

# Калибровка и поверка. Две процедуры с сопоставимыми целями и результатами

*Авторы: Соммер Клаус-Дитер, Сэмюэл Э. Чаннелл, Манфред Кохшиек.*

Двумя наиболее важными процедурами, призванными обеспечить необходимый уровень достоверности показаний средств измерений, являются:

- в промышленной метрологии: периодические калибровки средств измерений, выполняемые в соответствии с требованиями принятой системы управления качеством:

- в законодательной метрологии: периодические поверки и испытания с целью оценки соответствия средства измерения требованиям нормативных документов. Обе процедуры тесно взаимосвязаны и основаны на использовании общих методов измерения. В то же время так исторически сложилось, что к ним применимы разные правила, методики и метрологическая инфраструктура.

В настоящей статье рассматриваются различия, особенности и взаимосвязь калибровки и поверки. В частности, законодательно устанавливаемых пределов погрешности и неопределенности, а также роль неопределенности при поверке средств измерений.

## Введение

Правильность показаний средств измерений и, как следствие, получаемых результатов измерений является одной из основных предпосылок для обеспечения качества и количества продукции и услуг. При этом класс точности средств измерений должен соответствовать области их применения.

Согласно требованиям стандартов семейства ISO 9000 и стандарта ISO 17025, прослеживаемость измерительного и испытательного оборудования к единицам измерений SI должна обеспечиваться посредством неразрывной цепочки сличений результатов измерений, что позволяет сделать заключение о метрологических характеристиках оборудования. Наиболее важными процедурами, с точки зрения обеспечения правильности получаемых результатов измерений, являются:

- в промышленной метрологии: периодические калибровки средств измерений, выполняемые в соответствии с требованиями принятой системы управления качеством;

- в законодательной метрологии: периодические поверки и испытания с целью оценки соответствия средства измерений требованиям нормативных документов. Обе процедуры тесно взаимосвязаны и основаны на использовании общих методов измерений. Поверка стала основополагающей частью системы метрологического обеспечения, в то время как калибровка широко используется в рамках промышленной метрологии с целью обеспечения качества. Органы по аккредитации отдают предпочтение калибровке, рассматривая ее как необходимую процедуру, позволяющую убедиться в правильности показаний средства измерений.

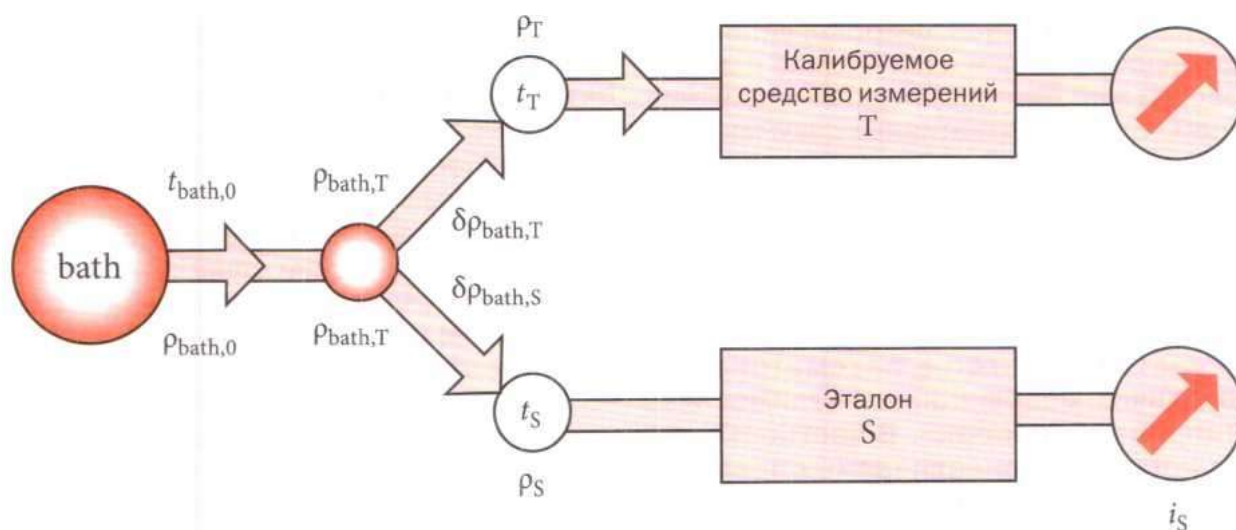
Вследствие этого сложилась ситуация недопонимания идентичности метрологической природы двух данных процедур. В частности, нет четкого представления о взаимозависимости понятий «неопределенность» и «предел погрешности». Например, при использовании подлежащих обязательной поверке средств измерений в рамках системы управления качеством могут возникать проблемы, связанные с тем, что в документации на такие средства измерений зачастую указываются только значения наибольшей допускаемой погрешности (МРЕ) и нет четких данных по значениям неопределенности.

