

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-113-119

УДК 51–74

СПОСОБЫ РАСЧЕТА НЕОРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

METHODS OF CALCULATING INCOMPANIENCE IN CONDUCTING CALIBRATION OF MEANS OF MEASUREMENTS BY VARIOUS METHODS

Николаева Евгения Александровна¹, кандидат физико–математических наук,
доцент кафедры математики, e-mail: nikolaeva@yandex.ru

Evgenia A. Nikolaeva¹, Associate Professor

Николаев Алексей Владимирович², главный метролог, e-mail: nikolaevav@sibgenco.ru

Aleksey V. Nikolaev², chief metrologist

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

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

²«Сибирский инженерно–аналитический центр» 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Станционная, 17

²"Siberian engineering and analytical center" 17 street Stantsionnaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация: Качество продукции, за которое борются все производители, является одной из важных составляющих конкурентоспособности. Высокое качество продукции обеспечивается посредством различного рода 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. 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 данном документе установлено, что «калибровочные лаборатории должны иметь и применять процедуры оценки неопределенности измерений». Использование «неопределённости», при оценке точности измерений, позволяет наглядно решать вопрос о соответствии (несоответствии) измеренной характеристики качества установленным нормам.

Данная работа посвящена и описывает методы измерения требуемого уровня точности и сложности измерений при калибровке средств измерений. Подходы, описанные в настоящей статье, не являются исчерпывающими по всем аспектам калибровки средств измерений и установления действительных значений их параметров, включая связанные с ними оценки неопределенности. Процедуры, изложенные в данной работе, следует рассматривать как основные подходы к вычислению и приписыванию значений для большинства методов калибровки средств измерений, но в каждом конкретном случае может возникнуть необходимость в соответствующих корректировках.

Abstract: The quality of products for which all manufacturers are struggling is one of the important components of competitiveness. High quality of products is ensured by means of various types 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. To meet the requirements of international standards, the Russian Federation applies GOST ISO/IEC 17025-2009 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories" as the national standard. This document established that "calibration laboratories should have and apply the procedures for the evaluation of uncertainty in measurement accuracy". The use of "uncertainty" in assessment of the measurement accuracy allows you to clearly address the issue of compliance (non-compliance) of the measured quality characteristics to the established standards.

This work is dedicated to and describes the methods of measurement of the required level of accuracy and complexity of measurements in calibration of measuring instruments. Approaches that are described in this article, do not cover all aspects of measuring instruments calibration and the establishment of real values of their

parameters, including estimates of uncertainty associated with them. The procedures outlined in this paper should be considered as basic approaches to calculation and attribution values for most methods of calibration of measuring instruments, but in each case there may be a need for the relevant adjustments.

Ключевые слова: Средства измерений, калибровка, неопределенность измерений, метод измерения, метод калибровки, уровень точности.

Key words: The means of measurement, calibration, measurement uncertainty, calibration method, measurement method, the level of precision.

В данной работе рассмотрены подходы к вычислению неопределенности при калибровке средств измерений, которые могут быть применены к оцениванию неопределенности с учетом наилучших калибровочных возможностей лабораторий.

Подходы, описанные в настоящей статье, не являются исчерпывающими по всем аспектам калибровки средств измерений и установления действительных значений их параметров, включая связанные с ними оценки неопределенности. Процедуры, изложенные в данной работе, следует рассматривать как основные подходы к вычислению и приписыванию значений для большинства методов калибровки средств измерений, но в каждом конкретном случае может возникнуть необходимость в соответствующих корректировках. Описанные статистические методы иллюстрируют изложенные подходы и предполагают, например, нормально распределенные данные. В частности, когда данные распределены ненормально, предпочтение может отдаваться другим статистическим методам для получения достоверных значений параметров и связанных с ними неопределенностей. В настоящей статье описаны в общих чертах основные этапы расчета неопределенности измерений, возникающие при проведении калибровки средств измерений.

Данная работа является продолжением [1], которая посвящена и описывает метод измерения требуемого уровня точности и сложности измерений при калибровке средств измерений. Описанный в ней метод определяет способ оценки неопределенности измерений и разработан в целях установления единых подходов при ее оценке в калибровочных лабораториях. Применяя изложенную в [1] методику можно рассчитать неопределенности, возникающие при различных методах калибровки. Ниже приведем алгоритмы расчета неопределенности, чаще всего применяемых методов измерений при калибровке.

