

Развитие концепции неопределённости измерения и пересмотр «Руководства по выражению неопределённости измерения». Ч. 1. Причины и теоретико-вероятностные основы пересмотра

Н. Ю. ЕФРЕМОВА¹, А. Г. ЧУНОВКИНА²

¹ Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Беларусь,
e-mail: efremova@belgim.by

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: A.G. Chunovkina@vniim.ru

Проанализировано развитие концепции неопределённости измерений согласно «Руководству по выражению неопределённости измерения» и Дополнениям к нему, целью которых являлось расширение области применения концепции неопределённости. Рассмотрены недостатки «Руководства по выражению неопределённости измерения», приведшие к необходимости его пересмотра, а также научно-методические принципы, положенные в основу планируемого пересмотра.

Ключевые слова: стандартная неопределённость, коэффициент охвата, расширенная неопределённость, частотная концепция вероятности, байесовская (субъективная) вероятность, теорема Байеса, функция правдоподобия.

Analysis of the development of the measurement uncertainty concept in accordance with both general document «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» (GUM) and its Supplements issued later and aimed at broadening the original scope of GUM was carried out. The disadvantages of the GUM which lead to the necessity of its revising as well as scientific and methodological principles which form the basis for the planned revision of the GUM are outlined in the article.

Key words: standard uncertainty, coverage factor, expanded measurement uncertainty, frequency probability concept, Bayesian (subjective) probability, Bayes' theorem, likelihood function.

«Руководство по выражению неопределённости измерения» (далее — GUM) является одним из главных документов в метрологии [1]. Впервые GUM был опубликован в 1993 г. от имени семи международных организаций: BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, UIPAP, OIML. В настоящее время поддержанием и развитием не только GUM, но и в целом концепции неопределённости занимается Рабочая группа 1 (WG 1) специально созданного в 1997 г. Объединённого комитета по Руководствам в метрологии (JCGM), возглавляемого директором BIPM.

По мнению авторов, следует выделить две основные цели GUM:

обеспечение единообразия и прозрачности методов оценивания качества измерений любого уровня, что является необходимым условием сравнения и сопоставления результатов измерений, выполненных в разных лабораториях, и в конечном итоге приведёт к взаимному признанию результатов измерений;

строгое математическое обоснование правил и алгоритмов вычисления неопределённости измерения, поскольку авторы GUM посчитали некорректным описание систематических погрешностей случайными величинами и последующее «суммирование» характеристик систематических и случайных погрешностей, принятое в классической теории погрешностей.

Первая цель безусловно достигнута. В течение более двух десятилетий GUM используют практически в неизменном виде. Он переведён на разные языки и в ряде стран принят в качестве национального стандарта. Применяют GUM при анализе результатов ключевых сличений национальных эталонов, выполняемых с целью реализации Соглашения о взаимном признании национальных эталонов, сертификатов измерений и калибровок, выдаваемых национальными метрологическими институтами (CIPM MRA) [2]. Широко используется концепция неопределённости при калибровке средств измерений (СИ) [3, 4].

Вторая цель достигнута лишь частично. Несомненным преимуществом GUM является концептуальный подход, позволяющий совместно и единообразно учитывать вклады неопределённости, возникающие как из-за случайных, так и из-за систематических факторов. В результате неопределённость измерения вычисляется однозначно с использованием способа объединения обоих видов вкладов неопределённости, одобренного международным метрологическим сообществом. Однако при анализе теоретико-вероятностных основ расчёта неопределённости по GUM ясно, что изначально GUM являлся внутренне противоречивым документом. Причина этих противоречий состоит в том, что для вычисления стандартных неопределённостей приняты разные интерпретации вероятности: частотная и байесовская (субъективная) — при вычислениях неопределённости по

типам А и В, соответственно. Такое «смещение» частотного и байесовского подходов привело к внутренней несогласованности GUM и даже к «ошибкам» и стало залогом неизбежного пересмотра GUM [5].

