

УДК 389

А.С. Дойников

*Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений, Москва, Россия***НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ШКАЛАМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

Предложено обобщение понятия «неопределенность измерений», применимое к результатам измерений по неметрическим шкалам. Даны рекомендации по способам выражения неопределенности измерений в таких шкалах.

шкалы измерений, неметрические шкалы, неопределенность измерений

Из теории шкал измерений [1] следует, что при измерениях в шкалах порядка и наименований неприменимы традиционные для метрических шкал процедуры определения результата измерения как среднего арифметического результатов отдельных наблюдений и обычного расчета характеристик неопределенности по [2], так как статистики среднего арифметического значения и среднего квадратичного отклонения не адекватны шкалам порядка и наименований (здесь применимы медиана и размах). Краеугольное для международного «Руководства по выражению неопределенности измерений» (далее Руководство) понятие «стандартная неопределенность» оказывается также непригодным для описания неопределенности результата измерения в этих шкалах. Выходом из этой ситуации является привлечение понятия обобщенной неопределенности результатов измерений (НРИ) в самом широком смысле [1].

Основные положения теории шкал измерений адаптированные до прикладной доступности изложены в [1]. Измерению подлежат различные проявления свойств тел, веществ, явлений, процессов, описываемых принятыми моделями. Некоторые свойства при этом проявляются количественно, а другие – качественно. Многообразие проявлений любого свойства образует множество, отображение элементов которого на упорядоченное множество чисел или, в более общем случае, на систему условных знаков образует шкалу измерения этого свойства. Системами знаков являются, например, множество обозначений (названий) цветов, совокупность классификационных символов или понятий, множество баллов оценки состояний объекта, множество целых или действительных чисел и т.д. Элементы множеств проявления свойств находятся в определенных логических соотношениях между собой. Такими соотношениями могут быть "эквивалентность" (равенство) или "сходство" (близость) этих элементов, их количественная различимость ("больше", "меньше"), допустимость выполнения определенных математических операций сложения, вычитания, умножения, деления с элементами множеств и т.д. Эти особенности элементов множеств проявления свойств определяют типы шкал измерений. В соответствии с логической структурой про-

явления свойств в теории измерений различают пять основных типов шкал измерений: неметрические шкалы наименований и порядка; метрические шкалы разностей (интервалов), отношений и абсолютные шкалы. Каждый тип шкалы обладает определенными признаками, основные из которых рассматриваются ниже.

Единообразие измерений и возможность сопоставления результатов измерений, выполненных по шкале различными операторами, возможно тогда, когда используемая шкала измерений стандартизована каким либо документом, содержащим спецификацию шкалы – описание положений, принципиально важных для достаточно однозначного воспроизведения шкалы в различных лабораториях. Так, например, спецификации шкал измерений величин, соответствующих основным единицам международной системы единиц (SI), установлены соответствующими резолюциями ГКМВ, описательным определением соответствующих единиц измерений. Кроме определений основных единиц, спецификации шкал этих величин содержат те или иные дополнительные сведения, например, спецификация силы света, измеряемой в канделах, содержит стандартизованную на международном уровне табулированную функцию $V(\lambda)$ – относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения и модель линейного спектрально-аддитивного селективного приемника. Небезынтересно отметить, что в резолюции ГКМВ единица термодинамической температуры кельвин определена только по одной точке шкалы – тройной точке воды, а вся шкала измерений практически достижимых термодинамических температур претерпела ряд уточнений, отраженных в спецификациях ГКМВ: МПТШ-48, МПТШ-68, МТШ-90, опирающихся на уточненные реперные значения температур тройных точек ряда химических элементов.

Многие неметрические шкалы наименований и порядка появились из практической потребности измерения свойств явлений и материалов. Так, например, известные шкалы твердости материалов, предложенные в свое время шведским инженером И. Бригеллем, американским металлургом С. Роквеллом и английской фирмой «Виккерс Лимитед» впоследст-

вии были специфицированы рекомендациями МОЗМ. Ряд шкал специфицирован различными международными организациями. Здесь достаточно сослаться на шкалу практической солености морской воды. Многие шкалы измерений различных специфических свойств материалов, явлений, веществ, а также изделий установлены в национальных стандартах.

