

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ МЕТРОЛОГИИ

А.Т. Тўраев

ассистент Карши Инженерно - экономического институт

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены проблемы, связанные с использованием концепции неопределённости измерений в различных видах метрологических задач, таких как калибровка, испытания типа, поверка средств измерений. Представлена классификация рисков при оценке соответствия средств измерений заданным требованиям. Приведены примеры правил принятия решений о соответствии, применяемых при поверке средств измерений, показана роль неопределённости измерений в этих правилах.

Ключевые слова: средство измерений, поверка, погрешность показания, максимальная допускаемая погрешность, неопределённость измерений, риск ложной приёмки (браковки), правило принятия решения, оценка соответствия.

ABSTRACT

The problems related to application of measurement uncertainty in various types of metrological tasks, such as calibration, type evaluation, verification of measuring instruments are considered. Classification of risks which take place during conformity assessment of measuring instruments to the specified requirements is presented. Some decision rules on conformity used in verification tasks are reviewed on examples. The role of measurement uncertainty in these rules is shown.

Keywords: measuring instrument, verification, error of indication, maximum permissible error, measurement uncertainty, risk of false acceptance/rejection, decision rule, assessment of conformity.

Создание концепции неопределённости измерений привело к настоящей революции в современной метрологии. С момента первого издания Руководства по выражению неопределённости измерения (GUM) [1] одной из главных задач теоретической метрологии стало совершенствование способов оценивания неопределённости. В настоящее время разработаны и используются Дополнения к GUM [2, 3], которые в значительной степени устранили несовершенства и развили основные теоретико-вероятностные подходы GUM [4].

Теоретики продолжают размышлять о дальнейшем улучшении концепции неопределённости (в том числе о переработке GUM) [5]; специалисты в области практической и законодательной метрологии проявляют значительный интерес к концепции неопределённости измерений и её использованию при решении различных прикладных задач. Неопределённость измерений широко признана в качестве основополагающего элемента метрологической прослеживаемости результатов измерений также в области аккредитации лабораторий [6, 7]. В [6] показаны возможность и преимущества применения концепции неопределённости в различных областях деятельности при оценке соответствия разнообразных объектов заданным требованиям. Способы учёта положений концепции неопределённости в правилах по оценке соответствия исключительно метрологических объектов (средств измерений (СИ), измерительных систем) представлены в [7].

Среди основных задач прикладной метрологии можно выделить оценку типа, поверку, аттестацию (метрологическую) и калибровку СИ. Общим метрологическим моментом для всех этих процедур, как правило, является определение значений метрологических характеристик СИ - измеренных значений величин. Отличия могут заключаться в условиях измерения (так, при оценке типа выполняют измерения во всем диапазоне нормированных условий эксплуатации), тщательности (при калибровке может выбираться большее число повторных наблюдений, чем при поверке) и объёме выполняемых измерений (при калибровке может выбираться большее количество точек в диапазоне измерений, чем при поверке). Но главное отличие состоит в результате выполнения той или иной метрологической процедуры.

При калибровке получают измеренные значения метрологических характеристик, оценивают и приводят в свидетельствах калибровки неопределённость измерений. Такой способ действия уже давно стал обычной практикой для всех калибровочных лабораторий согласно требованиям стандарта [8]. Оценивание неопределённости измерений при калибровках осуществляется, как правило, по разработанным в лаборатории методикам оценивания неопределённости. Требования к значению неопределённости может устанавливать заказчик калибровочных работ в соответствии со своими потребностями в виде верхней границы неопределённости или так называемой целевой неопределённости. Такое требование может повлиять на стоимость калибровки: чем меньше требуемая неопределённость измерений, тем выше стоимость калибровки. При необходимости осуществления выводов по результатам калибровки о соответствии откалиброванных объектов заданным требованиям необходимо учитывать значения неопределённости согласно [8].

