



А. А. Данилов
Ю. Г. Тюрина

Федеральное
бюджетное учреждение
«Государственный региональный
центр стандартизации,
метрологии и испытаний»
в Пензенской области»
(ФБУ «Пензенский ЦСМ»),
Россия, г. Пенза
E-mail: aa-dan@mail.ru
gukpcsm@yandex.ru

УДК 006.91.001

ПРИМЕРЫ ОЦЕНКИ КАЛИБРОВОЧНЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КАЛИБРОВОЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

EXAMPLES OF ASSESSMENT OF CALIBRATION AND MEASUREMENT CAPABILITIES OF CALIBRATION LABORATORY

Рассмотрены способы оценки наименьшей достигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке средств измерений, основанные на применении в качестве эталонов как калиброванных, так и поверенных средств измерений. Приведены примеры оценки калибровочных и измерительных возможностей калибровочной лаборатории при калибровке омметра, вольтметра переменного напряжения и гирь. Рекомендации, приведенные в статье, могут быть использованы калибровочными лабораториями при формировании области аккредитации.

Ключевые слова: калибровка, калибровочные и измерительные возможности, калибровочные лаборатории, неопределенность измерений, средства измерений, эталоны

The ways of assessment of minimum obtained expanded uncertainty of measurements at calibration of measuring instruments based on application of as calibrated so verified measuring instruments as measurement standards were considered. Examples of assessment of calibration and measuring capabilities of calibration laboratory at calibration of an ohmmeter, a voltmeter of alternating voltage and weights are given. The provided recommendations can be used by calibration laboratories when forming area of accreditation.

Keywords: calibration, calibration and measurement capabilities, calibration laboratories, measurement uncertainty, measuring instruments, measurement standards.

При формировании области аккредитации перед калибровочной лабораторией встает задача оценки наименьшей достигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке средств измерений, т. е. оценки так называемых калибровочных и измерительных возможностей – Calibration and Measurement Capabilities (СМС).

Цель настоящей статьи – дать некоторые рекомендации по оценке СМС, которые могут быть использованы калибровочными лабораториями при формировании области аккредитации.

Напомним, что в соответствии с политикой ИЛАК [1]: «5.2 Не должно быть никакой двусмысленности при выражении СМС, представленных в области аккредитации и, следовательно, в отношении наименьшей неопределенности измерения, которую, как ожидается, может достичь лаборатория при выполнении калибровки или измерения...»

5.3 Неопределенность, перекрываемая СМС, должна быть выражена в виде расширенной неопределенности, имеющей установленную вероятность охвата, равную примерно 95%...

5.4. ... При формулировании СМС лаборатории должны уделять внимание характеристикам «наилучшего существующего средства измерений», которое имеется для определенной категории калибровок...

Признано, что для некоторых калибровок «наилучшее существующее средство измерений» не существует и/или вклады в неопределенность, связанные со средством измерений, значительно влияют на неопределенность. Если такие вклады в неопределенность, связанные со средством измерений, могут быть отделены от других вкладов, то вклады от средства измерений могут быть исключены из указываемых в СМС неопределенностей...».

Для оценки СМС нужно сделать некоторые предположения.

Предположение 1. Логично предположить, что калибруемое «наилучшее существующее средство измерений» идеально, а потому все вклады, связанные с неопределенностью калибруемого средства измерений, принимаются равными нулю [2].

При принятом предположении наибольший вклад в СМС будет вносить неопределенность измерений, обусловленная эталонами, применяемыми при калибровке средств измерений, которая была бы априорно известна, если бы эталоны были калиброваны, а в сертификатах калибровки были приведены расширенная неопределенность и коэффициент охвата.

Однако пока приходится мириться с тем фактом, что эталоны, применяемые при калибровке средств измерений, не калиброваны, а поверены. Принимая этот факт, как данность, составляющую неопределенности измерений, обусловленную эталоном, приходится оценивать самостоятельно, как составляющую по типу В.