В любых измерениях, в любых шкалах присутствует некоторая неопределенность результата измерений, которую желательно оценивать каким-либо способом. Этими обстоятельствами обусловлено предложение для корректного описания результатов измерений в любых шкалах применять понятие «неопределенность результата измерений» в широком смысле. Согласно МИ 2365-96 [3], НРИ следует понимать как область (участок) шкалы измерений, в которой предположительно находится оценка измеряемого (количественного или качественного) свойства. Смысл этого определения близок к определению понятия «неопределенность измерения» по Руководству [2] как связанный с результатом измерения параметр разброса значений, которые возможно обоснованно приписать измеряемой величине. Такое понимание НРИ является более общим по сравнению с определением НРИ в Руководстве. В силу сказанного рекомендуемые Руководством характеристики НРИ «стандартная неопределенность», «суммарная (комбинированная) стандартная неопределенность» и «расширенная неопределенность» и алгоритмы их расчета уже не обладают необходимой общностью. Как и «погрешность измерений», эти понятия, по сути, прямо применимы только для описания измерений в одномерных метрических шкалах и абсолютных шкалах. Поэтому формулы количественного описания неопределенности по Руководству нельзя применять, например, при оценке результатов сличения национальных эталонов, воспроизводящих шкалы твердости металлов, шкалы координат цвета и цветности, при сравнении результатов измерений светочувствительности фотоматериалов, октановых чисел, кислотных чисел и т.д. Также невозможно прямо использовать формулы из Руководства для расчета стандартной неопределенности результатов измерений в логарифмических шкалах, например, при сличениях национальных эталонов единиц звукового давления. Известные способы оценки погрешности и неопределенности измерения также невозможно прямо применить в исследованиях формы поверхностей, места расположения и направления в координатной системе, в процедурах идентификации веществ.

Общепринято, что результаты измерений должны содержать следующие элементы: числовое значение, законченную единицу измерений, погрешность измерений, заданную при оценке границ погрешности вероятность. Во многих практических случаях выполнение всего комплекса этих требований к представлению результатов измерений вызывает затруднения из-за отсутствия однозначного

толкования этих понятий в шкалах различного типа. Рассмотрим эти особенности.

Обработка и форма представления результатов измерений в метрических шкалах (шкалах разностей и отношений) опирается на развитый аппарат прикладной статистики. Этому вопросу посвящены обстоятельные монографии, различные пособия; они также изложены в нормативных документах. Эти принципы обработки и формы представления результатов измерений применимы и к абсолютным шкалам, поскольку они отличаются от шкал отношений лишь наличием естественных, а не установленных по соглашению условных единиц измерений. В то же время этот аппарат неприменим для обработки результатов измерений в шкалах наименований, порядка и логарифмических, хотя встречаются (и нередко) ситуации, когда результаты измерений в шкалах порядка необоснованно обрабатываются по алгоритмам, установленным для метрических шкал. В публикациях можно встретить случаи некорректного применения понятия относительной погрешности для представления в шкалах разностей не только результатов измерений интервалов, но и самих точечных значений величины, отсчитываемой от условного нуля.

Для результатов измерений в шкалах разностей представление неопределенности в относительной форме не имеет смысла, так как получаемое при этом значение будет зависеть от выбора условного нуля шкалы. В то же время вполне допустимо выражать в относительной форме неопределенность измерения интервала в любой шкале разностей, так как точка начала интервала эквивалентна естественному нулю (значения интервалов начинаются с нуля).

