

УДК 389.6:006.354

А.С. Дойников, Л.В. Юров

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Московская область, Менделеево, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОВЕРКЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрены особенности поверки средств измерений в условиях малого запаса по точности применяемых эталонов. Обоснована возможность применения неопределенности измерения в этих условиях. Даны рекомендации для разработки процедур поверки с учетом неопределенности и определению коэффициента охвата, обеспечивающего достоверность поверки не менее 0.95 наряду с приемлемым риском забраковать метрологически исправный прибор.

Ключевые слова: поверка, подтверждение соответствия, эталон, неопределенность измерений, коэффициент охвата, метод Монте-Карло.

Введение

В рекомендациях [1, 2] (см. также [3]) предложены общие принципы использования различных по смыслу понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения» в ряде метрологических процедур, включая поверку средств измерений (СИ) – подтверждение соответствию СИ установленным требованиям. При этом сравнение СИ с эталоном в процессе поверки надо рассматривать как косвенное измерение погрешности СИ, выполняемое с некоторой неопределенностью. Такой подход к поверке соответствует общим принципам подтверждения соответствия параметров изделий допустимым отклонениям по международному стандарту [4] и использован, например, в рекомендации МОЗМ [5] для поверки гирь. Необходима конкретизация этих общих принципов применения неопределенности в процедурах поверки для различных вариантов установленных требований к СИ. При этом для разработки документов на методики поверки особенно актуальна методология выбора критериев соответствия установленным требованиям к СИ.

Традиционно поверка СИ осуществлялась с использованием эталонов, имеющих большой запас точности по отношению к поверяемому СИ – до 10 раз. При этом влияние погрешности эталонов на результат поверки не учитывалось ввиду пренебрежимо малого риска в подтверждении соответствия. Классики [6] указывали на критерий ничтожных погрешностей в случае, если одна из составляющих суммарной погрешности меньше ее более чем в три раза. При этом данной составляющей пренебрегали. Но уже в классической монографии М.Ф. Маликова [7] указывалось, что «погрешность прибора определена достаточно достоверно, если погрешность образцового прибора не превышает в десять раз меньшее значение». В более поздней монографии [8]

уточнялось, что трехкратный запас по точности достаточен только в случае, «когда при поверке вводят поправки на показания образцовых средств измерений. Если же поправки не вводятся, то образцовые средства выбираются исходя из соотношения 1:5». Указанные рекомендации основывались на очевидных рассуждениях о том, что, так как «погрешность дается в виде числа с одной или максимум с двумя значащими цифрами, причем вторая цифра равна 5» [7], то измеренная погрешность не должна отличаться от истинной более чем «на несколько единиц второй значащей цифры» [6]. Важно попутно отметить, что в этой цитате говорится об измерении погрешности.

С развитием метрологии происходит расширение номенклатуры измеряемых величин, создаются новые СИ и эталоны в таких областях, как измерения параметров ионизирующих излучений, физико-химические измерения, гидроакустика и т. п. При этом часто не удается обеспечить большой запас точности при поверке рабочих СИ в этих видах измерений. Очевидно, что при уменьшении запаса по точности эталона возрастает вероятность признать годным метрологически неисправный прибор.

Поэтому анализ влияния погрешности эталона на результаты поверки и разработка достаточно простого для широкой практики метода учета этой погрешности является **актуальной задачей**.

Основная часть

Поверка СИ может заключаться [1, 2]:

- а) в определении пригодности СИ к применению с отбраковкой тех СИ, погрешность которых превышает пределы допускаемой погрешности, установленной для СИ данного типа;
- б) в установлении действительных значений или градуировочных характеристик СИ, поступивших на поверку (в том числе путем введения поправок);

в) в определении пригодности СИ к применению по требованиям к их стабильности (с отбраковкой тех СИ, изменение действительного значения или градуировочной характеристики которых за межповерочный интервал превысило предел допускаемой нестабильности, установленный для СИ данного типа) и в установлении действительных значений или градуировочных характеристик остальных СИ.

Для СИ (мер, измерительных преобразователей и т. п.), поверяемых по вариантам б) и в), необходимо нормировать различные метрологические характеристики [9]. Охватить одной публикацией все эти варианты не представляется возможным, поэтому ограничимся наиболее простым, но распространенным вариантом нормирования пределов погрешности СИ (границ погрешности, классов точности СИ).