## Калибровка

Калибровка средства измерений обычно производится с целью получения числовых данных, характеризующих правильность получаемых при его использовании результатов измерений. Из соображений экономии калибровочные лаборатории заинтересованы

в максимально широком признании результатов проводимых ими калибровок и измерений, которое обеспечивается посредством прослеживаемости и предоставления данных о значениях неопределенности результатов измерений.

Согласно VIM, калибровка может быть определена как «набор операций, устанавливающих при заданных условиях зависимость между значениями показаний средств или систем измерений, или значениями материальных мер или стандартных образцов и соответствующими значениями величин эталонов. Иными словами калибровка показывает, как номинальное значение материальной меры или показания инструмента соотносится с принятым действительным значением измеряемой величины. Принятое действительное значение может быть определено с помощью прослеживаемого исходного эталона. Исходя из данного определения, калибровка не обязательно предполагает выполнение каких-либо регулировок или технического обслуживания средства измерений.



**Рис. 1. Пример калибровки, выполняемой методом сличения показаний калибруемого и эталонного средств измерений (измерение плотности жидкости):**

*bath* – ванна с жидкостью (без термостата);

$t_{bath,0}$  – температура жидкости в ванне;

$\rho_{bath,0}$  – плотность жидкости в ванне;

$\delta_{t_{bath,T}}$ ,  $\delta_{t_{bath,S}}$  – неизвестное отклонение температур жидкости на входе калибруемого и эталонного приборов;

$\delta\rho_{bath,T}$ ,  $\delta\rho_{bath,S}$  – неизвестное отклонение значений плотности жидкости на входе калибруемого и эталонного приборов;

$t_T$ ,  $t_S$  – оценка значения температуры жидкости калибруемым и эталонным прибором;

$\rho_T$ ,  $\rho_S$  – оценка плотности жидкости калибруемым и эталонным приборами;

$i_T$ ,  $i_S$  – показания калибруемого и эталонного приборов.

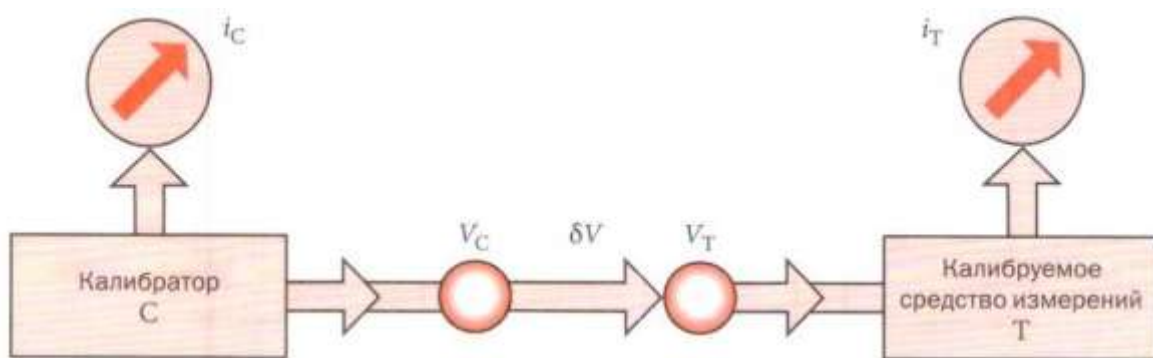


Рис. 2. Пример калибровки, выполняемой методом сличения показаний калибруемого вольтметра с величиной напряжения, задаваемого калибратором:

$V_C$  – напряжение на выходе калибратора;

$V_T$  – напряжение на входе калибруемого средства измерений;

$\delta V$  – неизвестное отклонение напряжения на входе калибруемого средства измерений от напряжения на выходе калибратора, обусловленное несовершенством метода измерений при калибровке;

$i_C, i_T$  – показания эталонного и калибруемого приборов.

На рисунках 1 и 2 показаны примеры калибровки с использованием метода сличения, т. е. посредством сравнения показаний проходящего испытания средства измерений и соответствующих показаний эталона.

В сертификатах калибровки средств измерений указываются отклонения результатов измерений или соответствующие поправки, а также значения неопределенности. Только в этом сочетании данные параметры могут использоваться для оценки связи результата измерений с соответствующей единицей измерений (SI). Представленная на рисунке 3 схема иллюстрирует общепринятое понятие результата калибровки.

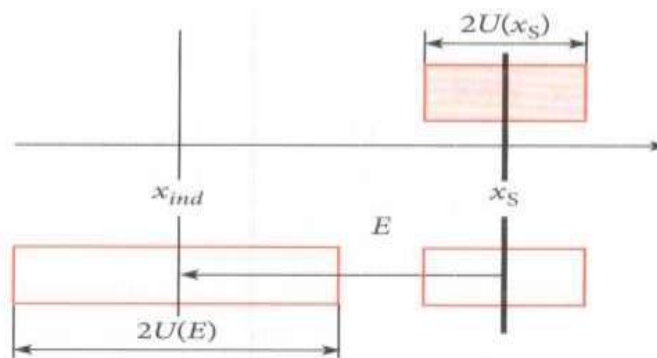


Рис. 3. Значение (отдельного) результата калибровки. Типовое представление:  
 $x_{ind}$  – показание калибруемого средства измерений;  
 $x_s$  – принятое действительное (истинное) значение измеряемой величины;  
 $E$  – оценка значения отклонения  $x_{ind}$  от  $x_s$ ;  
 $E(E) = x_{ind} - x_s$ ;  
 $U$  – расширенная неопределенность, ассоциированная с величиной  $x_s$   
 $u(E) = \sqrt{u^2(x_{ind}) + u^2(x_s)}$ ,  $U(E) = ku(E)$ ;  
 $u(x_{ind})$  – стандартная неопределенность, ассоциированная с величиной  $x_{ind}$ ;  
 $u(x_s)$  – стандартная неопределенность, ассоциированная с величиной  $x_s$ .

Неопределенность, ассоциированная с результатом измерения, является параметром, характеризующим (возможную) дисперсию полученных значений измеряемой величины. Иными словами неопределенность есть мера неполноты знаний об измеряемой величине. Она определяется в соответствии с едиными установленными правилами и, как правило, для 95% вероятности охвата. Данная величина, так же как и полученное значение погрешности измерения, применима при калибровке, проводимой в соответствующих условиях окружающей среды.

Если недавно откалиброванное средство измерений используется в условиях окружающей среды, аналогичных тем, при которых оно было откалибровано, то подлежащая измерению величина  $Y$  в краткой форме может быть выражена:

$$Y = X_s + \delta X \quad (1)$$

где  $X_s$  есть откорректированное с учетом поправки показание откалиброванного средства измерений.  $\delta X$  учитывает другие возможные (неизвестные) отклонения полученных результатов, обусловленные несовершенством метода измерений. При использовании откалиброванного средства измерений ассоциированная с методом измерений стандартная неопределенность может быть выражена:

$$u^2(y) = u^2(x_s) + u_2(\delta x) \quad (2)$$

Это означает, что неопределенность калибровки  $u(x_s)$  недавно откалиброванного средства измерений будет независимой составляющей суммарной (общей) неопределенности измерения  $u(y)$ .