Приведем основные формулы, необходимые для расчетов (подробно можно ознакомиться в [1]).

Рассматривается модель $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, где 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 [2-5].

Стандартную неопределенность U входной величины определяют с помощью статистических методов (неопределенность типа A), либо иными методами (неопределенность типа B). Стандартная неопределенность типа A – (U_A) выражается в виде СКО. Стандартная неопределенность типа B – (U_B) зависит от априорной информации о ее изменчивости, а также зависит от закона распределения.

Статистическую зависимость оценок входных величин выражают с помощью коэффициентов корреляции. Значимость коэффициента корреляции проверяется с помощью критерия Стьюдента. Расширенную неопределенность измерения рассчитывают по формуле: $U_p = k \cdot U_c(Y)$, где $U_c(Y)$ – 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 [6-9].

1. Сличение калибруемого СИ и эталона с помощью средства сравнения.

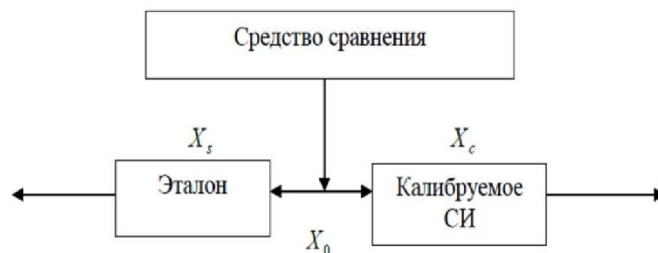


Рис. 1. Сличение калибруемого средства измерения и эталона с помощью средства сравнения.

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - (X_s + \Delta_s) - \Delta_{cc}$$

где X_s и X_c – показания калибруемого СИ и эталона, соответственно; X_0 – значение воспроизводимое средством сравнения; Δ_c – поправка на погрешность калибруемого СИ; Δ_s – поправка на погрешность эталона; Δ_{cc} – поправка на неэквивалентность задания значения X_0 калибруемому СИ и эталону.

Таблица 1

Калибруемый прибор			Эталон		Абсолютная погрешность			погрешность (в %)	вариация (в кОм)
Оцифрованные отметки шкалы	измеренное значение (в кОм)	чувствительность вблизи проверяемой отметки шкалы (мм/кОм)	Rд1 (в кОм)	Rд2 (в кОм)	Δ_1 (в кОм)	Δ_2 (в кОм)	ΔL макс мм		
5	5,0	2,56	5,08	5,05	0,08	0,05	0,20	0,26	0,03
10	10,0	1,78	10,3	10,25	0,30	0,25	0,53	0,67	0,05
20	20,0	1,00	20,70	20,60	0,70	0,60	0,70	0,87	0,1
50	50,0	0,33	50,70	50,40	0,70	0,40	0,23	0,29	0,3
100	100,0	0,11	101,80	100,80	1,80	0,80	0,20	0,25	1
200	200,0	0,03	203,80	203,40	3,80	3,40	0,11	0,14	0,4
500	500,00	0,006	507,90	507,00	7,90	7,61	0,05	0,06	0,9
1000	1000,00	0,0015	1009,50	1009,00	9,50	9,45	0,01	0,02	0,5

$$U_p = t_{0,95}(v_{eff}) \cdot U_c(\Delta) \quad \overline{X_c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ci} \quad \overline{X_s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{si}$$

$$U_A(X_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ci} - \overline{X_c})^2}{n(n-1)}} \quad U_A(X_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{si} - \overline{X_s})^2}{n(n-1)}}$$

$$U_B(\Delta_c) = \frac{q}{2\sqrt{3}} \quad U_B(x_s) = \frac{U_s}{k_s} \quad U_B(\Delta_{cc}) = \frac{\theta_{cc}}{\sqrt{3}}$$

$$U_c(\Delta) = \sqrt{U_A^2(x_c) + U_B^2(\Delta_c) + U_A^2(x_s) + U_B^2(x_s) + U_B^2(\Delta_s) + U_B^2(\Delta_{cc})}$$

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

Сличение калибруемого СИ и эталона с помощью средства сравнения: в качестве эталона применен рабочий эталон единицы электрического сопротивления 3 разряда МСР -63, в качестве средства сравнения применен рабочий эталон единицы электрического сопротивления 3 разряда Р 403, Р 405, Р 4007, калибруется мегаомметр М 4100/4. Проводим операции согласно ГОСТ 8.409 «(ГСИ). Омметры. Методы и средства поверки» и получаем следующие результаты [10].