При поверке оперируют установленными для средств измерений пределами погрешностей. Поэтому в методиках поверки желательно указывать, в каком соотношении должны находиться расширенная неопределенность измерений при поверке и пределы погрешностей СИ данного типа, а также критерии годности СИ с учетом неопределенности измерений при поверке. При этом способы учета неопределенности измерений в процедурах оценки соответствия СИ установленным требованиям для указанных выше разных вариантов поверки могут отличаться.

В давнем, но действующем нормативном документе [10] используется понятие «погрешность поверки» определенное как погрешность измерений при поверке средств измерений, и предлагается учитывать ее при разработке методик поверки. При этом приходится фактически говорить о *погрешности измерений погрешности СИ*. Такая словесная конструкция трудно воспринимаема по сравнению с предлагаемым выражением *неопределенность измерений погрешности СИ*. Наиболее распространен метод учета погрешности эталона в критерии годности СИ путем уменьшения пределов его погрешности на величину, зависящую от соотношения пределов погрешностей эталона и поверяемого прибора. Здесь может быть успешно применен общий подход по выбору средств измерений по точности для решения типовой задачи измерения погрешности поверяемого СИ с помощью эталона. В книге [11] предлагается пользоваться графиками, выражающими зависимость вероятности брака контроля от технологического рассеивания, погрешности измерений, допуска на контролируемый параметр. Учет этих факторов приводит к необходимости применять «производственный допуск на изделие, более жесткий, чем установленный». Применительно к поверке СИ это означает, что должно вводиться предельное значение погрешности, меньшее чем

предел погрешности поверяемого прибора на величину, зависящую от погрешности используемого при поверке эталона. Но такой подход, несмотря на свою очевидность, не получил широкого распространения.

К причинам такого положения можно отнести как сложность математического аппарата, используемого при определении предельного значения погрешности, так и затруднения, вызываемые необходимостью изменять предельное значение погрешности в зависимости от точности конкретного эталона, примененного для поверки.

В рекомендации [1] предлагается подход, основанный на использовании неопределенности измерений при поверке, а именно «в методиках поверки допускается указывать, в каком соотношении должны находиться расширенная неопределенность измерений при поверке и нормы допустимых пределов погрешностей СИ данного утвержденного типа, а также критерии годности СИ измерений с учетом неопределенности измерений при поверке». Это позволяет корректно использовать зачастую уже имеющуюся информацию о неопределенности измерений, выполняемых с использованием того или иного эталона, что существенно облегчает поставленную выше задачу.

Тем не менее, предложенные в [1] общие принципы требуют конкретизации с целью выработки конкретных и достаточно простых для широкого использования рекомендаций.

Следует попытаться конкретизировать указанные выше общие принципы применения неопределенности при поверке с учетом общих принципов подтверждения соответствия, изложенных в стандарте [4], где подчеркнута, что «решение о соответствии требованиям может быть принято тогда и только тогда, когда интервал неопределенности, построенный по результатам измерений, находится внутри области допустимых значений». Применительно к поверке, при которой происходит измерение погрешности (косвенное) это можно описать следующей процедурой:

○ Измеряется (предположим для простоты что одновременно) некоторая величина эталоном (действительное значение X_d) и поверяемым СИ (измеренное значение $X_{изм}$).

○ Тогда погрешность Δ поверяемого СИ вычисляется как разность между измеренным и действительным значением $\Delta = X_{изм} - X_d$, значение Δ может быть положительным, нулевым или отрицательным.

○ В соответствии с [12] оценивается стандартная неопределенность u_c измерения Δ . По определению u_c неотрицательный параметр.

При этом для однократных измерений (достаточно частый случай при поверке, если известно,

что случайный разброс результатов измерений пренебрежимо мал), полагается, что неопределенность типа А равна нулю ($u_a = 0$).

Для наиболее распространенного случая симметричных пределов погрешности эталона стандартная неопределенность типа В (u_b) обычно оценивается по формуле:

$$u_b = \frac{b}{\sqrt{3}}.$$

Здесь $\pm b$ – пределы погрешности эталона. При этом предполагается, что погрешность может находиться с равной вероятностью в интервале, ограниченном пределами погрешности.