Если недавно прошедшее калибровку средство измерений чувствительно к изменению окружающей среды и используется в условиях, отличных от тех, при которых оно проходило калибровку, то определенное калибровочной лабораторией значение неопределенности, скорее всего, будет превышено. Проблема также может возникнуть в случае изменения метрологических характеристик, связанного с длительной эксплуатацией средства измерений.

Указанное в сертификате значение неопределенности считается прослеживаемым к национальным эталонам только в том случае, если данный сертификат выдан лабораторией, чья компетентность неоднократно подтверждена и не подвергается сомнению. В иных случаях, даже если в сертификате калибровки имеется указание на наличие связи с национальными эталонами, клиенту следует убедиться в такой связи посредством соответствующей цепочкой прослеживаемости.

Иногда сертификаты калибровки могут включать декларацию о соответствии средства измерений установленным требованиям и регламентам. В этом случае, согласно документу ЕА-3/02, результаты измерений, с учетом ассоциированной с ними неопределенности, не должны превышать установленных пределов. Данный случай представлен на Рисунке 4.

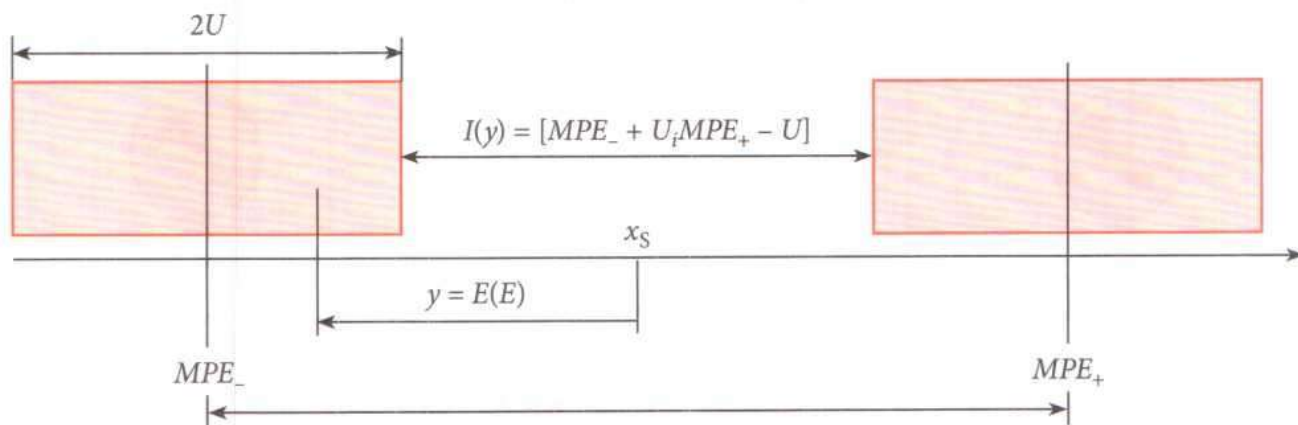


Рис. 4. Взаимосвязь максимальной допустимой погрешности поверки и неопределенности измерения в рамках оценки соответствия при калибровке и испытаниях рабочих эталонов:  
 $x_S$  – принятое действительное (истинное) значение измеряемой величины;  
 $y$  – наилучшая оценка значения отклонения  $E$  результата измерения от принятого действительного значения;  
 $MPE_-$  – наименьшее значение допустимой погрешности измерений при поверке;  
 $MPE_+$  – наибольшее значение допустимой погрешности измерений при поверке;  
 $I(y)$  – интервал, внутри которого, при отклонении  $y$ , результат поверки признается положительным.

## Поверка и пределы погрешности в законодательной метрологии.

### Поверка

Поверка, проводимая с целью подтверждения соответствия средства измерений, является процедурой, подпадающей под действие государственного метрологического контроля, в рамках которого отдельные категории средств измерений сначала проходят процедуру оценки и утверждения типа. На Рисунке 5 показана последовательность испытаний, проводимых в течение «жизни» подлежащего метрологическому контролю средства измерений.