Концепция неопределённости возникла в значительной степени из-за несогласия авторов GUM с тем, как теоретико-вероятностный подход используется в теории погрешностей. Авторы GUM указали на некорректность описания систематических погрешностей случайными величинами при частотной интерпретации вероятности и предложили другой подход к выражению точности измерения на основе неопределённости измерения. Другие возможные причины возникновения концепции неопределённости приведены в [6].

Основным показателем неопределённости была выбрана стандартная неопределённость — стандартное отклонение распределения случайной величины, которая используется для описания возможных значений величины независимо от источника неопределённости, будь то случайный разброс данных при многократных измерениях или систематические эффекты при измерении, обусловленные введением поправок или применяемым СИ. Правила оценивания стандартных неопределённостей рассмотрены в GUM в зависимости от имеющейся информации (статистической или нестатистической), что соответствует оцениванию неопределённости измерения по типам А или В. Выбор стандартного отклонения в качестве единого показателя неопределённости упрощает суммирование составляющих неопределённостей, обусловленных различными систематическими и случайными факторами. Предлагаемый в GUM подход суммирования стандартных неопределённостей основан на законах теории вероятностей и математической статистики, а именно: дисперсия суммы независимых случайных величин является суммой дисперсий этих величин. Квадратичное суммирование стандартных неопределённостей под знаком корня названо законом трансформирования неопределённостей, который базируется на разложении модели измерения $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ (Y — измеряемая (выходная) величина; $X_1, X_2, \dots, X_n$ — входные величины) в ряд Тейлора пер-

вого порядка: $u^2(y) = \sum_i u^2(x_i) \partial^2 f / \partial^2 x_i$, где $u(x_i)$ — стандарт-

ные неопределённости входных величин. При корреляции между влияющими величинами в ряд Тейлора следует добавлять соответствующее слагаемое.

Закон трансформирования неопределённостей может быть применён для нелинейных моделей при выполнении следующих условий:

функция измерения имеет непрерывную производную по входным величинам X_i в окрестностях наилучших оценок x_i , и это справедливо в отношении производных всех порядков, используемых в законе трансформирования неопределённостей;

величины X_i , входящие в значимые члены разложения функции измерения в ряд Тейлора высших порядков, являются независимыми;

члены высших порядков, не включенные в аппроксимацию функции измерения рядом Тейлора, являются пренебрежимо малыми.

Однако на практике проверке этих условий не всегда уделяется должное внимание, и часто закон трансформирования неопределённостей применяется формально, что может приводить к абсурдным результатам. Яркий пример по-

лучения недостоверных оценок содержится в JCGM 101:2008 [7, п. 9.4.2], где рассматривается нелинейная функция моде-

ли измерения вида $Y = X_1^2 + X_2^2$. Когда оценки входных величин $x_1 = x_2 = 0$, стандартные неопределённости $u(x_1) = u(x_2) = 0,005$, тогда согласно GUM будут равны нулю оценка выходной величины $y = 0$ и стандартная неопределённость $u(y) = 0$. Очевидно, что в этом случае нарушаются условия применимости закона трансформирования неопределённостей. Частично исправить ситуацию позволяет учёт членов более высокого порядка при разложении функции измерения в ряд Тейлора, что также рекомендуется в GUM. Так как все частные производные рассматриваемой в примере функции измерения выше второго порядка равны нулю, учёт членов только второго порядка при разложении в ряд Тейлора автоматически приводит к учёту всех членов более высокого порядка, а значит к полному учёту нелинейности функции измерения. В данном примере стандартная неопределённость выходной величины оказывается равной $u(y) = 50 \cdot 10^{-6}$, а оценка измеряемой величины остается равной нулю.

Простота применения теоретико-вероятностного подхода, реализованного при вычислении стандартной неопределённости, исчезает при переходе к расчёту расширенной неопределённости измерения. Расширенная неопределённость востребована на практике, в частности, калибровочные и измерительные возможности (СМС), как определено CIPM MRA и заявлено в базе данных по ключевым сличениям Международного бюро мер и весов (BIPM KCDB), представляют расширенными неопределённостями для уровня доверия 0,95.