При выполнении оценки типа, поверки и аттестации СИ необходимо не только определять их метрологические характеристики, но и на основании этих характеристик в обязательном порядке делать заключение о соответствии СИ заданным требованиям. Другими словами, в задачах законодательной метрологии акцент переносится с самих результатов измерений на решения, которые принимаются на их основе. Возникает вопрос, следует ли при этом оценивать и учитывать значение неопределённости измерений. В настоящее время не существует однозначного и чёткого ответа, и цель данной статьи - побудить читателей задуматься об этом.

Принятие решений о соответствии СИ заданным требованиям основывается на результатах одного или нескольких повторных измерений и последующем сравнении рассчитанного по этим результатам значения погрешности показания E_I с максимальной допустимой погрешностью МРЕ, т. е. $|E_I| \leq \text{МРЕ}$. Погрешность показания E_I определяется как разность между показанным СИ измеренным значением измеряемой величины Y_I и её истинным значением, за которое принимается значение той же измеряемой величины, определённое с помощью эталона Y_S : $E_I = Y_I - Y_S$. Сравнение E_I с МРЕ с целью принятия решения о соответствии в виде схемы показано на рис. 1.

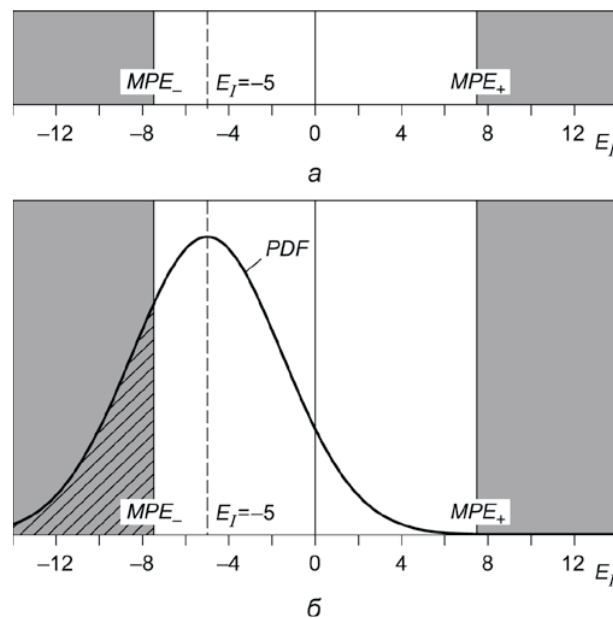


Рис. 1. Схемы принятия решений при оценке соответствия СИ без рассмотрения неопределённости измерений в явном виде (а) и с её учётом (б); серым фоном выделены зоны несоответствия СИ заданным требованиям

Верхние и нижние границы погрешности обозначены МРЕ_+ , МРЕ_- , они симметричны относительно нуля. Если значение измеренной погрешности

показания E_1 лежит в интервале, определённом границами МРЕ (зона соответствия), то считается, что СИ соответствует заданным требованиям (см. рис. 1, а: $|-5| \leq 7,5$). В противном случае считается, что СИ не соответствует требованиям (зона несоответствия, показанная тёмным фоном на рис. 1). Именно такой классический подход используют в настоящее время при выполнении тысяч операций оценки типа, поверки и аттестации СИ. Следует отметить, что в данном случае неопределённость измерений не рассматривается в явном виде. Тем не менее, в [7] утверждается, что границы МРЕ установлены уже с учётом возможных значений неопределённости измерений для соответствующего типа и метода поверки СИ, т. е. влияние неопределённости принимается незначимым из-за назначения интервала МРЕ с запасом или использования эталона, точность которого в 3-5 раз превышает точность поверяемого объекта. Но так это на самом деле или нет, рассмотрим далее на примере о поверке весов.