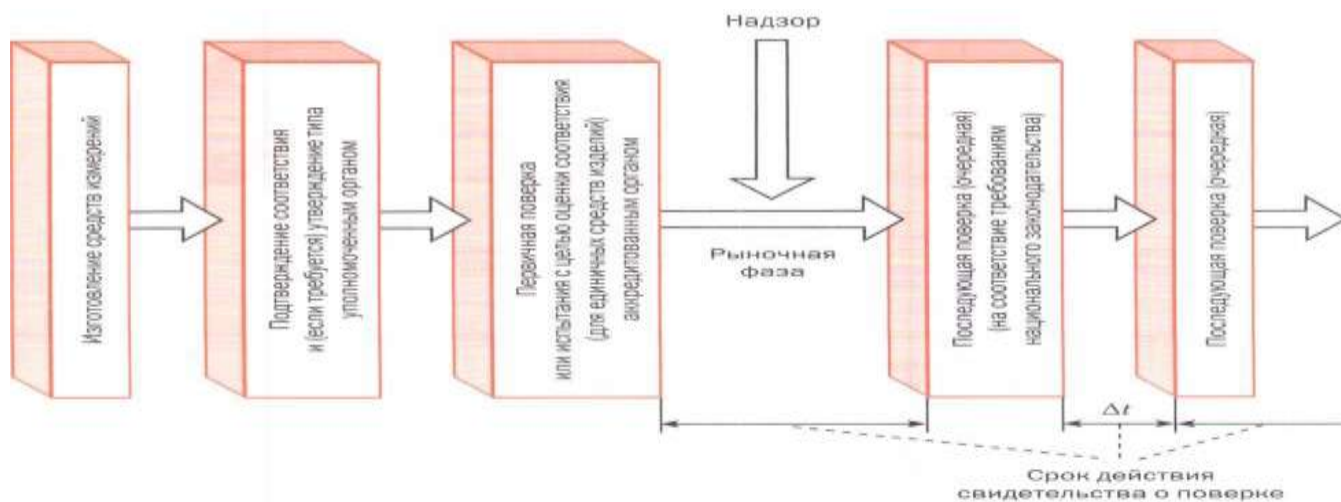


Рис. 5. Типичная последовательность испытаний (проверок) средств измерений, подлежащих метрологическому контролю



Требования, предъявляемые к средству измерений при проведении оценки с целью утверждения типа обычно более строгие по сравнению с поверкой. В частности, проводится оценка метрологических характеристик средства измерения, находящегося под воздействием внешних влияющих факторов, а именно устанавливается, отвечает ли оно требованиям по заданным значениям предела погрешности в заданных или прогнозируемых условиях окружающей среды.

Основными элементами поверки являются:

- проверка технического состояния (качественная) средства измерений;
- проверка метрологических характеристик (количественная) средства измерений.

Целью количественных метрологических испытаний является определение погрешности, учитывающей неопределенность, средства измерений с помощью эталонных мер. Данные испытания проводятся с использованием отработанных, проверенных методик.

Исходя из определения, приведенного в разделе 1, количественные метрологические испытания могут считаться калибровкой средства измерений. Из этого следует, что процедура оценки метрологических характеристик средства измерений одновременно включает как поверку, так и калибровку, с использованием одного и того же оборудования (показано на Рисунках 1 и 2).

Результаты испытаний, проводимых в рамках поверки, оцениваются с целью определения, отвечает ли средство измерений установленным законом требованиям. Если средство измерений признается соответствующим указанным требованиям, то на него наносится соответствующее поверочное клеймо и выдается сертификат поверки (показаны на Рисунке 6).





Рис.6. Элементы процедуры поверки

Исходя из данных определений и толкований, можно сравнить основные цели и методы проведения поверки и калибровки (см. Таблицу 1).

### Калибровка

Определение соответствия между измеренной величиной и соответствующей величиной, воспроизводимой эталоном:

- при заданных условиях окружающей среды;
- в определенный день и время.

