

К ВОПРОСУ ОЦЕНИВАНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АККРЕДИТОВАННОЙ КАЛИБРОВОЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

В статье рассмотрен вопрос оценки наименьшей достигаемой неопределённости измерений калибровочной лаборатории, аккредитованной на соответствие требованиям стандарта ISO/IEC 17025. Приведен пример оценивания наименьшей достигаемой неопределённости измерений при калибровке цифрового штангенциркуля, определены и оценены источники неопределённости. Качество оценки калибровочных возможностей зависит от здравого смысла, критического мышления и профессиональной добросовестности персонала калибровочной лаборатории, принимающего участие в их получении.

Ключевые слова: калибровочная лаборатория, аккредитация, калибровка средств измерительной техники, неопределённость измерений, калибровочные и измерительные возможности.

Введение

Постановка проблемы. Согласно Закону Украины “О метрологии и метрологической деятельности”, единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражаются в единицах измерения, определенных этим Законом, а характеристики погрешностей или неопределённости измерений известны с определенной вероятностью и не выходят за установленные границы.

Как известно, неопределённость измерений – это количественная мера точности измерений. Оценивание точности измерений является одной из задач обеспечения их единства.

Одним из существенных критериев, характеризующих область аккредитации калибровочной лаборатории (КЛ), аккредитованной Национальным агентством по аккредитации Украины (НААУ) на соответствие требованиям стандарта ДСТУ ISO/IEC 17025 [1], является наименьшая достигаемая неопределённость измерений [2].

В настоящее время в Украине насчитывается 25 аккредитованных КЛ, каждая из которых заявила свои калибровочные и измерительные возможности (Calibration and Measurement Capability – CMC), указав их в табличном виде по номенклатуре калибруемых СИТ в «Сфере аккредитации». Данные таблицы информируют заказчиков о калибровочных возможностях аккредитованных КЛ.

CMC выражается в виде расширенной неопределённости измерений, имеющей установленную вероятность охвата равную примерно 95 %. Определение термина CMC приведено в документе ILAC-P14:01/2013 [3] международной организации по аккредитации лабораторий (ILAC).

Термин CMC является актуализированным и согласованным по отношению к используемому ранее термину наилучшие измерительные возможно-

сти (Best Measurement Capability – BMC), но, по сути, есть идентичный ему. Разъяснение по оценке BMC даны в документе EA - 4/02 [4] Европейской ассоциации по аккредитации (EA), определяющем BMC как “наименьшая неопределённость измерений, которую может достигнуть лаборатория для определенной величины при идеальных условиях измерения в рамках своей аккредитации”. Одна из целей документа [4] – это содействие органам по аккредитации в едином (унифицированном) указании наименьших достигаемых неопределённостей измерений в аккредитованных ими КЛ.

Анализ “Сфер аккредитации” КЛ, аккредитованных НААУ, показывает, что некоторые КЛ указывают CMC на уровне максимально допускаемых погрешностей калибруемых средств измерительной техники (СИТ), которые нормируются в технических условиях на эти СИТ. Другие КЛ в качестве CMC приводят неопределённости измерений, полученные при калибровке своих эталонов. Оба подхода являются неверными и свидетельствуют о непонимании некоторыми КЛ сущности CMC, как меры точности своих калибровок. Например, если ознакомиться с CMC по калибровке штангенциркуля, а калибровка штангенциркуля входит в “Сферы аккредитаций” большинства аккредитованных НААУ КЛ, выписка из которых приведена в табл. 1, то можно отметить, что наименьшие достигаемые неопределённости измерений находятся в интервале от 0,001 мм до 0,060 мм, то есть, отличаются между собой в 60 раз.

Одна из причин такого разногласия состоит в отсутствии стандартизованных методик калибровки (МК) СИТ, что вынуждает КЛ самим разрабатывать МК, исходя из своего опыта и знаний.