Используя полученные результаты проводим расчет неопределенности и получаем $U_p = \pm 0,98 \text{ кОм}$, при уровне значимости 95%. То есть большая часть ожидаемых значений, которые могли бы быть обосновано приписаны к измеренной нами величине электрического сопротивления (Y), находятся в интервале $(Y - 0,98; Y + 0,98)$.

2. Прямое измерение эталоном величины воспроизводимой калибруемой мерой [11-14].

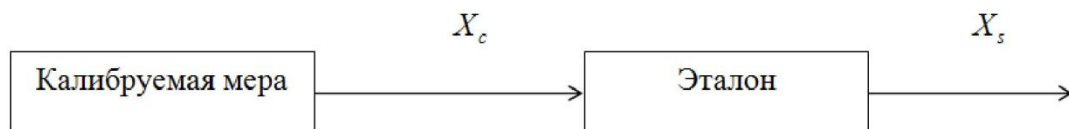


Рис. 2. Калибровка меры хранящей единицы величины с помощью эталона.

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

где X_c – номинальное значение калибруемой меры; X_s – действительное значение, воспроизводимое эталоном; Δ_s – поправка на погрешность эталона.

$$U_p = t_{0,95}(v_{eff}) \cdot U_c(\Delta) \quad \bar{X}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{si} \quad U_A(X_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{si} - \bar{X}_s)^2}{n(n-1)}}$$

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

$$U_c(\Delta) = \sqrt{U_A^2(x_s) + U_B^2(x_s) + U_B^2(\Delta_s)} \quad v_{eff} = \frac{U_c^4(\Delta)}{\frac{U_A^4(\bar{x}_c)}{n-1} + \frac{U_B^4(\bar{x}_s)}{v_s}}$$

Таблица 2

Генерируемое значение напряжения, В		Действительное значение напряжения, В	Погрешность, В	Предел допускаемой основной абсолютной погрешности, В
0%	0	0,000000	0,000000	0,000200
25%	0,25	0,249985	-0,000015	0,000300
50%	0,50	0,499970	-0,000030	0,000400
75%	0,75	0,749970	-0,000030	0,000500
100%	1,00	0,999950	-0,000050	0,000600

Прямое измерение эталоном величины воспроизводимой калибруемой мерой [8]: в качестве эталона применен государственный эталон Н4-12, калибруется Метран 501 в режиме генерирования электриче-

ского напряжения. Проводим операции согласно методике поверки «Калибраторы давления портативные Метран 501-ПКД-Р» и получаем следующие результаты.

Используя полученные результаты проводим расчет неопределенности и получаем $U_p = \pm 0,001 B$, при уровне значимости 95%. То есть большая часть ожидаемых значений, которые могли бы быть обосновано приписаны к измеренной нами величине (сила электрического напряжения - Y), находятся в интервале $(Y - 0,001; Y + 0,001)$.

3. Сличение значений, воспроизводимых калибруемой мерой и эталоном, с помощью компаратора.

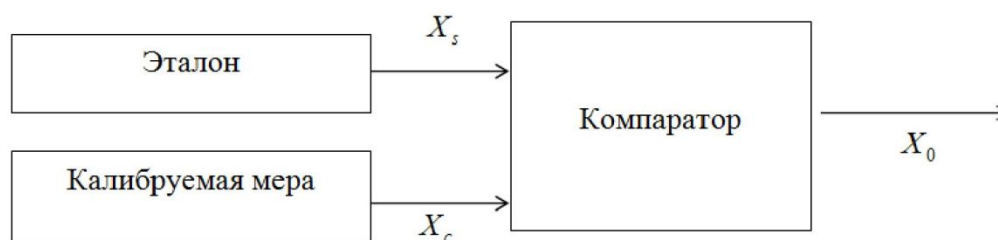


Рис. 3. Сличение значений, воспроизводимых калибруемой мерой и эталоном, с помощью компаратора.

$$\Delta = X_c - (X_s + \Delta_s) + (X_0 + \Delta_0)$$

где X_0 – результат компарирования; X_c – номинальное значение калибруемой меры; X_s – действительное значение передаваемое эталоном; Δ_s – поправка на погрешность эталона; Δ_0 – поправка на погрешность компаратора.