Очевидно, что вследствие неизбежной «неидеальности» выполняемых измерений, решения о соответствии, основанные только на измеренных значениях величин, не могут являться полностью однозначными, а гарантируют лишь некоторую степень уверенности в том, что объект соответствует требованиям. Поэтому данные решения должны основываться на понятиях вероятности и рисков, а также учитывать такую вероятностную характеристику качества измерений, как неопределённость. Включение положений концепции неопределённости измерений при установлении соответствия в области законодательной метрологии требует иных решений. Вместо того, чтобы однозначно заявлять, что СИ соответствует заданным в виде МРЕ требованиям и поэтому проходит проверку соответствия, можно лишь установить некоторую степень уверенности (или вероятности, выраженной в виде уровня доверия) в отношении данного соответствия. Характерная черта такого вероятностного подхода заключается в учёте определённых рисков (например, принятия неверного решения) при вынесении заключения о соответствии (несоответствии) СИ заданным требованиям. Неопределённость измерений используется в процессе установления количественных значений указанных вероятностей и рисков.

Оценив неопределённость измерений и построив плотность распределения вероятностей PDF для E_1 , можно увидеть, что значительная часть области под кривой PDF (см. рис. 1, б, заштрихованная область) расположена левее МРЕ. Это означает, что существует значительная вероятность нахождения погрешности показания E_1 в зоне несоответствия, несмотря на то, что E_1 находится в зоне соответствия.

Оценивать риски вместе с правилами принятия решения о соответствии можно двумя способами: учитывать неопределённость измерений в явном или «неявном» виде [6, 7]. Как правило, в явном виде неопределённость измерений рассчитывается и рассматривается при принятии решений о соответствии, когда измерения выполняются в лабораторной среде. Здесь существуют различные риски.

Риск ложной приёмки, когда СИ считается соответствующим МРЕ, но в реальности это требование не выполнено. В данном случае E_1 находится в диапазоне МРЕ, но PDF распространяется на область вне границ МРЕ (см. рис. 1, б).

Возможное правило принятия решения заключается в том, что вероятность или риск ложной приёмки (P_{fa}) должен быть меньше заявленного значения (например, 5 %). Такой риск выгоден для оценщика или пользователя СИ, но для производителя или продавца СИ может привести к определённым убыткам.

Риск ложной браковки, когда СИ признаётся не соответствующим требованиям, в то время как в реальности они выполнены. В данном случае E_1 лежит вне диапазона МРЕ, но PDF распространяется на область внутри границ МРЕ. Возможное правило принятия решения заключается в том, что риск ложной браковки (P_{fr}) должен быть меньше, чем заявленное значение (например, 2 %). Такой риск выгоден для производителя и продавца СИ, но оценщику или пользователю СИ может принести убытки.

Невозможно получить правило принятия решения, которое включает оба ложных риска: и приёмки, и браковки. Таким образом, преимущество имеет или оценщик (пользователь), или производитель (продавец), но не оба одновременно.

Если значение неопределённости рассматривается как фиксированное для каждого измерения, то сдвиг МРЕ на ширину защитной полосы [6], равной, как правило, расширенной неопределённости измерений, может использоваться для принятия решения о соответствии. Такой способ получил название «защищённая приёмка» или правило принятия решения, основанное на защитных полосах.

Для вычисления риска ложной приёмки или браковки должна быть известна PDF. Построение PDF и расчёт площади под кривой PDF является в общем нетривиальной задачей, и поэтому использование рисков ложной приёмки или браковки-достаточно трудоёмкая операция, которую не всегда возможно выполнить, например, при поверке СИ. В этой связи широко распространён совместный риск.

Совместный риск является соглашением между сторонами: оценщиком (пользователем) и производителем (продавцом) СИ. Такое соглашение

применяют, когда отсутствуют преимущества вследствие учёта неопределённости измерений и в случае совместной ответственности сторон за последствия неправильных решений. Правило приёмки, основанное на совместном риске, называется «простой приёмкой». При этом стороны соглашаются явно или неявно принимать в качестве соответствующего (и отбраковывать в противном случае) СИ, измеренное значение погрешности показаний которого находится в пределах МРЕ. На практике для поддержания шансов принятия неверных решений на уровнях, приемлемых для обеих сторон, обычно используют некоторое требование. Необходимо, чтобы была учтена расширенная неопределённость погрешности показания $U(E_I)$ и ограничено её значение: оно должно быть меньше «максимальной допускаемой неопределённости» МРУ. Коэффициент отношения МРУ/МРЕ, как правило, составляет 1/3 или 1/5.

