681.2

О количественном выражении точности лабораторных и технических измерений

А. Г. ЧУНОВКИНА[1], В. Ш. СУЛАБЕРИДЗЕ[2]

[1]*Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: A.G.Chunovkina@vniim.ru*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия*

Проведён сравнительный анализ подходов и способов выражения точности технических и лабораторных измерений. Обсуждаются спорные вопросы суммирования систематических и случайных погрешностей и использования неопределённости в системе показателей точности измерений. Обоснована применимость неопределённости измерения при количественном выражении точности лабораторных измерений.

Ключевые слова: *показатели точности, неопределённость измерения, погрешность измерений, технические и лабораторные измерения.*

A comparative analysis of approaches and methods for expressing the accuracy of industrial (routine) and laboratory measurements is carried out. Debatable questions of summation of systematic and random errors and use of uncertainty in the system of indicators of measurement accuracy are discussed. The applicability of measurement uncertainty in the quantitative expression of the accuracy of laboratory measurements is substantiated.

Key words: *accuracy characteristics, measurement uncertainty, measurement error, laboratory and routine industrial measurement.*

О пересмотре Руководства по выражению неопределённости измерения (GUM). Руководство по выражению неопределённости измерения (GUM) появилось четверть века назад и сыграло положительную роль в унификации процедуры оценивания точности измерения [1–3]. Однако заявленная цель – дать строгое теоретико-вероятностное обоснование правил вычисления/суммирования неопределённостей измерения – не была достигнута. Поэтому GUM подвергалось критике с момента выхода, прежде всего, отмечалась его внутренняя противоречивость, которая стала причиной некорректных оценок неопределённости измерения [4–5]. В конце 2014 г. Рабочая группа 1 Объединённого Комитета по Руководствам в метрологии подготовила проект актуализированного GUM на основе байесовского подхода. Проект был разослан на обсуждение в метрологические институты и организации. Реакция метрологического сообщества на пересмотр GUM была в целом отрицательна [6], и её можно сравнить с отторжением GUM в России, когда он появился в 1993 г. Причина отторжения одна и та же – метрологи-практики не увидели веских оснований для изменения принятой, широко используемой процедуры оценивания точности измерений.

На сегодняшний день не ясна дальнейшая ситуация с пересмотром GUM, хотя следует справедливо отметить, что проект актуализированного GUM лишён методологических ошибок применения теоретико-вероятностных методов, присущих действующему GUM. Таким образом, возник определённый «перерыв» в обсуждении проблемы пересмотра GUM, и, возможно, было бы полезно обратиться к концептуальным вопросам применения неопределённости измерения.

Цель настоящей статьи обсудить место неопределённости измерения среди показателей точности измерений. При этом сразу следует отметить, что авторы придерживаются мнения, что введение в GUM и дополнениях к нему неопределённости измерения исключительно как характеристики качества измерений является неудачным, поскольку из контекста документов по неопределённости измерения однозначно следует, что речь идет о количественном выражении точности измерения.

Проблема «суммирования характеристик систематических и случайных погрешностей». Среди причин, послуживших толчком к разработке GUM, отмечают отсутствие строгого обоснования «суммирования систематических и случайных погрешностей». Разделение погрешностей по характеру их проявления в измерительном эксперименте на случайные и систематические погрешности обусловлено задачей их уменьшения и исключения. В этом смысле методы «борьбы» со случайными и систематическими погрешностями совершенно различные, что обусловливает и разные подходы к оцениванию составляющих погрешностей. Это, в свою очередь, создало проблему суммирования характеристик погрешностей, оценки которых получают в рамках различных подходов.

Давно стало привычным, что систематические погрешности (предполагается, что все известные поправки внесены) характеризуются границами, а случайные погрешности, как правило, – выборочным средним квадратическим отклонением (СКО). Далее от границ неисключённых систематических погрешностей (НСП) переходят к СКО. Для получения СКО суммарной погрешности суммируют под корнем («геометрическое суммирование») квадраты выборочного СКО случай-

ных погрешностей и СКО НСП. При этом не учитывается, что суммируются совершенно разные СКО. Выборочное СКО – оценка СКО наблюдаемого (частотного) распределения повторных результатов измерений, а другое СКО – это характеристика гипотетического (субъективного) распределения, которое описывает представления о возможных значениях систематических погрешностей. Возможны и другие способы суммирования, например суммирование доверительных границ, но и при других способах суммирования происходит смешивание различных подходов.