Определение (декларирование) значений отклонений или поправок и неопределенности измерений, выполненных при калибровке

Оформление сертификата калибровки

### Поверка

Проверка соответствия средств измерений законодательно установленным требованиям:

- проверка (оценка) технических характеристик средства измерений;
- оценка соответствия требованиям к предельно допустимой погрешности (МРЕ).

Маркировка поверенного средства измерений, подтверждающая соответствие средства измерений установленным требованиям (нанесение знака поверки)

Оформление свидетельства о поверке

## **Пределы допускаемой погрешности при поверке и в ходе эксплуатации средства измерений**

В большинстве стран, имеющих сложившуюся систему метрологического контроля, используется два вида пределов погрешности:

- наибольшая допускаемая погрешность (МРЕ) при поверке средства измерений:

- наибольшая допускаемая погрешность (МРЕ) при эксплуатации средства измерений.

Значение последней обычно в два раза превышает значение первой. Значение МРЕ при поверке равно значению «МРЕ при испытаниях», проводимых в рамках поверки. Для пользователя средства измерений значение «МРЕ при эксплуатации» являются метрологически значимым параметром.

Величина допускаемого предела погрешности обусловлена областью применения средства измерений и определяется при помощи самых совершенных из существующих измерительных технологий.

### **Взаимосвязь между законодательно установленными пределами погрешности и неопределенностью**

При испытаниях средства измерений, проводимых с целью определения соответствия установленным требованиям или заданным значениям пределов погрешности, полученные результаты измерений сравниваются с результатами эталонного средств измерений или значениями материальных эталонов. Неопределенность измерений, обусловленная методом измерений, неизбежно приводит к неопределенности оценки соответствия. Рисунок 7 (взят из стандарта ISO 14253-1) наглядно иллюстрирует данную проблему: между зонами соответствия и несоответствия (верхняя и нижняя зоны) существует зона неопределенности, длиной приблизительно равной двойному значению неопределенности измерения при 95% уровне вероятности. Неопределенность включает в себя такие

составляющие, как инструментальная неопределенность используемого эталона и испытываемого средства измерений, а также неопределенность, обусловленную методом измерений и ограниченностью знаний об условиях окружающей среды. С учетом неопределенности, отклонения полученных результатов измерений, попадающие в зоны неопределенности, не позволяют сделать однозначный вывод о соответствии или несоответствии заданным значениям пределов погрешности.



Рис. 7. Технические требования и неопределенность измерений (согласно ISO 14253-1)

### Связь между пределом погрешности и неопределенностью при поверке

На практике средства измерений считаются соответствующими законодательно установленным требованиям по значениям погрешности если:

- абсолютная величина отклонений результатов измерений меньше или равна абсолютной величине законодательно установленных значений  $MPE$  при поверке, проводимой в заданных условиях окружающей среды;

- расширенная неопределенность измерений, полученная в ходе предыдущих метрологических испытаний, при 95% вероятности охвата будет небольшой по сравнению с законодательно установленными пределами погрешности.

Расширенная неопределенность  $U_{0,95}$  при 95% уровне вероятности считается достаточно небольшой, если выполняется следующее условие:

$$U_{0,95} \leq 1/3 * MPEV \quad (3)$$

где MPEV есть абсолютная величина значений МРЕ при поверке. Таким образом,  $U_{\max}$  будет наибольшим допускаемым значением расширенной неопределенности измерений при количественных испытаниях.

Критерии для оценки соответствия показаны на Рисунке 8: в случаях а, б, с и d средство измерений считается соответствующим требованиям, установленным для поверки, а в случаях е и f - несоответствующим. Полученные результаты, с учетом неопределенности, в обоих случаях находятся в пределах значений МРЕ, установленных для средств измерений в ходе эксплуатации.