Предположение 2. Поскольку сведения о распределении вероятностей погрешности эталона обычно отсутствуют, логично предположить, что значения погрешности равновероятны внутри границ интервала, ограниченного пределами допускаемой погрешности $\pm\Delta$. При этом стандартную неопределенность измерений, обусловленную эталоном, можно было бы оценить по формуле [3]:

$$u_s \leq \Delta/\sqrt{3},$$

где u_s – стандартная неопределенность измерений, обусловленная эталоном;

Δ – предел допускаемой погрешности эталона.

Следует отметить, что при использовании $u_s = \Delta/\sqrt{3}$ будет получена оценка «сверху» стандартной неопределенности измерений, обусловленной эталоном, использование которой позволит получить оценку «сверху» СМС калибровочной лаборатории. Следует также отметить, что фактически СМС калибровочной лаборатории могут быть существенно лучше, но в том случае, если эталон будет калиброван, а не поверен (пояснения будут приведены ниже).

Разумеется, кроме предположения о равномерной функции плотности распределения вероятностей погрешности эталона можно было бы выдвинуть и другие предположения, например, о нормальной функции плотности распределения вероятностей погрешности эталона, что привело бы к оценке стандартной неопределенности измерений, обусловленной эталоном, от $\Delta/3$ до $\Delta/2$ (в случае равенства нулю математического ожидания) [4].

Приведем обещанные пояснения с помощью рис..

В случае поверенного эталона, пригодного к применению,

его погрешность ε находится внутри интервала, ограниченного пределами допускаемой погрешности $\pm\Delta$ и может быть распределена (в зависимости от принятого предположения, желательно обоснованного) с равномерной $f_1(\varepsilon)$ или нормальной $f_2(\varepsilon)$ функциями плотности распределения вероятностей. Если тот же экземпляр эталона будет калиброван, весьма вероятно, что центр распределения Δ_s будет смещен относительно нуля (вправо или влево), а поскольку эталон пригоден к применению, то ширина распределения $f_3(\varepsilon)$ (предположительно нормального) уменьшится. При этом оценка стандартной неопределенности калиброванного эталона будет меньше, чем поверенного, а для его применения целесообразно внести поправку на систематические эффекты к значению величины, воспроизводимой эталоном, полученную при проведении его калибровки.

Наконец, возможен и «пионерский» вариант оценивания стандартной неопределенности измерений, обусловленной эталоном – оценить ее также самостоятельно, но исходя из сведений, приведенных в протоколе поверки эталона, например, сведений об эталонах, использованных при его поверке, условиях поверки и других сведений.

После длинного предисловия воспользуемся результатами статьи [2], в которой выводятся формулы для оценки «сверху» СМС калибровочной лаборатории для типовых способов калибровки мер и измерительных приборов и перейдем к рассмотрению примеров оценки СМС калибровочной лаборатории.

Пример 1. Калибровка омметра с помощью многозначной меры электрического сопротивления.

Значение систематической погрешности ε калибруемого омметра в точке его диапазона измерений, в которой проводится калибровка, определяется с помощью формулы:

$$\varepsilon = (X_C + \Delta_C) - (X_s + \Delta_s),$$

где X_C – показания калибруемого омметра,

Δ_C – поправка к показаниям калибруемого омметра,

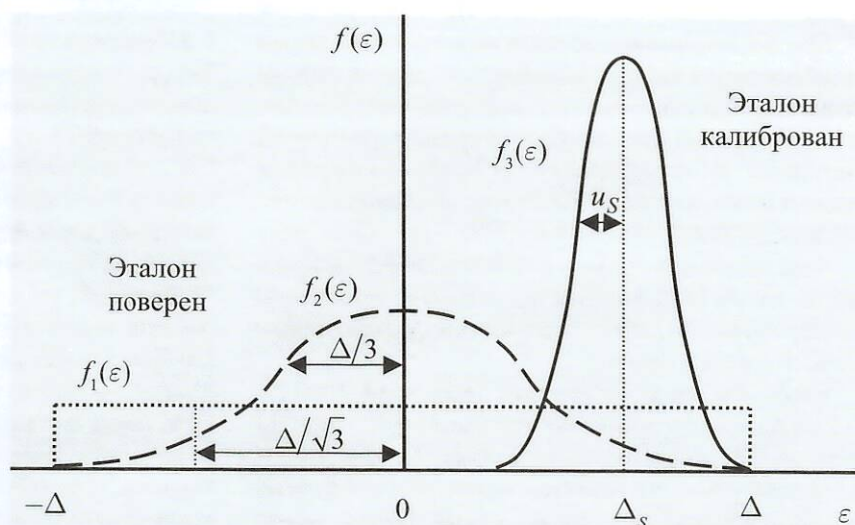


Рис. Оценки стандартной неопределенности измерений, обусловленной эталоном (поверенным и калиброванным)



X_s – значение величины, воспроизводимой многозначной мерой,

Δ_s – поправка к значению величины, воспроизводимой многозначной мерой, связанная как с отклонениями условий эксплуатации, в которых проводится калибровка калибруемого прибора, от условий эксплуатации, в которых проводилась калибровка эталонной меры, так и с дрейфом значения, воспроизводимого эталонной мерой, за время, прошедшее с момента ее калибровки и др.

Учитывая, что при калибровке измерительного прибора проводятся многократные прямые измерения величины, воспроизводимой эталонной мерой, суммарная стандартная неопределенность измерений при калибровке, может быть вычислена по формуле [2, 5]:

$$u_c(y) = \sqrt{[u_A(\bar{x}_c) + u_B(\Delta_c)]^2 + [u_B(x_s) + u_B(\Delta_s)]^2},$$

где $u_A(\bar{x}_c)$ – стандартная неопределенность, связанная с наблюдаемой изменчивостью показаний калибруемого омметра, оцениваемая по типу А при выполнении многократных измерений;

$u_B(\Delta_c)$ – стандартная неопределенность поправки к показаниям калибруемого омметра, оцениваемая по типу В;

$u_B(x_s)$ – стандартная неопределенность эталонной меры, оцениваемая по типу В;

$u_B(\Delta_s)$ – стандартная неопределенность поправки эталонной меры, оцениваемая по типу В.

С учетом предположения 1 все вклады, связанные с неопределенностью калибруемого средства измерений, принимаются равными нулю [2].

Кроме того, для того, чтобы можно было пренебречь вкладом неопределенности, связанной с наблюдаемой изменчивостью показаний калибруемого омметра, оцениваемой по типу А, сделаем предположение 3 о том, что было выполнено достаточное количество многократных измерений, например, не менее 10.

Тогда минимальное значение суммарной стандартной неопределенности измерений при калибровке может быть вычислено по формуле:

$$u_{c\min}(y) = \sqrt{u_B^2(x_s) + u_B^2(\Delta_s)}.$$

С учетом предположения 2 оценка «сверху» минимального значения суммарной стандартной неопределенности измерений при калибровке может быть вычислена по формуле:

$$u_{c\min}(y) \leq \Delta / \sqrt{3}.$$

При этом наименьшая достигаемая расширенная неопределенность измерений при калибровке может быть оценена по формуле:

$$U_{\min} = k \times u_{c\min}(y),$$

где k – коэффициент охвата.

С учетом предположения 3 можно принять коэффициент охвата $k=2$ при вероятности, равной 0,95 [4].

Учитывая, что СМС калибровочной лаборатории в области аккредитации указываются при вероятности, равной 0,95, а потому оценка «сверху» наименьшей до-

стигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке может быть вычислена по формуле:

$$U_{\min} \leq \frac{2 \cdot \Delta}{\sqrt{3}} \approx 1,15 \cdot \Delta.$$

Получив формулу для оценки «сверху» наименьшей достигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке, возникает новая задача: как ее указать в области аккредитации в рассматриваемом случае, когда измеряемая величина представлена в виде диапазона значений?