○ Оценивается расширенная неопределенность $U = ku_c$ (неотрицательный параметр), где k – коэффициент охвата.

○ Рассчитывается: верхняя граница интервала неопределенности измеренной погрешности как сумма измеренной погрешности Δ (положительной или отрицательной) и расширенной неопределенности U , и нижняя граница интервала неопределенности как разность измеренной погрешности Δ и расширенной неопределенности U .

○ Решение о положительном результате поверки может быть принято только в том случае, если интервал неопределенности результата измерения погрешности находится внутри области допустимых значений, то есть верхняя граница этого интервала неопределенности не превышает положительного предела погрешности поверяемого СИ ($\Delta_{\text{пред}}$), а нижняя граница этого интервала не менее отрицательного предела погрешности поверяемого СИ (минус $\Delta_{\text{пред}}$).

○ Если интервал неопределенности результата измерения погрешности полностью лежит в области недопустимых значений погрешности СИ, принимают решение о несоответствии требованиям, то есть об отрицательных результатах поверки.

○ Если интервал неопределенности результата измерения погрешности включает в себя положительный ($\Delta_{\text{пред}}$) или отрицательный предел погрешности (минус $\Delta_{\text{пред}}$), результат поверки является неопределенным.

При коэффициенте охвата $k = 2$ предлагаемый подход обеспечивает минимальный (близкий к нулю) риск признать годным метрологически неисправный прибор (ошибка контроля второго рода), что хотя и снижает дальнейшие потери при применении поверенного таким образом СИ, но приводит к высокой вероятности получить неопределенный результат поверки, а зачастую забраковать метрологически исправный прибор (ошибка контроля первого рода). Например, при двукратном запасе по точности эталона по отношению к поверяемому СИ в соответствии с вышеописанной процедурой при коэффициенте охвата

$k = 2$ из 250 фактически исправных СИ годными будут признаны только 100. В стандарте [9] указывается, что значение характеристики любого экземпляра поверенного СИ должно находиться в интервале с границами, равными пределу его погрешности с вероятностью $P = 1$. Тем не менее, общепризнано, что для рабочих СИ считается допустимым при поверке, если вероятность признать годным метрологически неисправный прибор $P \leq 0.05$. Поэтому целесообразно провести оценку вероятности признать годным метрологически неисправный прибор в зависимости от соотношения пределов погрешности эталона и поверяемого СИ, а также коэффициента охвата k .

Подобные задачи удобно решать путем моделирования на ЭВМ с применением методов Монте – Карло [13, 14].

Проведем упрощенный (но охватывающий наиболее часто встречающиеся на практике случаи) анализ при следующих допущениях:

○ У эталона наблюдается только систематическая погрешность, которая либо может находиться с равной вероятностью в интервале, ограниченном пределами погрешности эталона $\pm b$, либо (в наихудшем случае) постоянна и равна одному из пределов погрешности $\pm b$.

○ Погрешность прибора, поступившего на поверку, может находиться с равной вероятностью в интервале с границами, превышающими сумму предела погрешности поверяемого СИ $\Delta_{\text{пред}}$ и предела погрешности эталона b .

Алгоритм вычислений при моделировании заключается в следующем:

○ Задается некоторое истинное значение измеряемой величины $X_{\text{и}}$

○ Формируется $X_{\text{изм}}$ как случайное число, находящееся с равной вероятностью в интервале вокруг $X_{\text{и}}$ с границами, превышающими сумму предела погрешности поверяемого СИ $\Delta_{\text{пред}}$ и предела погрешности эталона b .

○ Формируется $X_{\text{д}}$ как случайное число, находящееся с равной вероятностью в интервале вокруг $X_{\text{и}}$ с границами, ограниченными пределами погрешности эталона $\pm b$, либо (в наихудшем случае) $X_{\text{д}}$ постоянно и равно сумме истинного значения $X_{\text{и}}$ одного из пределов погрешности $\pm b$.

○ Рассчитываются разности $X_{\text{изм}} - X_{\text{д}}$ и $X_{\text{изм}} - X_{\text{и}}$.