Одно из важных преимуществ способа оценивания соответствия на основании совместного риска заключается в том, что необязательно знать PDF погрешности показания, поскольку риск делится поровну, и его не нужно рассчитывать. Однако требуется рассчитать неопределённость измерений $U(E_I)$ для оценки «достаточной малости» отношения $U(E_I)/МРЕ$. Данное преимущество способствует широкому использованию совместного риска. Фактически, во многих Рекомендациях OIML в настоящее время уже применяется совместный риск, по крайней мере в неявном виде.

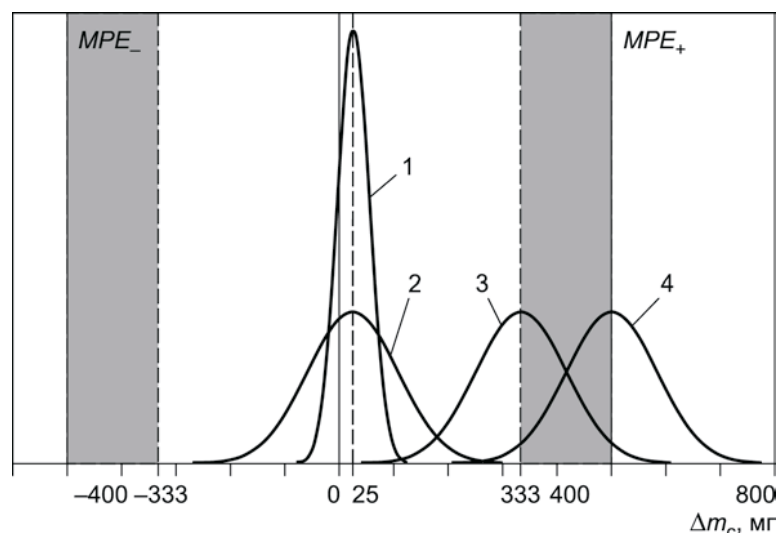


Рис. 2. Иллюстрация защищённой приёмки на примере поверки гири с номинальным значением 10 кг класса точности M1:

1 - PDF для данных из примера; 2 - PDF для полученного измеренного значения погрешности $\Delta m_c = 25$ мг и стандартной неопределённости, равной

максимальной допускаемой стандартной неопределённости для гири класса точности M1 $[u(m_c)] = 83,3$ мг; 3 - PDF для «предельного» допускаемого случая, когда ещё выполняются условия по принятию положительного решения о соответствии, т. е. неопределённость не превышает максимальное допускаемое значение, а измеренное значение погрешности $\Delta m_c = 333$ мг находится на границе защищённой полосы (показана серым фоном); 4 - PDF, неприемлемая для принятия решения о годности в соответствии с требованиями [9]

Рассмотрим пример правила принятия решения о соответствии, основанного на защищённой приёмке с заданным значением MPU.

Поверка гири с номинальным значением массы 10 кг класса M1 согласно [9]. Измерение массы поверяемой гири осуществляется посредством сравнения с эталонной гирей класса F2 той же номинальной массы с использованием компаратора массы, метрологические характеристики которого были предварительно определены. Измеренное значение условной массы поверяемой гири и неопределённости измерений (стандартная и расширенная) взяты из [10, пример S2]: $m_c=10,000025$ кг (измеренное значение погрешности $\Delta m_c=25$ мг); $u(m_c)=29,3$ мг; $U(m_c)=59$ мг (при вероятности охвата $P=95$ % и коэффициенте охвата $k=2$).