То, что в таком упрощённом подходе заложено некое внутреннее противоречие, и то, что он «навязан» потребностями практики иметь единый показатель точности отмечал еще Е. Ф. Долинский [7]: «В случае, когда погрешность имеет две составляющие – систематическую и случайную, необходимо указывать каждую из них в отдельности. В качестве оценки случайной погрешности дают среднюю квадратическую погрешность (абсолютную или относительную). Для систематической составляющей указывают максимальные возможные границы». Надо признать, что такая позиция вызывала несогласие и в те годы [8]: «Результат измерения следует характеризовать одной погрешностью – погрешностью результата, складывающейся из случайной погрешности и неисключенного остатка систематической погрешности, который, **естественно** (*Выделено авторами настоящей статьи. Прим. ред.*), тоже является случайной величиной и может быть охарактеризован своим предельным значением, дисперсией и законом распределения». Дискуссия была продолжена [9]: «Систематическая погрешность представляет определенную величину, которую недопустимо считать случайной. Поэтому не имеет смысла говорить о ее законе распределения и дисперсии. Также недопустимо в общем случае объединение случайной и систематической составляющих погрешности, … даже при большом числе независимых определений необходимо применять гипотезу о случайности распределения систематических погрешностей крайне осторожно, причем в подавляющем большинстве случаев это оказывается невозможным».

Правомерность «суммирования систематических и случайных погрешностей» для технических измерений была наиболее корректно, по мнению авторов, обоснована М. А. Земельманом [10]. Обоснование базируется на «рандомизации» НСП, которою можно считать применимой в ситуации, когда оценивается погрешность технических измерений. Такая ситуация имеет место при аттестации методики измерений, когда оценивают характеристики погрешностей результатов измерений, получаемых при применении данной методики. В данном случае характеристика погрешности относится к методике измерений, прежде всего, а не к каждому результату измерения.

Книга [10] появилась накануне выхода Руководства по выражению неопределённости измерения и в ней М. А. Земельман дал сравнительный анализ «погрешности» и «неопределённости» измерений, а также рекомендации по их практическому применению. Представляется важным подчеркнуть, что были отдельно выделены лабораторные измерения: «При лабораторных измерениях конкретная характеристика близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины относится только к данному конкретному результату измерения. Она не является самостоятельной характеристикой МВИ, присущей всем результатам измерений, которые могут быть получены при использовании данной методики в заданных условиях».

По мнению авторов, это принципиально важное уточнение. Таким образом, следует согласиться с разграничением лабораторных и технических измерений и, как следствие, с особенностями оценивания точности измерений, присущими техническим и лабораторным измерениям. Технические измерения проводятся по аттестованным методикам измерений (МВИ) с приписанными показателями точности, которые установлены, как правило, на этапе аттестации МВИ. Для этих измерений характерно априорное оценивание точности (или подтверждение соответствия установленным требованиям к точности) в рамках задач аттестации МВИ. Прямые измерения не требуют МВИ, в данном случае априорная оценка точности выполняется при поверке (калибровке) средств измерений (СИ). Для этих задач объектом исследования является погрешность МВИ/СИ с целью дальнейшего распространения полученных значений характеристик погрешностей на все измерения, выполняемые по данной МВИ или с применением СИ данного типа. МВИ могут содержать процедуру оценивания точности измерения, и тогда в результате обработки данных оценивается близость конкретного результата к истинному значению измеряемой величины. В подобных ситуациях, а также, прежде всего, при лабораторных измерениях, когда требуется наиболее полный учёт всех факторов конкретного измерения, правомерно в качестве показателя точности измерения использовать неопределённость измерения. Речь идёт о неопределённости знания значения измеряемой величины при конкретном измерении, поэтому часто среди составляющих неопределённости рассматривают не только составляющие, обусловленные СИ, МВИ, условиями измерения, методом измерения, но и особенностями объекта измерения и «выделения» измеряемой величины. Как справедливо отмечал М. А. Земельман, «интервал неопределённости – это интервал вокруг результата измерения, в то время как интервал погрешности всегда располагается вокруг нуля».