Так как в шкалах наименований и порядка неприменимо понятие интервала, обладающего определенным размером, к результатам измерений в неметрических шкалах неприменимо и понятие "абсолютная погрешность измерения" в обычном общепринятом смысле, как разность между результатом измерения и действительным значением, так как арифметическая операция вычитания не определена на множествах значений в шкалах наименований и порядка. В этой ситуации формально затруднительно описывать абсолютную погрешность измерения как отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Обозначение таких отклонений в виде чисел со знаками плюс или минус имеет другой смысл, отличный от арифметических интервалов: одинаковость чисел отклонений на разных участках шкалы не означает их равенство. Поэтому удобнее характеризовать результаты измерений в этих шкалах размахом или неопределенностью.

Определение границ (зон) НРИ — достаточно сложная и не поддающаяся формализации задача, которую приходится решать в соответствии с регламентированной в нормативных документах спецификацией каждой конкретной шкалы способами,

отличными от рекомендуемых в Руководстве. Так, например, в модельной плоскости координат цветности неопределенность результата измерений характеризуется эллипсообразной окрестностью точки с полученными как результат измерений координатами цветности. В дискретных шкалах возникают свои особенности выражения неопределенности результата измерений. В общем случае зону неопределенности в зависимости от конкретного типа дискретной шкалы можно представить себе как совокупность (для одномерной шкалы – двух) соседних элементов шкалы, расположенных в окрестности идентифицированного как результат измерений элемента шкалы. Для многомерных шкал эта окрестность будет характеризоваться элементарным объемом в соответствующем абстрактном модельном пространстве. Достаточное широкое распространение неметрических шкал, наличие национальных исходных эталонов, реализующих такие шкалы, делают задачу поиска обобщенных принципов выражения неопределенности измерений по неметрическим шкалам актуальной.

При измерениях в шкалах порядка из-за неопределенной нелинейности (отсутствия пропорциональности) этих шкал нельзя применять в качестве результата измерений среднее арифметическое

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

поскольку при допустимых для этих шкал произвольных монотонных преобразованиях $y = \varphi(x)$ равенство

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

в общем случае не выполняется. В этом случае существует более адекватная статистика – «медиана», т.е. $(k+1)$ -е значение среди $(2k+1)$ значений ряда результатов наблюдений, расположенных в порядке возрастания. Поэтому для этих шкал корректно принятие за результат измерений медианы (например, третьего из пяти экспериментально полученных значений чисел твердости, расположенных в порядке возрастания). Медиана инвариантна относительно возможных монотонных нелинейных преобразований шкал порядка.

Хорошим примером шкал порядка, не обладающих пропорциональностью, являются все шкалы твердости. Пример выбран нами не случайно. Область измерения твердости материалов (в первую очередь, металлов и сплавов) хорошо обеспечена метрологически. Достаточно сказать, что в ней функционируют четыре государственных эталона России. Неопределенность результатов измерений чисел твердости h выражается в виде экспериментально полученного размаха значений чисел твердости от h_{\min} до h_{\max} раздвиганием вниз и вверх по шкале на Δ – границы неопределенности воспроизведения и передачи шкалы от эталона, т.е. «неопределенность измерения числа твердости от $h_{\min} - \Delta$ до $h_{\max} + \Delta$ » (здесь привычные алгебраические знаки вычитания «-» и сложения «+» использованы в ка-

честве символов указанного смещения по шкале). Поэтому корректная запись результата измерений твердости, например, по шкале Роквелла должна выглядеть так: HRC = 28,7 с неопределенностью от 28,2 до 29,2. После чисел добавлять какие-либо символы, имитирующие единицы измерения, нет оснований. Распространенную в литературе и нормативных документах форму записи результата измерения твердости в виде «28,7 HRC с погрешностью $\pm 0,5$ HRC» нельзя считать приемлемой. Здесь символ HRC ассоциируется с обозначением единицы измерения, которой, как уже было сказано, в этой шкале вообще не может быть. HRC, HB, HV и HSD – это обозначения измеряемых величин – чисел твердости по шкалам Роквелла, Бринелля, Виккерса и Шора соответственно. Можно считать приемлемыми и такие формы записи: результат измерения твердости – HRC = 27,7 с неопределенностью $U_{\text{HRC}} = 0,5$; норма на допустимые пределы погрешности измерения на участке шкалы HRC от 25 до 35 составляет: $\Delta_{\text{HRC}} = \pm 0,5$, если не забыть об указанной выше условности использования здесь знаков плюс и минус.

