aslanyan, E. G. Aslanyan, S. M. Gavrilkin, A. S. Doinikov, I. N. Temnitskii, A. N. Shchipunov // "Measurement techniques" Springer. T 59 No. 6. pp. 555–559.
12. Aristov, A.I. Metrology, standardization, certification: Training manual / A.I. Aristov, V.M. Prikhodko, I.D. Sergeev, D.S. Fatyukhin. – M.: НИЦ ИИ–ФРА–М, 2013. – p.256.
13. Bolarev, B. P. Standardization, metrology, conformity assessment: Textbook / B. P. Bolarev. – M. : SRC INFRA–M, 2013. – p.254.
14. Dubovoi, N. D. Basics of Metrology, Standardization and Certification: A Training Manual / N. D. Dubovoy, E. M. The tailors. – Moscow: ID FORUM, SIC INFRA–M, 2013. – p.256.
15. Sergeev, A. G. Metrology, Standardization and Certification: A Textbook for B–Qualifiers / A. G. Sergeev, V. V. The tergere. – M. : Yurayt, I. D. Yurayt, 2013. – p.838.

Поступило в редакцию 11.07.2017
Received 11.07.2017