$$U_p = t_{0,95}(v_{eff}) \cdot U_c(\Delta) \quad \bar{X}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{0i} \quad U_A(X_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{0i} - \bar{X}_0)^2}{n(n-1)}}$$

$$U_B(x_0) = \frac{U_0}{k_0} \quad U_B(x_s) = \frac{U_s}{k_s} \quad U_B(\Delta_s) = \frac{\theta_s}{\sqrt{3}} \quad U_B(\Delta_0) = \frac{\theta_0}{\sqrt{3}}$$

$$U_c(\Delta) = \sqrt{U_A^2(x_0) + U_B^2(\Delta_0) + U_B^2(x_s) + U_B^2(\Delta_s) + U_B^2(x_0)}$$

$$v_{eff} = \frac{U_c^4(\Delta)}{\frac{U_A^4(\bar{x}_s)}{v_s} + \frac{U_A^4(\bar{x}_0)}{n-1} + \frac{U_B^4(\bar{x}_0)}{v_0}}$$

Сличение значений, воспроизводимых калибруемой мерой и эталоном, с помощью компаратора: в качестве эталона применены катушки электрического сопротивления, государственные рабочие эталоны 1 разряда в соответствии с «Государственной поверочной схемой для средств измерений электрического сопротивления», калибруются катушки электрического сопротивления на постоянном токе. Передача размера единицы проведена с помощью компараторов: мост-компаратор сопротивлений МКС-1, ПГ от 0,00005 до 0,0003; компаратор сопротивлений Р3015, ПГ от 0,0001 до 0,0008. Вспомогательные средства измерений: термометр лабораторный ТЛ-4, термометр ЛТ, прибор комбинированный «Testo 608-H1». Проводим операции согласно ГОСТ 8.237.2003 «ГСИ. Меры электрического сопротивления однозначные. Методика поверки» получаем следующие результаты.

Действительное значение сопротивления меры (R_t) при температуре, отличной от $+20^\circ\text{C}$ (в пределах $+18^\circ\text{C} \dots +24^\circ\text{C}$) определяется по формуле:

$$R_t = R_{20} + R_{ном} [\alpha \cdot (t - 20) + \beta \cdot (t - 20)^2]$$

температурные коэффициенты сопротивления α и β определены при первичной аттестации мер.

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

Таблица 3

Тип меры	Номер меры	Действительное значение сопротивления меры при 20°C, Ом	Температурный коэффициент $\alpha \cdot 10^{-6}$	Температурный коэффициент $\beta \cdot 10^{-6}$
P310	045433	0,001000031	-1,8	-0,18
P310	050807	0,01000019	0,2	-0,43
P321	002011	0,1000021	1,5	-0,52
P321	072134	0,999997	2,5	-0,34
P321	018646	10,00008	5,3	-0,36
P331	021817	99,9978	10,7	-0,50
P331	100496	1000,019	9,5	-0,51
P331	027437	10000,44	1,1	-0,52
P331	03284	100001,3	1,8	-0,55

Процедуры, изложенные в данной работе, следует рассматривать как основные подходы к вычислению и приписыванию значений для большинства методов калибровки средств измерений, но в каждом конкретном случае может возникнуть необходимость в соответствующих корректировках. Используемые подходы являются минимально достаточным для адекватной оценки неопределённости, но при этом требует от оператора знаний природы измерений, основ математики, наличие критического мышления, честности и беспристрастности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаева Е.А. Алгоритм расчета неопределённости при проведении калибровки средств измерений / Е.А. Николаева, А.В. Николаев // Вестник КузГТУ. - 2017. - №5. - С. 162-167.
2. Захаров, И. П. Справочное пособие «Калибровка 17025». – Санкт – Петербург : Политехника–Серви. 2016. – 68 с.
3. Филиола, Р. С. Теория и планирование механических измерений / Р. С. Филиола, Д. Э. Бизли. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2016. – 744 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Схиртладзе А. Г. Метрология, стандартизация и технические измерения / А. Г. Схиртладзе, Я. М. Радкевич — Старый Оскол : ТНТ, 2010 – 420 с.
8. Голубев С.С. Стратегия обеспечения единства измерений в российской федерации до 2025 года ведет российскую метрологию по инновационному пути // Законодательная и прикладная метрология. - 2017. - № 4. - С. 5-8.
9. Каштанов А.Л. Метрология и электрические измерения / А.Л. Каштанов, А.А. Комяков, А.А. Кузне-