○ Если $|X_{\text{изм}} - X_{\text{д}}| + U \leq \Delta_{\text{пред}}$ СИ признается годным, если $|X_{\text{изм}} - X_{\text{и}}| \leq \Delta_{\text{пред}}$ СИ является метрологически исправным.

○ На основании подсчета количества событий вычисляются соответствующие вероятности (например, вероятность признать годным метрологически неисправный прибор).

Результаты моделирования

В результате моделирования получились достаточно простые и хорошо согласующиеся с известными рекомендациями результаты:

- для диапазона отношений пределов погрешности поверяемого СИ и эталона (запаса по точности при поверке) от 1,5 до 5 вероятность признать годным метрологически неисправный прибор не превысит 0,05, если значение коэффициента охвата k выбирать в интервале:

$$2b/\Delta_{\text{пред}} < k < (2b/\Delta_{\text{пред}} + 0,5).$$

- если запас по точности эталона более 5 неопределенность при поверке можно не учитывать

- если запас по точности эталона менее 1,5 и отсутствуют более точные эталоны, следует применять упомянутые выше более сложные методы поверки, а именно основанные на введении поправок по результатам поверки, установлении действительных значений или градуировочных характеристик СИ, определении пригодности СИ к применению по требованиям к их стабильности.

Список литературы

1. РМГ 91 – 2009. ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.
2. Рекомендация КОOMET R/GM/21:2011. Использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.
3. Дойников А.С. Презентация РМГ 91 – 2009 «ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы» / А.С. Дойников // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: ХУПС, 2009. – Вып. 5 (79). – С. 5-8.
4. ISO 10576-1:2003. Statistical methods. Guidelines for the evaluation of conformity with specified requirements. Part 1. General principles. (ГОСТ Р ИСО 10576-1-2006. Статистические методы. Руководство по оценке соответствия установленным требованиям).

5. OIML R 111-1-2004. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 и M3. Part 1: Metrological and technical requirements.

6. Маликов М.Ф. Основы метрологии / М.Ф. Маликов. – М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов при СМ СССР.- 1949.-479 с.

7. Маликов С.Ф. Введение в метрологию / С.Ф. Маликов, Н.И. Тюрин. – М.: Издательство стандартов, 1965. – 240 с.

8. Бурдун Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 320 с.

9. ГОСТ 8.009–84. «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

10. МИ 187–86. ГСИ. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений.

11. Селиванов М.Н. Качество измерений: Метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.

12. JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.

13. Артюхина Л.В. Применение метода Монте-Карло к оценке погрешностей косвенных измерений / Л.В. Артюхина. – Северский технологический институт Томского политехнического университета. Публикация в Интернете.

14. Введение к «Руководству по выражению неопределенности измерения» и сопутствующим документам. Оценивание данных измерений / Пер. с англ. под науч. ред. д.т.н. В.А. Слаева, д.т.н. А.Г. Чуновкиной. – СПб.: Профессинал, 2011. – 58 с.

Поступила в редколлегию 10.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П.Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

ВИКОРИСТАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ПЕРЕВІРЦІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

О.С. Дойников, Л.В. Юров

Розглянуті особливості повірки засобів вимірювань в умовах малого запасу по точності вживаних еталонів. Обґрунтована можливість застосування невизначеності вимірювання в цих умовах. Наведені рекомендації для розробки процедур повірки з урахуванням невизначеності і визначенню коефіцієнта обхвату, що забезпечує достовірність повірки не меншого 0,95 разом з прийнятним ризиком забракувати метрологічно справний прилад.

Ключові слова: повірка, підтвердження відповідності, еталон, невизначеність вимірювань, коефіцієнт обхвату, метод Монте-Карло.

USE OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT IN VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS

A.S. Doynikov, L.V. Yurov

Features of verification of measuring instruments in the conditions of a small stock on accuracy of applied standards are considered. Possibility of application of uncertainty of measurement in these conditions is proved. Recommendations for working out of procedures of verification taking into account uncertainty and to definition of factor of coverage are made, providing reliability of verification not less 0.95 along with comprehensible risk to reject the serviceable device are made.

Keywords: verification, conformity acknowledgement, the standard, uncertainty of measurements, coverage factor, Monte-Carlo method.