Такое состояние дел в области оценки качества измерений не способствует обеспечению их единства.

СИТ это создание идеальных условий измерений (наилучшее существующее СИТ, нормальные параметры окружающей среды, квалифицированный оператор).

Разъяснение по термину “наилучшее существующее СИТ” дано в документе [3]. Под нормальными параметрами окружающей среды понимаются условия, прописанные в МК СИТ, где также устанавливаются требования к персоналу, проводящему калибровку СИТ.

Как упоминалось выше, для определения СМС калибруемое СИТ должно быть “идеальным”, чтобы никакие существенные вклады неопределённости не объяснялись физическими эффектами, приписанными из-за возможного несовершенства СИТ.

В данном случае, калибруемый штангенциркуль должен соответствовать требованиям технической документации по его изготовлению, то есть техническим условиям, прописанным в стандарте ДСТУ ГОСТ 166:2009 [9].

Из заявленных в “Сферах аккредитаций” метрологических характеристик калибруемого штангенциркуля следует, что при оценке своих СМС КЛ использовали в качестве наилучшего существующего СИТ штангенциркуль с цифровым отсчётным устройством типа ШЦЦ-I.

Калибровка штангенциркуля ШЦЦ-I с диапазоном измерений (0 – 150) мм и с шагом дискретности цифрового отсчётного устройства 0,01 мм осуществляется методом прямого измерения плоскопараллельных концевых меры длины класса точности 2, соответствующих ДСТУ ГОСТ 9038:2009 [10], и которые применяются в качестве эталона.

Возможны и другие методы калибровки штангенциркуля, например, на координатно-измерительной машине, но метод калибровки по концевым мерам длины есть самый экономически целесообразный. К тому же, метод калибровки при оценке СМС и при повседневных калибровках СИТ должен быть один и тот же, также оценка СМС должна производиться только согласно МК.

Пусть требуется откалибровать штангенциркуль в точке диапазона измерения наружных размеров 71,5 мм.

При этом условия проведения калибровки следующие:

- температура воздуха в помещении, в котором проводится калибровка – $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- штангенциркуль и эталоны выдержаны на рабочем месте калибровки не менее 3 часов.

Модельное уравнение измерения в этом случае имеет вид:

$$E_X = I_{iX} - I_S + L_S \cdot \alpha \cdot \Delta t + \delta I_{iX} + \delta I_M, \quad (1)$$

где E_X – отклонение показаний штангенциркуля от значения эталонной концевой меры длины;

I_{iX} – показания штангенциркуля в калибруемой точке;

I_S – длина используемой концевой меры длины;

L_S – номинальное значение используемой концевой меры длины;

α – средний температурный коэффициент линейного расширения материалов штангенциркуля и концевой меры длины;

Δt – разность температур штангенциркуля и концевой меры длины;

δI_{iX} – поправка на дискретность цифрового отсчётного устройства штангенциркуля (погрешность квантования);

δI_M – поправка на механические эффекты.

Оценка стандартной неопределённости измерений по типу А есть среднеквадратическое отклонение среднего арифметического результата измерений длины концевой меры. Допустимо предположить, что $u_A = 0$.

Составляющие стандартной неопределённости измерений, оцениваемые по типу В (u_B), определяются через известные границы неисклѳченных систематических погрешностей и коэффициент распределения, характеризующий закон распределения погрешности внутри этих границ.

Стандартная неопределѳнность измерений u_B получается при этом с помощью метрологически обоснованной оценки изменчивости входной величины, учитывая всю имеющуюся в распоряжении информацию.

Оценим составляющие стандартной неопределѳнности измерений по типу В.

1) Оценка поправки на дискретность цифрового отсчётного устройства штангенциркуля.

Погрешность квантования возникает в цифровых СИТ и является, как отмечено в [11], инструментальной случайной аддитивной статической погрешностью.