Политика ИЛАК [1] дает следующие рекомендации: «5.2... Особое внимание нужно уделить случаю, когда измеряемая величина представлена в виде диапазона значений. В этом случае неопределенность, как правило, выражается одним или более из следующих способов:

- а) единственное значение, которое достоверно во всем диапазоне измерения;
- б) диапазон, в этом случае калибровочная лаборатория должна разработать соответствующий способ выполнения интерполирования с целью получения неопределенности промежуточных значений;
- в) функция в явном виде, определяющая зависимость значений неопределенности от измеряемой величины или параметра;
- г) матрица, в которой значения неопределенности зависят от значений измеряемой величины и дополнительных параметров;
- д) графическая форма, обеспечивающая соответствующее разрешение по каждой из осей для получения, как минимум, двух значащих цифр для неопределенности.

При указании неопределенности не допускаются открытые интервалы (например, « $U < x$ »).

Указывать расширенную неопределенность в виде единственного значения, как рекомендуется в подпункте а), не совсем приемлемо, т. к. придется указать максимальное значение расширенной неопределенности, соответствующее, скорее всего, конечной точке диапазона измерений, а применять придется это же значение в том числе и в начале диапазона измерений.

Указывать расширенную неопределенность в виде диапазона, как рекомендуется в подпункте б), требует разработки способа интерполирования, который придется еще и обосновать.

Указывать расширенную неопределенность в графической форме, как рекомендуется в подпункте д), мягко говоря, не совсем удобно (точнее, совсем не удобно).

По отмеченным выше причинам способы, рекомендованные в пункте 5.2 а), б), д) политики ИЛАК [1], на практике редко применимы.

Указывать расширенную неопределенность матрицей, как рекомендуется в подпункте г), удобно, например, гирь (см. пример 3).

В рассматриваемом же случае калибровки омметра наиболее удобно указать расширенную неопределенность формулой.

Предположим, что в диапазоне измерений от 1 до 200 Ом пределы допускаемой основной погрешности многозначной меры электрического со-

Тип калибратора	Диапазон измерений, В	Диапазон частот, кГц	Δ , мкВ	U_{min} , мкВ
Fluke 5700A	0,2–22	0,01–0,02	$\pm (240 \times 10^{-6} \times U + 400)$	$280 \times 10^{-6} \times U + 460$
		0,02–0,04	$\pm (90 \times 10^{-6} \times U + 150)$	$104 \times 10^{-6} \times U + 173$
		0,04–20	$\pm (45 \times 10^{-6} \times U + 50)$	$52 \times 10^{-6} \times U + 58$
		20–50	$\pm (75 \times 10^{-6} \times U + 100)$	$86 \times 10^{-6} \times U + 115$
		50–100	$\pm (100 \times 10^{-6} \times U + 200)$	$115 \times 10^{-6} \times U + 230$
		100–300	$\pm (275 \times 10^{-6} \times U + 600)$	$317 \times 10^{-6} \times U + 690$
		300–500	$\pm (1000 \times 10^{-6} \times U + 2000)$	$1150 \times 10^{-6} \times U + 2300$
		500–1000	$\pm (1500 \times 10^{-6} \times U + 3200)$	$1725 \times 10^{-6} \times U + 3680$
H4-12	0,2–20	0,1–20	$\pm (27 \times 10^{-6} \times U + 60)$	$31 \times 10^{-6} \times U + 69$
		20–50	$\pm (75 \times 10^{-6} \times U + 100)$	$86 \times 10^{-6} \times U + 115$
		50–100	$\pm (90 \times 10^{-6} \times U + 200)$	$104 \times 10^{-6} \times U + 230$
		100–300	$\pm (300 \times 10^{-6} \times U + 600)$	$345 \times 10^{-6} \times U + 690$
		300–500	$\pm (900 \times 10^{-6} \times U + 2000)$	$1035 \times 10^{-6} \times U + 2300$
		500–1000	$\pm (1500 \times 10^{-6} \times U + 6000)$	$1725 \times 10^{-6} \times U + 6900$

противления М630А составляют $\pm(0,002\%+2)$ кОм, что соответствует пределам допускаемой абсолютной погрешности многозначной меры электрического сопротивления $\pm(2 \times 10^{-5} \times R + 2 \times 10^{-3})$ Ом.