Чтобы вычислить расширенную неопределённость (интервал охвата), необходимо знать закон распределения измеряемой величины. Применение GUM позволяет получить только оценку измеряемой величины и соответствующую стандартную неопределённость, которые затем могут использоваться в качестве математического ожидания и стандартного отклонения распределения вероятностей измеряемой величины. Однако в рамках GUM не оперируют плотностью распределения вероятностей выходной величины и не рассматривают задачу его нахождения на основе плотностей распределений входных величин. Поэтому для построения интервалов охвата в GUM предлагаются разные приближения. Рассчитывать расширенную неопределённость U рекомендуется умножением стандартной неопределённости $u(y)$ на «подходящий» коэффициент охвата k . При этом для определения значения коэффициента охвата необходимо знать закон распределения измеряемой величины — круг замкнулся. Знание закона распределения является ключевым при установлении интервала охвата (расширенной неопределённости).

В этой ситуации в GUM предлагается «назначить» для измеряемой величины «приближенное» распределение вероятностей, которым на основании центральной предельной теоремы вероятностей может быть нормальное распределение (или в некоторых случаях t -распределение). Для нормального закона распределения и общепринятой $P = 95\%$ полагают $k = 2$. Однако нормальное распределение обоснованно может быть принято при соблюдении ряда условий: линейного приближения функции измерения; большого количества входных величин в модели измерения, которые вносят примерно сопоставимые вклады неопределённости и описываются регулярными распределениями вероятностей (например, нормальным и прямоугольным).

Другой приближенный подход к вычислению коэффициента охвата основан на расчёте эффективного числа степеней свободы по формуле Уэлча—Саттертуэйта, этой процедуре в GUM посвящено отдельное Приложение G. Предложенный способ вычисления расширенной неопределённости оказался следствием указанного ранее «смещения» частотной и байесовской интерпретаций, когда коэффициенты охвата взяты как квантили распределения Стюдента с эффективным числом степеней свободы, соответствующим суммарной стандартной неопределённости. Однако использование формулы Уэлча—Саттертуэйта при построении интервалов охвата, а также распространение количества степеней свободы, заимствованного из частотного подхода, на неопределённости, вычисленные по типу B, вызывает возражения и даже приводит к противоречивым результатам, на которые неоднократно обращали внимание многие авторы, в частности [8, 9].

Для иллюстрации вернемся к рассматриваемому примеру. Для нормального распределения и вероятности охвата 95 %, интервал охвата для измеряемой величины оказался равным $[0; 0]$ с учётом только линейных членов разложения в ряд Тейлора и $[-98 \cdot 10^{-6}; 98 \cdot 10^{-6}]$ — членов второго порядка. Очевидно, что в данном случае применение GUM приводит к неудовлетворительным результатам. Интервал охвата $[0; 0]$ не может рассматриваться как правдоподобный. При построении второго интервала была учтена нелинейность модели измерения, однако интервал оказался симметричен относительно $y = 0$, т. е. допускается вероятность 50 % существования отрицательных значений Y , что в соответствии с моделью измерения не имеет смысла. Приведённый пример показывает, что процедура построения интервалов охвата в GUM является подходящей только для ограниченного количества ситуаций, а в ряде случаев может вообще приводить к парадоксальным результатам.

К сожалению, на практике условия применимости GUM проверяются крайне редко и без дополнительного обоснования при построении интервала охвата для $P = 95$ % используют расширенную неопределённость $U = 2u(y)$. Следует также отметить, что для асимметричных распределений выходной величины (которые практически не обсуждаются в GUM) построение симметричных интервалов охвата на основе расширенной неопределённости оказывается вообще неприемлемым.