Учет погрешности квантования при оценивании неопределѳнности результатов измерений с многократными наблюдениями рассмотрен в статье [12], согласно которой стандартная неопределѳнность измерений, связанная с погрешностью квантования при числе измерений от 6 до 10 и $u_A = 0$, определяется по формуле:

$$u_B(\delta I_{iX}) = \frac{q}{2\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где q – единица младшего разряда в отсчете (дискретность цифрового устройства штангенциркуля). Для $q = 0,01$ мм, $u_B(\delta I_{iX}) = 2,9$ мкм.

2) Оценка поправки на механические эффекты.

Механические эффекты включают в себя измерительное усилие, зазор между измерительными поверхностями губок штангенциркуля.

Поскольку штангенциркуль не оснащен стабилизатором измерительного усилия, при измерении требуется приложение равномерного и достаточного усилия. В стандарте [9] допускаемое значение усилия перемещения рамки по штанге для штангенциркуля с диапазоном измерения (0 – 150) мм составляет 10 Н. Как указано в [13], угол поворота одного крайнего сечения штанги относительно другого будет определяться из выражения:

$$\varphi = \frac{M \cdot L}{E \cdot I}, \quad (3)$$

где M – момент, приложенный к губкам, в Н·мм, $M = 400$ Н·мм (длина вылета губок $l = 40$ мм, измерительное усилие $P = 10$ Н);

L – измеряемая длина в мм, $L = 71,5$ мм;

E – модуль упругости материала штанги в Па, $E_{\text{стали}} = 2 \cdot 10^5$ МПа;

I – момент инерции поперечного сечения штанги в мм⁴, $I = 843,75$ мм⁴.

Погрешность измерения, вызванная этим поворотом, будет равна:

$$\delta l_M = l \cdot \varphi = \frac{P \cdot l^2 \cdot L}{E \cdot I} = 6,8 \text{ мкм}. \quad (4)$$

Зазор между измерительными поверхностями губок штангенциркуля возникает вследствие отклонений их от прямолинейности и плоскостности, а также от параллельности между собой.

В стандарте [9] также нормируются допуски на отклонения геометрических параметров измерительных поверхностей губок. Но так как при оценке СМС в качестве образца взят штангенциркуль с почти идеальными метрологическими характеристиками, то допустимо предположить отсутствие отклонений измерительных поверхностей губок от параллельности, прямолинейности и плоскостности.

При повседневных же калибровках штангенциркуля КЛ должна учитывать эти отклонения по факту их наличия, и оценка которых войдет в бюджет неопределённости измерений, представленный в МК.

Неопределённость от механических эффектов, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta l_M) = \frac{\delta l_M}{\sqrt{3}} = 3,9 \text{ мкм}. \quad (5)$$

3) Оценка поправки, учитывающей разницу температур между штангенциркулем и концевой мерой длины.

Согласно условиям калибровки, штангенциркуль и концевая мера длины должны быть выдержаны на рабочем месте калибровки не менее 3 часов для выравнивания температур. Так как различие масс штангенциркуля и концевой меры длины незначительное (разница составляет 35 г), то 3 часа это достаточное время для полного выравнивания температур. Поэтому, практическая разность темпера-

тур штангенциркуля и измеряемой концевой меры длины будет равна $\Delta t = 0$ °С.

4) Оценка поправки измерения концевой меры длины.

Значения длины эталонной концевой меры, а также связанная с ними расширенная неопределённость измерений представлены в «Сертификате калибровки», который подтверждает, что концевая мера соответствует требованиям 2-го класса точности согласно [10], то есть тому, что ее срединная длина совпадает в диапазоне $\pm 1,00$ мкм с номинальным значением длины.

Оценка неопределённости калибровки эталонной меры длины определяется путем деления значения расширенной неопределённости измерений при калибровке концевых мер длины $U(L_S)$ на коэффициент охвата $k = 2$, которые указаны в «Сертификате калибровки». Для концевой меры длины $L = 71,5$ мм расширенная неопределённость измерений составляет $U(L_S) = 0,03$ мкм, тогда $u_B(\delta l_S) = 0,015$ мкм.