В [9] задаётся правило принятия решения о соответствии гири заданному классу точности на основании выполнения условий 1, 2, относящихся к MPU и выполнению правила защищённой приёмки, соответственно:

- 1) расширенная неопределённость условной массы гири должна быть не более одной трети предела допускаемой погрешности δm , т. е. $U(m_c):51/3 \delta m$;

Значения параметров, используемые в примере о поверке весов

| Условие | Нагрузка, кг | E_I , г | $u(I)$, г | $u(m_{ref})$, г | $u(E_I)$, г | $U(E_I)$, г | Δm_{ref} , г | MPE, г | TAR | $U(E_I)/MPE$ | P_n , % |
|---------|--------------|-----------|------------|------------------|--------------|--------------|----------------------|--------|-----|--------------|-----------|
| 1 | 10 | 0 | 1,545 | 0,151 | 1,552 | 3,369 | 0,16 | 3,0 | 19 | 1,12 | 5,3 |
| 2 | | 0 | 1,410 | 0,106 | 1,414 | 2,983 | 0,16 | 3,0 | 19 | 0,99 | 3,3 |
| 1 | 20 | -5 | 3,465 | 0,290 | 3,476 | 7,926 | 0,30 | 7,5 | 25 | 1,06 | 24,0 |
| 2 | | 0 | 3,082 | 0,198 | 3,089 | 6,795 | 0,30 | 7,5 | 25 | 0,91 | 1,5 |
| 1 | 60 | -10 | 5,909 | 0,904 | 5,978 | 12,254 | 0,90 | 15,0 | 17 | 0,82 | 20,0 |
| 2 | | 0 | 5,694 | 0,635 | 5,739 | 11,601 | 0,90 | 15,0 | 17 | 0,77 | 0,9 |

- 2) условная масса гири m_c не должна отличаться от своего номинального значения m_0 более чем на предел допускаемой погрешности δm за вычетом расширенной неопределённости, т. е. $m_0 - (\delta m - U) \leq m_c \leq m_0 + (\delta m - U)$.

Предел допускаемой погрешности гири $\pm \delta m$ при первичной и последующей поверках для номинального значения массы 10 кг класса M1 составляет ± 500 мг

[9], тогда $MPU=166,7$ мг и 59 мг $< 166,7$ мг. Второе требование также выполняется. Следовательно, поверяемая гиря признаётся соответствующей классу точности M1. Полученный результат вместе с правилом принятия решения представлен на рис. 2. Здесь кривая 1 - это PDF для данных из рассмотренного выше примера; кривая 2 - PDF для полученного в примере измеренного значения погрешности $\Delta m_c=25$ мг и стандартной неопределённости, равной максимальной допускаемой стандартной неопределённости для гири класса точности M1 $[u(m_c)]=83,3$ мг. Кривая 3 соответствует «предельному» допускаемому случаю, когда ещё выполняются условия по принятию положительного решения о соответствии, т. е. неопределённость не превышает максимальное допускаемое значение, а измеренное значение погрешности $\Delta m_c=333$ мг находится на границе защищённой полосы (показана серым фоном). В данной ситуации гиря все ещё может быть признана соответствующей заданному классу точности. Кривая 4 обозначает PDF, которая уже является неприемлемой для принятия решения о годности в соответствии с приведёнными выше требованиями [9].

Теперь рассмотрим, каким образом используется неопределённость в неявном виде. Многие измерения в области законодательной метрологии выполняются вне лабораторной среды и предназначены для принятия оперативных решений о соответствии, поэтому неопределённость измерений иногда представляется лишь в неявном виде. Это возможно, если для поверки используется измерительная система, для которой сложно оценить неопределённость полученных результатов в явном виде, или предполагается, что неопределённость измерений является незначимой для рассматриваемой цели измерений (однако этот факт нуждается в демонстрации и подтверждении). Без выполнения расчёта и представления в явном виде неопределённости измерений её оценка сверху может быть получена посредством задания значения и обеспечения его на практике (например, проведением цепи калибровок в лаборатории) так называемого коэффициента отношения точностей при испытаниях TAR. Этот коэффициент является отношением максимальной допускаемой погрешности поверяемого СИ к максимальной допускаемой погрешности эталона, используемого для поверки этого СИ: $TAR = MPE/\delta m_{ref}$. Как правило, TAR 4:1.