Таким образом, использование GUM ограничено моделями измерений, допускающими линеаризацию, и близкими к нормальному распределению выходной величины. При выполнении этих условий вычисление расширенной неопределённости можно признать корректным. Указанные ограничения были преодолены созданием Дополнений к этому документу. Общая стратегия разработки Дополнений к GUM изложена в JCGM 104:2009 [10]. Этот документ по смысловому содержанию предшествует GUM и служит введением в концепцию неопределённости измерения, GUM и другие документы, разрабатываемые JCGM. В [10] перечислены основные этапы оценивания неопределённости, а также кратко охарактеризованы все используемые на сегодняшний день и описанные в GUM и Дополнениях к нему способы вычислений стандартной неопределённости измеряемой величины. К ним относятся: расчёт неопределённости по GUM на основе закона трансформирования неопре-

делённости; вычисление стандартного отклонения распределения вероятностей измеряемой величины, полученного аналитически или численным моделированием методом Монте—Карло [6].

К настоящему моменту разработаны два Дополнения к GUM: JCGM 101:2008 [7] и JCGM 102:2011 [11], называемые далее GUM-S1 и GUM-S2. Использование метода Монте—Карло для вычисления неопределённости измерения рассмотрено в GUM-S1. Численным моделированием извлекают повторные выборки из плотностей вероятностей входных величин и затем с помощью модели измерения формируют выборку, соответствующую выходной величине. На основании этого выборочного распределения можно получать значения измеряемых величин и стандартных неопределённостей, как математическое ожидание и стандартное отклонение, соответственно, а также строить интервалы охвата для любой заданной вероятности охвата без дополнительных допущений о законе распределения измеряемой величины. Этот подход по аналогии с рассматриваемым в GUM назван законом трансформирования распределений.

Дополнение GUM-S1 развивает GUM. Предлагаемый метод применим как для линейных, так и для нелинейных моделей измерения. Для линейных и линеаризованных функций измерения и входных величин, подчиняющихся нормальному распределению, такой подход согласуется с подходом GUM. Однако при невыполнении условия применения подхода GUM использование GUM-S1 позволяет получать более достоверные и обоснованные заключения о неопределённости, чем GUM. В GUM-S1 применяются модель измерения и «обязательное» приписывание входным величинам распределений вероятностей, которые, в отличие от метода GUM, в явном виде используются для получения плотности распределения выходной величины.

Поскольку для применения метода Монте—Карло не требуются дополнительные предположения, его можно использовать как собственно для вычисления неопределённости, так и для валидации результатов, полученных с помощью GUM.

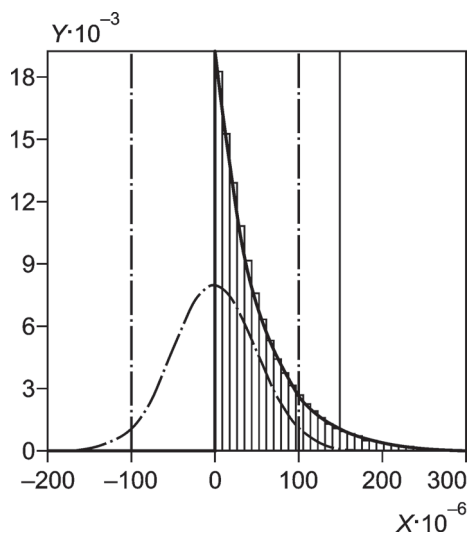
Возвратимся к рассматриваемому примеру. Методом Монте—Карло в GUM-S1 были получены оценка $y = 50 \cdot 10^{-6}$ и стандартная неопределённость $u(y) = 50 \cdot 10^{-6}$. Интервал охвата равен $[0; 150 \cdot 10^{-6}]$ для $P = 95$ % (в данном случае наикратчайший, имеющий наименьшую длину среди всех возможных интервалов охвата с одинаковой вероятностью охвата). В этом примере плотность распределения выходной величины удастся получить аналитическими методами, что достаточно редко встречается на практике. Математическое ожидание и стандартное отклонение для найденной аналитически плотности распределения вероятностей выходной величины Y , которые принимаются за оценку измеряемой величины y и стандартную неопределённость $u(y)$, составили $y = 50 \cdot 10^{-6}$, $u(y) = 50 \cdot 10^{-6}$, а наименьший интервал охвата для $P = 95$ % — $[0; 150 \cdot 10^{-6}]$. С подробным аналитическим выводом формул для данной задачи можно ознакомиться в [7, Приложение F]. Сопоставление полученных различными способами (GUM, Монте—Карло, аналитический вывод) результатов расчётов для рассматриваемого примера приведено в таблице.