Суммарная стандартная неопределённость по типу В будет определяться из выражения:

$$u_B = \sqrt{u_B^2(\delta l_X) + u_B^2(\delta l_M) + u_B^2(\delta l_S)}. \quad (6)$$

Стандартная неопределённость по типу В, вычисленная по формуле (6), составит: $u_B = 4,86$ мкм.

Суммарная стандартная неопределённость измерений будет определяться через стандартные неопределённости входных величин по формуле:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (7)$$

Расширенная неопределённость измерений при калибровке штангенциркуля будет определяться из выражения:

$$U = k \cdot u_C, \quad (8)$$

$k = 2$ – коэффициент охвата для вероятности 0,95.

Расширенная неопределённость измерений, вычисленная по формуле (8), составит: $U = 9,7$ мкм.

Ни одна из входных величин не рассматривается коррелированной с другими величинами в какой-нибудь значительной степени. Все коэффициенты чувствительности при прямых измерениях длины геометрических объектов равны 1.

Бюджет неопределённости измерений при калибровке штангенциркуля ШЦЦ-I-150-0,01 приведен в табл. 2.

Таким образом, существенные вклады в неопределённость измерений при оценке СМС калибровки штангенциркуля вносят дискретность цифрового отсчётного устройства и измерительное усилие.

Полученное значение СМС коррелируется с заявленными СМС аккредитованных КЛ стран Европейского Союза по калибровке штангенциркуля, которые находятся в интервале от 0,01 мм до 0,03 мм.

Приведенный пример оценки СМС свидетельствует о важности такой работы для КЛ.

Таблиця 2

Бюджет неопределённости измерений при калибровке штангенциркуля ШЦЦ-I-150-0,01

Входная величина	Оценка входной величины, мкм	Стандартная неопределённость, мкм	Тип оценивания / закон распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределённости, мкм
I_{IX}	71,5 мм	-	-	-	-
δI_{IX}	5,0	2,9	В / равномерный	1	2,9
Δt	0	0	В / равномерный	1	0
δI_M	6,8	3,9	В / равномерный	1	3,9
δI_S	0,03	0,015	В / равномерный	1	0,015
Выходная величина	Оценка выходной величины, мкм	Суммарная стандартная неопределённость, мкм	Уровень доверия	Коэффициент охвата	Расширенная неопределённость, мкм
E_x	0	4,86	0,95	2	9,7

Таким образом, качество оценки СМС зависит от здравого смысла, критического мышления и профессиональной добросовестности персонала КЛ, принимающего участие в её получении.

Выводы

1. Рассмотрена процедура оценивания наименьшей достигаемой неопределённости измерений

при калибровке цифрового штангенциркуля, определены и оценены источники неопределённости, составлен бюджет неопределённости.

2. Разработка единого нормативно-методического документа по разъяснению оценки неопределённости измерений при калибровке СИТ – залог обеспечения единства измерений в Украине.