На конкретном примере рассмотрим случай, когда при поверке неопределённость измерений не оценивается в явном виде, но при этом задаётся коэффициент TAR.

Поверка многоинтервальных весов среднего класса точности III, имеющих максимальные нагрузки поддиапазонов взвешивания 12, 30, 60 кг с ценой

деления для каждого поддиапазона соответственно 2, 5, 10 г, согласно [11]. Измерение погрешности показания весов осуществляется с помощью набора эталонных гирь класса точности F2 по [9] при нагрузках 10, 20, 60 кг без настройки чувствительности весов непосредственно перед измерениями при поверке (условие 1) или с настройкой (условие 2). Значения измеренных погрешностей показаний весов и неопределённостей измерений взяты из [12, пример H2]. Для указанных выше условий 1, 2 в таблице приведены значения погрешностей показания E_I , стандартных неопределённостей показанного значения $u(I)$, эталонной нагрузки $u(m_{ref})$ и погрешности показания $u(E_I)$; расширенной неопределённости погрешности показания $U(E_I)$; пределов допускаемой погрешности используемых при поверке эталонных гирь δm_{ref} ; коэффициентов TAR и коэффициентов, определяющих отношение $U(E_I)/MPE$; вероятностей несоответствия P_n поверяемых весов заданным требованиям в отношении погрешности.

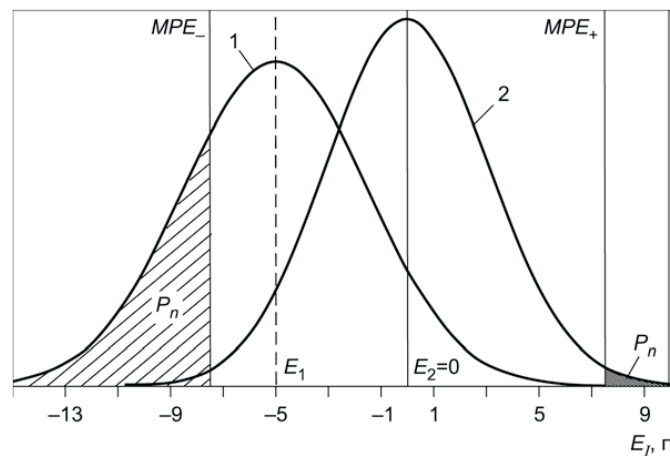


Рис. 3. Иллюстрация оценки соответствия весов класса точности III с учётом неопределённости измерений в явном виде для нагрузки 20 кг без настройки чувствительности весов (1) и с настройкой чувствительности (2)

На рис. 3 представлены результаты оценки соответствия рассматриваемых весов (с настройкой чувствительности и без неё) с учётом неопределённости измерений в явном виде для нагрузки 20 кг. В [11] задаётся правило принятия решения о соответствии весов на основании выполнения следующих условий:

погрешность показания, полученная при каждом единичном взвешивании, а также разность между результатами нескольких взвешиваний одного и того же груза не должна превышать MPE весов для данной нагрузки;

MPE гирь не должны превышать $MPE / 3$ весов при данной нагрузке, т. е. коэффициент TAR должен быть не менее 3:1.