Выражение точности измерений. Понятно, что метрологическая практика стремится к единообразному выражению точности измерений для всех измерений. Можно сказать, что в отечественной метрологии доминирующее положение занял подход, разработанный для оценивания погрешностей технических измерений. В то время как подход, связанный с вычислением неопределённости измерений, разрабатывался, прежде всего, для лабораторных измерений. Поэтому он и нашёл гармоничное применение в задачах калибровки при установлении индивидуальных метрологических характеристик (МХ) СИ. Во многих калибровках измеряемой величиной является систематическая погрешность СИ (МХ СИ). Если случайная погрешность СИ значима, то при калибровке выпол-

Сопоставление способов выражения точности технических и лабораторных измерений

Характеристика точности	Технические измерения	Лабораторные измерения
Качественное выражение точности	Точность измерений Прецизионность измерений, прецизионность метода измерений (МВИ) Правильность измерений, правильность метода измерений (МВИ)	Точность измерения
Количественное выражение точности	Погрешность измерений (МВИ, СИ):: случайная; систематическая	Погрешность измерения: случайная; систематическая
Процесс оценивания точности	Калибровка / поверка СИ Аттестация МВИ	Анализ всей доступной информации: экспериментальные данные; априорная информация (МХ СИ, МХ МВИ)
Показатели точности	Доверительные границы погрешностей / предел допускаемой погрешности: СКО; границы / доверительные границы	Неопределённость измерения (стандартная, расширенная
Представление результата измерения	Измеренное значение с указанием доверительных границ погрешности / предела допускаемой погрешности	Интервал охвата (для значения измеряемой величины) / плотность распределения значения измеряемой величины

няют многократные измерения с целью уменьшения её влияния на установление значения отклонения показаний калибруемого СИ от эталона. В отдельных случаях оценивают характеристики случайной погрешности, например СКО. Для первичных эталонов отдельно представляют характеристики систематической и случайной погрешностей.

Распространение подхода неопределённости измерения на технические измерения, где доминирующее положение при выражении точности измерений занимают нормы точности измерений, сопровождается естественными сложностями. В частности, сложности проявляются при сопоставлении неопределённости измерения, как показателя точности МВИ, с используемыми показателями правильности и прецизионности методов измерений [11, 12].

В сложившейся ситуации представляется полезным обсудить взаимосвязь/иерархию понятий, используемых для выражения точности измерений. Это способствовало бы корректному применению понятия «неопределённость измерения», устранило присутствующее противопоставление понятий «погрешность измерения» и «неопределённость измерения». При этом следует отталкиваться от того, что «неопределённость измерения» – это количественная характеристика точности измерения, которая вычисляется на основе теоретико-вероятностного подхода при использовании байесовской интерпретации вероятности. Примеры вычисления приведены, например, в [13, 14]. Наиболее полным выражением неопределённости измерения является плотность распределения возможных значений измеряемой величины, которая получается исходя из анализа и обобщения всей имеющейся информации, относящейся к конкретному измерению, с применением теоремы Байеса. На практике, как правило, используют частные характеристики неопределённости измерения – СКО плотности распределения (стандартная неопределённость) и интервал вероятности (интервал охвата).

В [12] при выражении результата измерения используется обобщающее понятие «показатель точности», который объединяет характеристики погрешности измерений и неопределённость измерения. Иногда возникает вопрос о корректности применения словосочетаний «погрешность измерений» и «погрешность измерения». Применительно погрешности оба варианта представляются корректными. Можно говорить о погрешности измерений (как погрешности МВИ, СИ) и погрешности измерения (как погрешности конкретного результата измерения). Для неопределённости представляется правильным исключительно единственное число – неопределённость измерения. Однако следует признать, что в нормативных документах единообразие в этом вопросе отсутствует. Неопределённость часто используется как характеристика точности методик измерения, и в этих ситуациях используется множественное число – неопределённость измерений. В таблице приведён анализ сопоставления способов выражения точности технических и лабораторных измерений.