Результаты расчётов различными способами трансформирования распределений для модели измерений $Y = X_1^2 + X_2^2$

Способ трансформирования	x_1	x_2	$u(x_1)$	$u(x_2)$	y	$u(y)$	Наикратчайший интервал охвата для $P = 95\%$
GUM с членами первого порядка более высокого порядка	0	0	0,005	0,005	0	0	[0; 0]
	0	0	0,005	0,005	0	$50 \cdot 10^{-6}$	$[-98 \cdot 10^{-6}; 98 \cdot 10^{-6}]$
Монте—Карло	0	0	0,005	0,005	$50 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$	[0; $150 \cdot 10^{-6}$]
Аналитический	0	0	0,005	0,005	$50 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$	[0; $150 \cdot 10^{-6}$]

Значения стандартных неопределённостей выходной величины, полученные с использованием членов более высокого порядка ряда Тейлора и метода Монте—Карло, совпадают между собой и с аналитическим решением данной задачи. При этом нулевая оценка выходной величины, вычисленная по GUM, отличается от оценок $y = 50 \cdot 10^{-6}$, найденных методами Монте—Карло и аналитическим. В соответствии с подходом GUM (и Дополнениями к нему) наилучшая оценка ассоциируется с математическим ожиданием выходной величины, но для распределений подобного вида, а также асимметричных унимодальных распределений, естественно, возникает вопрос обоснованности подобного выбора.

С целью графической иллюстрации результатов, полученных различными способами, на рисунке показаны плотности распределения вероятностей для Y , а также построенные на их основании интервалы охвата для $P = 95\%$. Согласно GUM (с учётом членов более высокого порядка при разложении в ряд Тейлора) измеряемая величина описывается



Результаты построения плотностей распределения и интервалов охвата различными способами оценивания неопределённости для модели измерения $Y = X_1^2 + X_2^2$ и случая $x_1 = x_2 = 0$; $u(x_1) = u(x_2) = 0,005$:

штрихпунктирными и полужирными линиями показаны результаты, полученные соответственно методом GUM с учётом членов более высокого порядка ряда Тейлора и аналитическим методом; гистограмма построена с помощью метода Монте—Карло; X — значение выходной величины Y ; Y — плотность распределения вероятностей

плотностью нормального распределения (колоколообразная штрихпунктирная кривая). Плотность распределения вероятностей, полученная с помощью аналитического вывода (экспоненциально убывающая кривая), представляет частный случай распределения χ^2 и существенно отличается от нормальной плотности распределения, используемой в GUM. Гистограмма, построенная методом Монте—Карло, и аналитическая кривая практически совпадают. Штрихпунктирными вертикальными линиями обозначен интервал охвата $[-98 \cdot 10^{-6}; 98 \cdot 10^{-6}]$ согласно GUM с учётом членов разложения ряда Тейлора более высокого порядка. Непрерывные вертикальные линии указывают границы наименьшего интервала охвата для $P = 95\%$, найденные аналитическим способом и методом Монте—Карло, составляющего [0; $150 \cdot 10^{-6}$].

Таким образом, применение метода Монте—Карло в GUM-S1 для вычисления неопределённости позволило распространить концепцию неопределённости на нелинейные модели измерения и снять ограничение использования только нормального закона распределения при вычислении интервалов охвата.