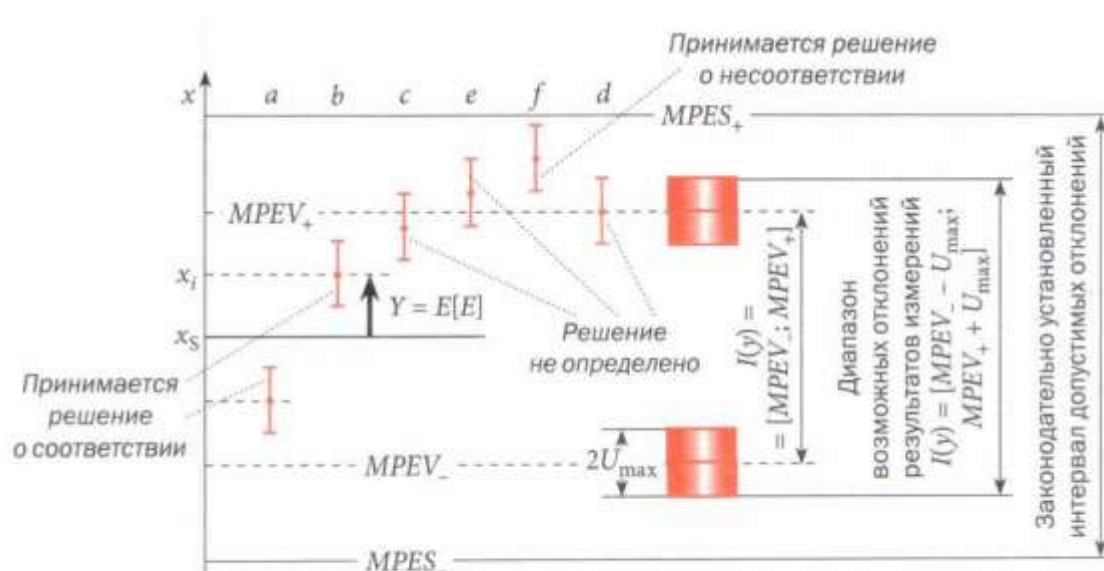


Рис. 8. Критерии оценки соответствия в законодательной метрологии и оценки диапазона отклонений результатов измерений  $I(y)$  поверенных средств измерений с учетом неопределенности  $U_{\max}$ :

$MPEV_+$  – наибольшее значение допустимой погрешности поверки;

$MPEV_-$  – наименьшее значение допустимой погрешности поверки;

$MPES_+$  – наибольшее значение допустимой погрешности в процессе эксплуатации средства измерений;

$MPES_-$  – наименьшее значение допустимой погрешности в процессе эксплуатации средства измерений;

$U_{\max}$  – верхний допустимый предел расширенной неопределенности измерений;

$y$  – наилучшая оценка значения отклонения  $E$  результата измерений  $x_i$  от принятого действительного (истинного) значения измеряемой величины при поверке;

$I(y)$  – интервал соответствия для отклонений  $y$  результатов измерений  $x_i$ .

МРЕ недавно поверенного средства измерений в самом худшем варианте может увеличиться на 33%. Однако, поскольку законодательно установленные значения МРЕ распространяются на средства измерений в процессе эксплуатации,

риски пользователей, связанные с тем, что в ходе поверки значения МРЕ, с учетом неопределенности измерений, могут выходить за установленные пределы, незначительны.

Определяемое в рамках поверки значение МРЕ рассматривается как средство поддержки заключения о соответствии средства измерений, учитывающее все влияющие факторы, которое может быть применимо к средствам измерений в процессе эксплуатации.

Среди достоинств данной системы, основанной на поверке средств измерений, следует отметить ее эффективность в части обеспечения соблюдения устанавливаемых законом требований, предъявляемых к средствам измерений в процессе эксплуатации. Учитывая более широкий диапазон значений МРЕ для средств измерений в процессе эксплуатации, влияние внешних факторов и дрейф показаний в течение всего срока действия свидетельства о поверке средства измерений можно считать незначительными. Досрочное прекращение действия свидетельства о поверке возможно только в случае несанкционированных изменений конструкции или повреждения средства измерений, влияющих на точность измерений.