Список литературы

1. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.
2. Захаров И.П. Определение измерительных и калибровочных возможностей калибровочной лаборатории в процессе её аккредитации / И.П. Захаров, О.А. Новоселов // Украинский метрологический журнал. – 2017. – № 4. – С. 3-11. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2017.125040>.
3. ILAC-P14:01/2013 ILAC Policy for Uncertainty in Calibration.
4. EA - 4/02. Expression of the uncertainty of measurement in calibration.
5. Національне агентство з акредитації України. Реєстр акредитованих ООВ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://naau.org.ua/reyestr-akreditovanix-ooov/>.
6. Константинова В.Р. Некоторые вопросы по оценке неопределенности в лабораторной практике / В.Р. Константинова // Системи обробки інформації. – 2011. – № 1 (91). – С. 12-15.
7. Хорский Ю. Оценивание неопределенности при аккредитации калибровочных и испытательных лабораторий / Ю. Хорский // Системи обробки інформації. – 2008. – № 4 (71). – С. 15-18.
8. Система управління НААУ. Інструкція “Формування сфери акредитації калібрувальної лабораторії” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://naau.org.ua/wp-content/uploads/2017/08/ІН-08.02.05_red_02_Formuvannya-sfery%60-akredy%60tatsiyi-KL.pdf.
9. ДСТУ ГОСТ 166:2009 Штангенциркули. Технические условия.
10. ДСТУ ГОСТ 9038:2009 Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия.
11. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
12. Водотыка С.В. Учет погрешности квантования при оценивании неопределенности результатов измерений с многократными наблюдениями / С.В. Водотыка, И.П. Захаров // Системи обробки інформації – 2011. – № 8(98). – С. 39-44.
13. Марков Н.Н. Погрешности и выбор средств линейных измерений / Н.Н. Марков, Г.Б. Кайнер, А.В. Сацердотов. – М.: Машиностроение, 1967. – 392 с.

References

1. State Standard of Ukraine (2006), “ISO/IEC 17025:2006 Zagalnyi vymoghy do kompetentnosti vyprobuvalnykh ta kalibrualnykh laboratoriy” [ISO/IEC 17025:2006 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories], Minekonomrozvytku Ukrainy, Kyiv.
2. Zakharov, I.P. and Novoselov, O.A. (2017), “Opredeleniye izmeritel'nykh i kalibrovochnykh vozmozhnostey kalibrovochnoy laboratorii v protsesse yeye akkreditatsii” [Determination of the measuring and calibration capabilities of the calibration laboratory in the process of its accreditation], *Ukrainian metrological journal*, No. 4, pp. 3-11. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2017.125040>.
3. International Laboratory Accreditation Cooperation (2013), ILAC-P14:01/2013: *ILAC Policy for Uncertainty in Calibration*, ILAC, Sydney, Australia.
4. European Accreditation (1999), EA - 4/02: *Expression of the uncertainty of measurement in calibration*, EA, Paris, France.

5. The official site National Accreditation Agency of Ukraine (2018), “*Reiestr akredytovanykh OOV*” [Register of accredited conformity assessment body], available at: <http://naau.org.ua/reiestr-akreditovanix-ooov/> (accessed 08 October 2018).
6. Konstantinova, V.R. (2011), “Nekotoryye voprosy po otsenke neopredelennosti v laboratornoy praktike” [Some questions on uncertainty assessment in laboratory practice], *Information Processing Systems*, No. 1 (91), pp. 12-15.
7. Khorskiy, Y. (2008), “Otsenivaniye neopredelennosti pri akkreditatsii kalibrovchnykh i ispytatel'nykh laboratoriy” [Evaluation of uncertainty in the accreditation of calibration and testing laboratories], *Information Processing Systems*, No. 4(71), pp. 15-18.
8. The official site National Accreditation Agency of Ukraine (2018), “*Dokument Natsyonalnoho ahentstva po akkredytatsyyi Ukrainy*” [Document National Accreditation Agency of Ukraine], available at: https://naau.org.ua/wp-content/uploads/2017/08/IH-08.02.05_red_02_Formuvannya-sfery%60akredy%60tatsiyi-KL.pdf (accessed 26 October 2018).
9. State Standard of Ukraine, (2009), “166:2009 *Shtangentsirkuli. Tekhnicheskkiye usloviya*” [166:2009 Calipers. Technical conditions], Minekonomrozyvtku Ukrainy, Kyiv.
10. State Standard of Ukraine, (2009), “9038:2009 *Mery dliny kontsevyeye ploskoparallel'nyye. Tekhnicheskkiye usloviya*” [9038:2009 Measures of the length of the end plane-parallel. Technical conditions], Minekonomrozyvtku Ukrainy, Kyiv.
11. Novitskiy, P.V. and Zograf, I.A. (1991), “*Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy*” [Estimation of errors in measurement results], Energoatomizdat, Leningrad, Russia.
12. Vodotyka, S.V. and Zakharov, I.P. (2011), “Uchet pogreshnosti kvantovaniya pri otsenivanii neopredelennosti rezul'tatov izmereniy s mnogokratnymi nablyudeniymi” [Accounting for the quantization error when estimating the uncertainty of measurement results with multiple observations], *Information Processing Systems*, No. 8 (98), pp. 39-44.
13. Markov, N.N., Kayner, G.B. and Satserdotov, A.V. (1967), “*Pogreshnosti i vybor sredstv lineynykh izmereniy*” [Errors and choice of means of linear measurements], Mashinostroyeniye, Moscow, Russia.