Дополнение GUM-S2 [11] распространяет вычисление неопределённости на часто встречающиеся на практике многомерные модели измерения, включающие произвольное количество как входных, так и выходных величин. Любая калибровка набора артефактов — гирь, конденсаторов, концевых мер длины и других, является многомерным случаем. И только многопараметрическая обработка с матричной записью позволяет корректно учесть и представить ковариационные матрицы входных и выходных величин. Для оценивания неопределённости в GUM-S2 предлагается использовать как метод Монте—Карло, обобщённый для получения дискретного представления совместного распределения вероятностей выходных величин многомерной модели, так и способ оценивания по GUM, обобщённый для случая многомерной модели измерения, с применением байесовского подхода для всех входных величин, в том числе содержащих статистические данные.

Для заданной вероятности охвата в GUM-S2 устанавливается метод определения области охвата для выходных величин — аналога интервала охвата при одномерной модели со скалярной выходной величиной. Области охвата имеют формы гиперэллипсоидов и прямоугольных гиперпараллелепипедов в многомерном пространстве входных величин.

Дополнения к GUM разрабатывались, прежде всего, с целью расширения области применения концепции неопределённости на нелинейные модели измерения, отличные от нормального закона распределений и многопарамет-

рические величины. Изначально планировалось, что разрабатываемые документы должны в максимальной степени следовать методологии GUM. Однако, как отмечалось выше, GUM является внутренне противоречивым документом, опирающимся и на частотную, и на байесовскую концепции вероятности. Принятый частотный подход для интерпретации распределений вероятностей входных величин при оценивании неопределённости по типу А и трансформировании неопределённости входных величин, а также для нахождения интервала охвата выходной величины противоречит определению понятия «неопределённость» согласно словарю VIM [12] и способу вычисления неопределённости по типу В и, следовательно, не может позволить в полной мере исправить недостатки GUM.

В соответствии с частотным подходом неопределённости и оценки величин являются оценками моментов частотных распределений и имеют связанные с ними степени свободы, которые рассматриваются в GUM в качестве мер точности для неопределённости. В GUM приводится формула для расчета «неопределённости неопределённости» величины, для которой был получен ограниченный набор статистических данных (даже при десяти повторных результатах наблюдений неопределённость неопределённости будет составлять 24 %). В то же время, принятое в GUM оценивание неопределённости по типу В базируется на байесовском подходе, в соответствии с которым оценки величин и неопределённости являются точными моментами распределений, основанных на имеющихся знаниях о величине, и, как следствие, отсутствуют связанные с ними степени свободы. Таким образом, согласно GUM по закону трансформирования неопределённости складываются квадраты стандартных отклонений и оценок стандартных отклонений, которые к тому же опираются на взаимоисключающие трактовки вероятности.

При разработке Дополнений присущие GUM основные методологические недостатки изложения концепции неопределённости были устранены. В основу был положен байесовский подход, в котором вероятность служит для количественного выражения основанной на доступной информации степени уверенности в справедливости некоторого утверждения. Измерение невозможно без априорной информации. Априорная информация должна быть представлена в виде некоторого априорного распределения вероятностей определяемого параметра. Распределение описывает возможные значения этого параметра ещё до измерения (но может опираться на экспериментальные данные предыдущих измерений). По мере поступления новой информации (экспериментальных данных) априорное распределение уточняется и переходит в апостериорное по формуле Байеса. Байесовские методы работают даже в случае выборки с нулевым объёмом. Тогда априорное и апостериорное распределения просто совпадают. Итак, байесовский подход позволяет с единых позиций подойти к вычислению неопределённости как по типу А, так и по типу В. Поэтому в соответствии с Дополнениями к GUM всем входным величинам в явном виде необходимо приписывать плотности распределения вероятностей (а не стандартные неопределённости оценок этих величин, как в GUM), основанные на имеющейся информации об этих величинах [13]. Для таких плотностей вероятностей вводится специальное название «state-of-knowledge PDF», а математическое ожидание и стандартное отклонение (точные моменты соответствующего поряд-

ка этой плотности вероятностей) являются оценкой величины и стандартной неопределённостью.