Взаимосвязь между пределами погрешности и неопределенностью при испытаниях рабочих эталонов Сточки зрения законодательной метрологии рабочими эталонами являются эталоны, обычно используемые для поверки средств измерений. В некоторых странах отдельные рабочие эталоны, подпадающие под действие метрологического контроля, испытываются или поверяются согласно специальным регламентам. МРЕ для таких рабочих эталонов устанавливается исходя из сферы их применения. Как правило, значения МРЕ, устанавливаемые для таких эталонов, будут значительно ниже расширенных неопределенностей, задаваемых уравнением (3).

Рабочий эталон массы (гиря) считается отвечающим установленным законом требованиям в части, касающейся значений погрешности, если разница между полученным показанием, или измеренной величиной, и соответствующей величиной, воспроизведенной исходным эталоном, равна или меньше разности

заданного предела погрешности  $MPE_{WS}$  и расширенной неопределенности измерения  $U_{0,95}$ .

$$| I_{WS} - X_S | \leq MPE_{WS} - U_{0,95} \quad (4)$$

где:

$I_{WS}$  - показание рабочего эталона при испытаниях;

$X_S$  - величина, воспроизводимая исходным эталоном.

На практике это означает, что для девиации показаний устанавливается определенный предел, который существенно меньше законодательно установленного предела погрешности  $[MPE_{WS-}; MPE_{WS+}]$  (см. Рисунок 4). Величина данного предела соответствует интервалу  $[MPE_{WS-} + U; MPE_{WS+} - U]$

Такой подход соответствует узаконенной процедуре декларирования соответствия в калибровочных сертификатах.

### Сопоставление двух систем

В таблице 2 сравниваются процедуры поверки и калибровки, в том числе на основании Volkmanн.

Характеристики процедуры	Процедура	
	Поверка	Калибровка
Базовые	Законодательные требования (требования установленные в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений)	Технические регламенты (в Российской Федерации отнесено к сфере государственного регулирования), нормативные документы, требования клиента
Цели	Гарантия не превышения установленного значения предельно допустимой погрешности (MPE)	Установление соотношения между показаниями средства измерений и принятой основой для сравнения (эталонными значениями), с учетом приписанной точности эталонов и процедуры сравнения
Необходимые условия	Допуск к применению в законодательно регулируемой сфере	Признание результатов калибровки Пригодность средства измерений для проведения калибровки

Сроки признания результатов	Возможность проведения поверки в рамках утверждения типа и (или) в процессе эксплуатации	До очередной плановой поверки	В момент проведения калибровки в заданных условиях
Оценка приемлемости результатов	Поверяющий орган		Пользователь
Прослеживаемость	Обеспечивается процедурой поверки (поверочной схемой и требованиями к эталонам)		Обеспечивается калибровочной лабораторией
Неопределенность измерения	Меньше или равна 1/3 от максимально допускаемой погрешности при поверке		Зависит от квалификации калибровочной лаборатории и технических характеристик эталонного и калибруемого оборудования

Поверка обеспечивает точность средств измерений, учитывая при этом возможную область их применения. В первую очередь поверяются средства измерений, оцениваемые с целью утверждения типа. В основе поверки лежат технические процедуры, аналогичные тем, что применимы при калибровке. Поверка является гарантией правильности показаний средства измерений даже в тех случаях, когда измерения выполняет обычный пользователь, не являющийся квалифицированным специалистом. С точки зрения выполнения требований законодательной метрологии и обеспечения качества выполняемых измерений, поверка является достаточно эффективным инструментом, в том числе с учетом большого числа поверяемых средств измерений. Поскольку результаты измерений, выполняемых в ходе эксплуатации средства измерений, оцениваются главным образом посредством МРЕ, важно, что поверка обеспечивает высокую степень доверия к результатам измерений в течение длительного срока эксплуатации средства измерений.

Одним из недостатков поверки является отсутствие полного понимания степени влияния неопределенности на оценку соответствия средства измерений специальным требованиям.



Традиционная калибровка является важной процедурой, подпадающей под действие метрологического контроля. Калибровка, в том числе, применима в области фундаментальных измерений, проводимых в рамках научной и промышленной метрологии. Калибруются практически любые типы средств измерений, однако для выполнения калибровки и оценки результатов измерений требуются специалисты достаточно высокой квалификации.