Подставляя значение $\Delta = (2 \times 10^{-5} \times R + 2 \times 10^{-3})$ Ом, в формулу для оценки «сверху» наименьшей достигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке в итоге получим:

$$U_{min} \leq 1,15 \times (2 \times 10^{-5} \times R + 2 \times 10^{-3}) = (2,3 \times 10^{-5} \times R + 2,3 \times 10^{-3}) \text{ Ом.}$$

Именно эту формулу и нужно будет указать в графе «Неопределенность» области аккредитации калибровочной лаборатории (см. таблицу 3).

Пример 2. Калибровка вольтметров переменного тока с помощью калибраторов электрического напряжения переменного тока.

Формула для оценки «сверху» наименьшей достигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке в этом примере та же, что и в первом. Сложность здесь заключается в другом – в разбиении диапазона измерений на поддиапазоны по напряжению и частоте при наличии в распоряжении калибровочной лаборатории нескольких калибраторов.

Предположим, что в распоряжении калибровочной лаборатории имеются калибраторы Fluke 5700A и H4-12, пределы допускаемой погрешности которых в режиме воспроизведения электрического напряжения переменного тока для одного диапазона измерений приведены в таблице 1. В последней графе таблицы 1 приведены и оценки «сверху» наименьшей достигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке вольтметров переменного тока.

Наилучшие значения оценки «сверху» наименьшей достигаемой расширенной неопределенности измерений при калибровке вольтметров переменного тока для заполнения графы «Неопределенность» области аккредитации выделены цветом для соответствующих диапазонов измерений электрического напряжения переменного тока и диапазонов частот.

Приводимые примеры оценки СМС были бы неполными, если не рассмотреть пример использования не поверенных, а калиброванных эталонов.

Пример 3. Калибровка гирь

При калибровке гирь в соответствии с приложением С ГОСТ OIML R 111-1 [6] оценку суммарной стандартной неопределенности условной массы гири $u_c(m_{cl})$ находят по формуле С6.5-1:

$$u_c(m_{cl}) = \sqrt{u_w^2(\Delta m_c) + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2},$$

где $u_w(\Delta m_c)$ – стандартная неопределенность процесса взвешивания;

$u(m_{cr})$ – неопределенность эталонной гири;

u_b – неопределенность поправки на выталкивающую силу воздуха;

u_{ba} – неопределенность компаратора.

При оценивании СМС процесс взвешивания должен быть реализован с особой тщательностью в условиях повторяемости, повторяя измерения многократно (более 10 раз), с тем, чтобы можно было минимизировать оценку стандартной неопределенности процесса взвешивания (и даже пренебречь ей!).

Неопределенность эталонной гири целесообразно оценивать, исходя из сведений, приведенных в сертификате калибровки. В качестве альтернативного варианта

Таблица 2

Номинальное значение массы гири, г	$\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \Delta$, мг	u_s , мг	$d/\sqrt{6}$, мг	U_{min} , мг
1	0,005	0,002	0,0004	0,005
2	0,0067	0,002	0,0004	0,007
5	0,0083	0,002	0,0004	0,008
10	0,01	0,002	0,0004	0,010
20	0,013	0,002	0,0004	0,013
50	0,017	0,02	0,004	0,027
100	0,027	0,02	0,004	0,034
200	0,05	0,02	0,004	0,054
500	0,13	0,02	0,004	0,13



Таблица 3

(исключительно для примера) можно использовать оценку «сверху» в соответствии с формулой 5.2-1, т.е.

$$u(m_n) \leq \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \Delta,$$

где Δ – пределы допускаемой абсолютной погрешности гирь в мг (из табл. 1 ГОСТ OIML R 111-1 [6])

При оценке значимости неопределенности поправки на выталкивающую силу воздуха, которая вычисляется по формуле С6.3-1 ГОСТ OIML R 111-1 [6], она может быть принята пренебрежимо малой (для гирь класса F_1 и ниже) в том случае, если обеспечить близкие значения плотности влажного воздуха во время текущей и предыдущей калибровок.