Плотность распределения величин, информация о которой содержится в серии наблюдений (оценивание по типу А), вычисляется на основе теоремы Байеса. Серия наблюдений рассматривается как реализация независимых одинаково распределённых случайных величин с заданной формой плотности распределения вероятностей, но с неизвестными параметрами. Как правило, используется гауссовское распределение с неизвестными математическим ожиданием и дисперсией. Математическому ожиданию и дисперсии приписывается неинформативное совместное априорное распределение вероятностей, а затем совместная плотность распределения вероятностей уточняется на основе данных серии наблюдений (умножением на функцию правдоподобия), в результате чего получается совместная апостериорная плотность для двух неизвестных параметров. Интегрирование совместной апостериорной плотности распределения вероятностей по мешающему параметру (в данном случае дисперсии) позволяет найти плотность распределения значений величины (неизвестного математического ожидания). Чтобы выбрать плотность распределения вероятностей величин, для которых данные наблюдений недоступны, или величин, которые невозможно измерить (оценивание по типу В), предлагается применять принцип максимума энтропии, введенный Джейсоном. В соответствии с этим принципом выбирается единственная плотность распределения вероятностей из всех возможных распределений с заданными интервалами, на которых плотность не равна нулю [7]. Таким образом, в Дополнениях к GUM стандартная неопределённость, оцениваемая по типу А, является теперь не оценкой стандартного отклонения, а параметром функции плотности распределения вероятностей, установленной с учётом доступной информации, как и неопределённость, оцененная по типу В. Поэтому разделение способов оценивания неопределённости по типам А и В фактически больше не нужно.

Далее плотности распределений вероятностей входных величин трансформируются через модель измерения для получения плотности вероятностей измеряемой величины или совместных плотностей вероятностей для многомерной измеряемой величины. Из плотности вероятности могут быть в явном виде найдены необходимые числовые характеристики измеряемой величины: математическое ожидание и стандартное отклонение, отождествляемые соответственно с оценкой значения измеряемой величины и связанной с ней стандартной неопределённостью, а также требуемый точный интервал охвата (как правило, наименьший или вероятностно симметричный) для любой заданной вероятности охвата без каких-либо допущений и приближений. Так удаётся исключить вычисление расширенной неопределённости с учётом эффективных степеней свободы, которое, как уже упоминалось, многократно критиковалось.

Байесовский подход стал основой для GUM-S1 и GUM-S2, и теперь уже GUM концептуально не согласуется со своими Дополнениями. Поэтому в 2008 г. JCGM принял решение о пересмотре GUM. Принятие решения о пересмотре такого успешного и повсеместно принятого документа, на взгляд авторов данной статьи, основывалось на действительно веских причинах и тщательном анализе планируемых изменений. Однако сложно сопоставить преимущества пересмотра и очевидные неудобства, обусловленные введением изменений в множество документов, связанных с GUM. Воп-

рос пересмотра GUM широко освещался в различных публикациях [5, 13], среди основных целей пересмотра можно выделить следующие [5]:

научная переработка основных принципов концепции неопределённости на основе байесовского подхода;

терминологическое согласование со словарём VIM3 [12], разработанным значительно позднее GUM и содержащим терминологию, достаточно сильно отличающуюся от предшествующей версии словаря VIM2;

терминологическое согласование с GUM-S1, GUM-S2 и устранение неясности в обозначениях;

корректировка общего стиля и способа изложения документа, который должен стать более строгим с научной точки зрения;

чёткое ограничение области применения GUM.

В конце 2014 г. с целью получения необходимых отзывов и комментариев всем членам-организациям JCGM, национальным метрологическим институтам и прочим заинтересованным организациям была представлена первая редакция нового GUM (JCGM 100:201X), подготовленная WG 1. Прошло широкое обсуждение проекта нового GUM, было высказано много критических замечаний, поэтому в настоящее время документ дорабатывается. Применению GUM и его планируемому пересмотру был посвящён семинар [14].