цов, О.Б. Мешкова, Д.В. Пашков // Методы и средства электрических измерений. - Омск, 2014. Том 2

10. Кирющенко А.Н. Совершенствование процесса поверки средств измерений в государственном региональном центре метрологии // В сборнике: Молодежь и XXI век - 2015 материалы V Международной молодежной научной конференции: в 3-х томах. Ответственный редактор: Горохов А.А. 2015. С. 115-116.

11. Гуревич В.Л. Современные направления развития метрологии. Актуальные вопросы машиноведения // - 2017. Т. 6. С. 29-30.

12. Афанасьев П.А. Введение термина «неопределенность измерений», как новый этап развития метрологии // В сборнике: Юность и Знания - Гарантия Успеха - 2017 Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научной конференции. В 2-х томах. Ответственный редактор А.А. Горохов. 2017. С. 104-106.

13. Степанова Е.А. Метрология и измерительная техника: основы обработки результатов измерений / Е.А. Степанова, Н.А. Скулкина, А.С. Волегов // Москва - 2017. Сер. 11 Университеты России.

14. Кубрак М.В. Современные проблемы метрологии и стандартизации и возможные пути их решения / М.В. Кубрак, С.Н. Леонов, В.В. Головков. // Научно-практические исследования. 2017. № 2 (2). С. 123-126.

REFERENCES

1. Nikolaeva E.A. Algorithm of calculation of uncertainty when conducting a calibration of measuring instruments / E.A. Nikolaeva, Nikolaev A.V. // Vestnik KuzGTU. -2017. No. 5. -С. 162-167.

2. Zakharov I.P., Reference manual «Calibration 17025» - St. Petersburg: Politehnica-Cervi. 2016.-68 p.

3. Filiola, R. S. Theory and planning of mechanical measurements / R. S. Financial liola, D. E. Beasley. - Izhevsk: Regular and chaotic dynamics, 2016. - with 744.

4. 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 hydro-gen ions in aqueous solutions / V.I. Dobrovolskii, S.V. Prokunin, I.V. Morozov, A.A. Glazdov // «Measurement techniques» Springer, T 59 № 9. pp. 1013 – 1016.

5. 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.

6. 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.

7. Skhirtladze A. G. Metrology, standardization and technical measurement / A. G. Skhirtladze, J. M. Radkevich - Saryj Oskol: TNT, 2010 - 420 p.

8. Holubeu S.S. Strategy ensuring the uniformity of measurements in the Russian Federation up to the year 2025 leads Russian Metrology on innovative ways // Laws, legislative and applied metrology. - 2017. - No. 4. - S. 5-8.

9. Chestnuts A.L. Metrology and electrical measurements /A.L. Chestnuts, A.A. Komyakov, A.A. Kuznetsov, O.B. Meshkova, D.V. Pashkov // Methods and means of electronic-electric measurements. - Омск, 2014. Volume 2

10. Kirjushhenkov A.N. Improved verification of measuring instruments in the State regional centre of metrology // Miscellany: youth and the twenty-first century - 2015 materials V International Youth Scientific Conference: 3-x-max. Executive Editor: Gorokhov A.A. 2015. С. 115-116.

11. Gurevich V.L. Modern trends of development of metrology. Current issues of engineering // - 2017. Т. 6. С. 29-30.

12. Afanasiev P.A. The introduction of the term "measurement uncertainty" as a new stage in the development of metrology //in: Youth and knowledge-guarantee of success - 2017 4 proceedings of the 5th International Youth scientific conference. In 2 volumes. Editor-in-Chief A.A. Gorokhov. 2017.104-106.

13. E.A. Stepanova Metrology and measuring equipment: the basics of measurement results processing / E.A. Stepanova, N.A. Skulkina, A.S. Volegov // Moscow - 2017. CEP. 11 Universities of Russia.

14. Kubrak M.M. Modern problems of metrology and standardization, and possible ways to overcome them / M.V. Kubrak, Leonov S.N., V. Golovkov. Scientific and practical research. - 2017. # 2 (2). С. 123-126.

Поступило в редакцию 19.04.2018

Received 19.04.2018