Поступила в редколлегию 19.10.2018
Одобрена к печати 11.12.2018

Відомості про автора:

Новосолов Олег Анатолійович
провідний інженер
Публічного акціонерного товариства
“АрселорМіттал Кривий Ріг”,
Кривий Ріг, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

Information about the author:

Oleg Novoselov
Leading Engineer of
Public Joint Stock Company
“ArcelorMittal Kryviy Rih”,
Kryvyi Rih, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7353-8408>

**ДО ПИТАННЯ ОЦІНЮВАННЯ КАЛІБРУВАЛЬНИХ ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ АКРЕДИТОВАНОЇ КАЛІБРУВАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ**

О.А. Новосолов

У статті розглянуто питання оцінки найменш досягаємої невизначеності калібрувальної лабораторії, акредитованої на відповідність вимогам стандарту ISO/IEC 17025. Наведено приклад оцінювання найменшої досягаємої невизначеності вимірювань під час калібрування цифрового штангенциркуля, визначені і оцінені джерела невизначеності. Якість оцінки калібрувальних можливостей залежить від здорового глузду, критичного мислення та професійної сумлінності персоналу калібрувальної лабораторії, що приймає участь в їх отриманні.

Ключові слова: калібрувальна лабораторія, акредитація, калібрування засобів вимірювальної техніки, невизначеність вимірювань, калібрувальні та вимірювальні можливості.

**TO THE QUESTION OF ESTIMATION THE CALIBRATION AND MEASUREMENT
CAPABILITIES OF THE ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY**

O. Novoselov

In the article the question of an estimation of the least reached uncertainty of measurements of the calibration laboratory accredited on conformity to requirements of the standard ISO/IEC 17025. Since the uncertainty of measurements is a quantitative measure of measurement accuracy, the evaluation of measurement accuracy is one of the tasks of ensuring their unity. One of the essential criteria characterizing the scope of accreditation of a calibration laboratory accredited by the National Agency for Accreditation of Ukraine for compliance with the requirements of ISO / IEC 17025 is the smallest attainable measurement uncertainty. The analysis of the “scope of accreditation” of calibration laboratories shows that due to the lack of standardized calibration techniques for measuring instruments, the laboratories have to develop the techniques themselves based on their experience and knowledge. This state of affairs in assessing the quality of measurements does not contribute to ensuring their unity. The procedure for estimating the smallest achievable measurement uncertainty in calibrating a digital caliper was considered, sources of uncertainty were identified and evaluated, and an uncertainty budget was drawn up. The quality of the assessment of calibration and measurement capabilities depends on common sense, critical thinking and professional integrity of the personnel of the calibration laboratory involved in obtaining it. The development of a unified regulatory and methodological document to clarify the assessment of measurement uncertainty in the calibration of measuring equipment means the key to ensuring uniformity of measurements in Ukraine.

Keywords: calibration laboratory, accreditation, calibration of measuring equipment, measurement uncertainty, calibration and measurement capability.