Общие рекомендации по представлению результатов измерений по неметрическим шкалам

1. В шкалах порядка отсутствуют единицы измерений, поэтому результаты измерений выражаются в принятых для конкретной шкалы символах (числах, баллах, ступенях, классах и т.п.). За результат измерения принимается значение, соответствующее медиане ряда наблюдений при измерении. В шкалах порядка неопределенность измерения и пределы абсолютной погрешности измерений выражаются размахом наблюдений при измерении. Применение относительного размаха, стандартной, суммарной стандартной и расширенной неопределенности по указанным в Руководстве [2] правилам невозможно из-за отсутствия пропорциональности у величин, описываемых шкалами порядка (неархимедовых величин [1]). Невозможность установления для неархимедовых величин равенства интервалов на разных участках шкалы обуславливает неприменимость к таким величинам операций дифференцирования и интегрирования, а следовательно и понятия плотности вероятности. В дискретных шкалах порядка неопределенность измерения может выражаться совокупностью нескольких последовательных классов эквивалентности. Измеряемым в шкалах порядка величинам и количественным символам (числам, баллам) нет оснований приписывать какие-либо размерности и вычислять отношения разных значений измеряемых величин.

2. В шкалах наименований отсутствуют единицы измерений, поэтому результаты измерений выражаются в принятых для конкретной шкалы символах эквивалентности определенных точек шкалы. Например: в колориметрических шкалах результат

измерения цвета обозначается совокупностью трех координат, обозначающих точку в модельном цветовом пространстве. В шкалах наименований, описывающих качественные свойства в общем случае, невозможно вводить количественные параметры типа размаха и стандартной неопределенности для выражения неопределенности результата измерений. В дискретных шкалах наименований имеет смысл оперировать «неопределенностью идентификации» (возможностью отнесения результата измерения к одному или нескольким классам эквивалентности используемой шкалы). В шкалах наименований, упорядоченных по сходству проявлений качественного свойства, возможно введение не обладающих пропорциональностью специфических параметров шкалы и размаха результатов измерений этих параметров в качестве неопределенности результата измерений. Какие-либо суждения о количественном соотношении различных значений результатов измерений в шкалах наименований бессмысленны – они различаются качественно, но не количественно.

3. В многомерных шкалах результат измерения выражается обязательно совокупностью значений модельных параметров шкалы. Например, результат измерения векторной величины (силы, скорости, ускорения и т.п.) должен выражаться совокупностью трех значений: модуля в соответствующих единицах и двух плоских углов, обозначающих направление вектора в выбранной для измерений системе пространственных координат. В многомерных

шкалах неопределенность результата измерений выражается объемной областью неопределенности в соответствующем многомерном модельном (абстрактном фазовом) пространстве. Эта объемная область определяется совокупностью неопределенностей измерения параметров, образующих модельное пространство. Для двумерных величин такому объему соответствует область, ограниченная замкнутой кривой на плоскости.

4. В логарифмических шкалах прямое применение установленных в Руководстве правил расчета стандартной, суммарной стандартной и расширенной неопределенности невозможно. Эти формулы применимы к оценкам составляющих неопределенностей после их потенцирования.

Список литературы

1. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. *Метрология. Шкалы, эталоны, практика.* – М.: ВНИИФТРИ, 2004. – 222 с.
2. *Guide to the expression of uncertainty in measurement.* – ISO, 1995. – 101 p.
3. МИ 2356-96 ГСИ. *Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения.* – М.: ВНИИФТРИ. – 34 с.

Поступила в редколлегию 18.05.2007

Рецензент: канд. техн. наук, доц. А.Б. Егоров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.