Минимальное значение стандартной неопределенности компаратора может быть оценено первыми двумя слагаемыми формулы С6.4-5 ГОСТ OIML R 111-1 [6]:

$$u_{ba} = \sqrt{u_s^2 + u_d^2},$$

где u_s – среднее квадратическое отклонение компаратора;

u_d – неопределенность, обусловленная разрешением компаратора,

$$u_d = \frac{d/2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = d/\sqrt{6}.$$

Пример расчета СМС калибровки гирь от 1 до 500 г при использовании гирь класса E_2 , компараторов СС21 и СС500 и при условии, что коэффициент охвата $k=2$ при вероятности, равной 0,95, приведен в таблице 2.

№ п/п	Измерения, тип (группа) средств измерений	Метрологические требования		Примечание
		диапазон измерений	неопределенность (погрешность, класс, разряд)	
1	Измерения электротехнических и магнитных величин, Омметры	От 1 до 200 Ом	$2 \times 10^{-5} \times R + 2 \times 10^{-3}$ Ом	
2	Измерения электротехнических и магнитных величин, Вольтметры	От 0,2 до 20 В в диапазонах частот:		
		От 10 до 20 Гц	$280 \times 10^{-6} \times U + 460$	
		От 20 до 40 Гц	$104 \times 10^{-6} \times U + 173$	
		От 40 до 100 Гц	$52 \times 10^{-6} \times U + 58$	
		От 0,1 до 20 кГц	$31 \times 10^{-6} \times U + 69$	
		От 20 до 50 кГц	$86 \times 10^{-6} \times U + 115$	
		От 50 до 100 кГц	$104 \times 10^{-6} \times U + 230$	
		От 100 до 300 кГц	$317 \times 10^{-6} \times U + 690$	
		От 300 до 500 кГц	$1035 \times 10^{-6} \times U + 2300$	
		От 500 до 1000 кГц	$1725 \times 10^{-6} \times U + 3680$	
3	Измерения механических величин, Гири	1 г	0,005 мг	
		2 г	0,007 мг	
		5 г	0,008 мг	
		10 г	0,010 мг	
		20 г	0,013 мг	
		50 г	0,027 мг	
		100 г	0,034 мг	
		200 г	0,054 мг	
		500 г	0,13 мг	

Пример заполнения области аккредитации калибровочной лаборатории, основанный на результатах расчетов (примеры 1–3), приведен в таблице 3.

Авторы надеются, что приведенные рекомендации помогут сотрудникам калибровочных лабораторий оценить калибровочные и измерительные возможности при формировании области аккредитации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р 50.1.109-2016 Политика ИЛАК в отношении неопределенности при калибровках
2. Данилов А. А., Пименова Е. Ю., Тюрина Ю. Г. Практические вопросы формирования области аккредитации калибровочной лаборатории. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2017, № 8.
3. OIML G 19:2017 (E) The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology
4. COOMET R/GM/32:2017 Рекомендация KOOMET. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности
5. Захаров И. П., Водотыка С. В., Шевченко Е. Н. Методы, модели и бюджеты оценивания неопределенности измерений при проведении калибровок. – Измерительная техника, 2011, № 4. – С. 20–26.
6. ГОСТ OIML R 111-1-2009 ГСИ. Гири классов E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} и M_3 . Часть 1. Метрологические и технические требования.

Дата принятия 20.08.2017