Анализ материалов семинара показывает, что в проекте нового GUM закон трансформирования неопределёностей остается основным способом вычисления стандартной неопределённости, когда его применение корректно обосновано [14, 15]. Проект нового GUM основывается исключительно на байесовском вероятностном подходе, при этом значительное внимание уделяется вычислению стандартных неопределёностей входных величин как стандартного отклонения “state-of-knowledge PDF”, суммарно представляющих доступную информацию об этих величинах. Анализ конкретных возможных изменений в способе оценивания неопределённости измерений по GUM будет рассмотрен во второй части данной статьи.

По мнению авторов, пересмотр GUM на базе единого байесовского подхода является важным шагом в развитии концепции неопределённости и разработки непротиворечивого и теоретически обоснованного метода оценивания качества измерения. Среди целей пересмотра GUM упоминается важность чёткого ограничения области его применения. Представляется также важным прояснить место неопределённости среди количественных мер точности измерений. В действующем GUM большое внимание уделяется сопоставлению неопределённости и погрешности измерения. Можно даже сказать, что концепция неопределённости в какой-то мере излагается «от противного», как противопоставление погрешности измерения. Конечно, следует ожидать, что этого не будет в новом GUM. Но вопрос о сопоставлении двух концепций остается открытым. Это противопоставление сохранилось и по отношению к такому обобщающему понятию, как точность измерения. Следует отметить, что неопределённость упоминается в проекте нового GUM исключительно как мера качества измерений (без упоминания о точности измерения). При этом определение понятия неопределённости указывает на то, что речь идёт о

количественном выражении точности измерения. Возможно, что рассмотрение неопределённости как одной из возможных мер точности измерения позволило бы более логично связать вычисление неопределённости и оценивание прецизионности и правильности методов измерений [16], вычисление неопределённости и ее использование при оценке соответствия.

Литература

1. **JCGM 100:2008.** Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM 1995 with minor corrections.
2. **Bureau International des Poids et Mesures 1999.** Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates issued by National Metrology Institutes (CIPM MRA).
3. **EA 4/02 M:2013.** Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration.
4. **ILAC-P14:01/2013.** ILAC Policy for Uncertainty in Calibration.
5. **Bich W.** Revision of the «Guide to the expression of uncertainty in measurement». Why and how // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. S155—S158.
6. **Ефремова Н. Ю.** Неопределенность измерения. Создание, современное состояние и перспективы развития концепции неопределённости // *Метрология и приборостроение*. 2016. № 3. С. 7—17.
7. **JCGM 101:2008.** Evaluation of measurement data. Supplement 1 to the «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement». Propagation of distributions using a Monte Carlo method.
8. **Hall B. D., Willink R.** Does «Welch-Satterthwait» make a good uncertainty estimate? // *Metrologia*. 2001. V. 38. P. 9—15.
9. **Чуновкина А. Г.** Задачи оценивания точности измерений. // *Измерительная техника*. 2001. № 11. С. 60—62.
10. **JCGM 104:2009.** Evaluation of measurement data. An introduction to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement».
11. **JCGM 102:2011.** Evaluation of measurement data. Supplement 2 to the «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement». Extension to any number of output quantities.
12. **JCGM 200:2012.** International Vocabulary of Metrology. Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM3).
13. **Bich W., Cox M. G., Dybkaer R., Elster C., Estler W. T., Hibbert B., Imai H., Kool W., Michotte C., Nielsen L., Pendrill L., Sidney S., van der Veen A. M. H., Woeger W.** Revision of the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» // *Metrologia*. 2012. V. 49. P. 702—705.
14. **BIPM Workshop on Measurement Uncertainty** (15-16 June 2015) [Официальный сайт] <http://www.bipm.org/en/conference-centre/bipm-workshops/measurement-uncertainty/> (дата обращения 01.12.2016).
15. **Bich W., Cox M. G., Michotte C.** Towards a new GUM — an update // *Metrologia*. 2016. V. 53. P. 149—159.
16. **ISO 21748:2010.** Руководство по применению оценок повторяемости, воспроизводимости и правильности при оценивании неопределённости.

Дата принятия: 23.12.2016.