Из таблицы следует, что перечисленные требования выполнены и веса могут признаваться соответствующими классу точности III по [11] для обоих условий выполнения измерений. Используемое в данном примере правило принятия решений является простым, и в нём не рассматривается неопределённость измерений в явном виде. Возникает вопрос, а была ли она учтена неявно. Анализ значений расширенных неопределённостей измерений $U(EI)$ (см. таблицу) показывает, что они практически равны абсолютному значению MPE ($U(EI)/MPE=1$). Это означает, что требование в отношении «достаточной малости» неопределённости по отношению к MPE не выполняется, поэтому в данном случае не может быть реализовано правило приёмки, основанное на совместном риске (простая приёмка). В то же время соблюдение с огромным запасом (более 15:1, см. таблицу) условия в отношении значения TAR, заложенное в требованиях правила принятия решения, не приводит к желаемому эффекту - уменьшению вплоть до незначимости неопределённости измерений по сравнению с MPE поверяемого СИ. Данный факт объясняется тем, что неопределённость $u(m_{ref})$, связанная с эталонной нагрузкой, практически незначима по сравнению с $u(I)$. Таким образом, можно предположить, что в рассматриваемом примере при разработке правила принятия решения о соответствии СИ неопределённость измерений совсем не учитывалась. А при её возможном учёте в явном виде вероятность ложной приёмки P_n может достигать в некоторых случаях 25 % (см. таблицу и рис. 3).

Описанная парадоксальная ситуация на практике приводит к тому, что пользователям весов выгоднее использовать поверенные весы, соответствующие определённому классу точности и имеющие погрешность измерения, не превышающую заданную MPE, чем откалиброванные весы с расширенной неопределённостью измерений, превышающей MPE для заданного класса точности, для которых существует большая вероятность ложной приёмки.

В настоящее время, если при установлении MPE не были учтены минимальные физически возможные уровни неопределённости измерений, в [7] рекомендуется либо уменьшить значение неопределённости, либо (в случае отсутствия такой возможности) установить большее значение MPE для соблюдения «правильного» соотношения $U(EI)/MPE$. Описанные примеры оценок соответствия СИ показали, что применяемые правила принятия решений кардинально отличаются друг от друга с точки зрения вероятностного подхода и использования неопределённости измерений. Представляется логичным, что в задачах прикладной и даже законодательной метрологии вопросы, связанные с

правилами принятия решений о соответствии СИ заданным требованиям, должны рассматриваться с применением вероятностной основы концепции неопределённости измерений и общей унифицированной стратегии, базирующейся на различных рисках. Правила принятия решений должны быть в максимальной степени объективны, понятны и экономически эффективны. В настоящее время стратегия в отношении данной проблемы уже принята [7].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ: (REFERENCES)

1. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Geneva: ISO, 1993.
2. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data. Suppl. 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement». Propagation of distribution using a Monte Carlo method.
3. JCGM 102:2011. Evaluation of measurement data. Suppl. 2 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement». Extension to any number of output quantities.
4. Ефремова Н. Ю., Чуновкина А. Г. Развитие концепции «неопределённости измерения» и пересмотр «Руководства по выражению неопределённости измерения». Ч. 1. Причины и теоретико-вероятностные основы пересмотра // Измерительная техника. 2016. № 4. С. 9-14.
5. Ефремова Н. Ю., Чуновкина А. Г. Развитие концепции «неопределённости измерения» и пересмотр «Руководства по выражению неопределённости измерения». Ч. 2. Сравнительный анализ основных положений Руководства и их планируемых изменений // Измерительная техника. 2016. № 5. С. 7-11.
6. JCGM 106:2011. Evaluation of measurement data. The role of measurement uncertainty in conformity assessment.
7. OIML G 19:2017. The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology.
8. ISO/IEC 17025:2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
9. OIML R 111-1:2004. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 Pt. 1: Metrological and technical requirements.
10. EA-4/02 M:2013. Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration.
11. OIML R 76-1:2006. Non-automatic weighing instruments. Pt. 1: Metrological and technical requirements. Tests.
12. Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments, EURAMET Calibration Guide No. 18, version 4.0.