Таким образом, по мнению авторов, неопределённость измерения применима при количественном выражении точности лабораторных измерений. Чаще всего к таким измерениям относятся эталонные измерения – измерения при калибровке и сличениях эталонов, возможно, измерения, выполняемые при реализации первичных референтных методик измерения. При подобных измерениях выполняется апостериорная оценка точности каждого конкретного результата измерения

Литература

1. **JCGM 100:2008.** Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM 1995 with minor corrections.
2. **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.
3. **JCGM 104:2009.** Evaluation of measurement data. An introduction to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement».
4. **Bich W.** Revision of the «Guide to the expression of uncertainty in measurement». Why and how // Metrologia. 2014. V. 51. P. 155–158.
5. **Чуновкина А. Г.** Погрешность измерения, неопределённость измерения и неопределённость измеряемой величины // Измерительная техника. 2000. № 7. С. 19–23.
6. **Bich, W., Cox M. G., Michotte C.** Towards a new GUM – an update // Metrologia. 2016. V. 53. P. 149–159.
7. **Долинский Е. Ф., Кремлевский П. П., Широков К. П.** Составление и оценка точности стандартных справочных данных // Измерительная техника. 1967. № 12. С. 6–7.
8. **Соколов И. А.** К вопросу об оценке точности стандартных справочных данных // Измерительная техника. 1968. № 6 С. 23–27.
9. **Долинский Е. Ф., Кремлевский П. П., Широков К. П.** По поводу заметки «К вопросу об оценке точности стандартных справочных данных» // Измерительная техника. 1968. № 11. С. 101.
10. **Земельман М. А.** Метрологические основы технических измерений. Москва: Издательство стандартов, 1991.
11. **ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определния.
12. **РМГ 29-2013.** Метрология. Основные термины и определения.
13. **Stepanov A. V., Chunovkina A. G., Burmistrova N. A.** Calculation of coverage intervals: some study cases // Advanced mathematical and computational tools in metrology and testing: Proc. Xth Advances in mathematics for appl. sci. Singapore: World Scientific Publishing Co, 2015. V. 86. P. 429.
14. **Бурмистрова Н. А., Степанов А. В., Чуновкина А. Г.** Байесовские оценки систематических погрешностей средств измерений // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 6–10.

Дата принятия: 14.11.2017.

Перечень статей, опубликованных в 2017 г.

Всемирный день метрологии 20 мая 2017 года. Измерения для транспорта

Приветственное послание директора Международного бюро мер и весов М. Милтона 4 3

Приветственное послание директора Международного бюро законодательной метрологии С. Паторэя 4 4

К 175-летию ВНИИМ им. Д. И. Менделеева

175 лет истории ВНИИМ им. Д. И. Менделеева – Alma mater отечественной метрологии. Историческая справка 12 3

Сток М. Пересмотр Международной системы единиц – на пути к СИ, основанной на фундаментальных физических константах 12 6

von der Wense L., Seiferle B., Thirolf P. G. Ядерные часы на основе тория-229. Ч. 1. История измерения времени 12 13

von der Wense L., Seiferle B., Thirolf P. G. Ядерные часы на основе тория-229. Ч. 2. Перспективы стандарта частоты 12 17

Кривцов Е. П., Чекирда К. В., Янковский А. А. Современное состояние первичных эталонов в областях измерений геометрических, механических и связанных с ними величин 12 23

Беляков Д. И., Хорев В. Н., Шилов А. Е., Шифрин В. Я. Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции и магнитного потока 12 28

Походун А. И. Переопределение кельвина и перспективы совершенствования Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3000 °С ГЭТ 34–2007 ..... 12 32

Кустиков Ю. А., Козлов Д. Н., Пинчук О. А., Крамаренко Ю. А., Власов Д. А. Государственный первичный специальный эталон единицы массовой концентрации частиц в аэродисперсных средах ГЭТ 164–2016 ..... 12 37

Хоршев С. К., Пашковский А. И., Рогожкина Н. В., Субботин А. Н., Пестов Е. Е., Галин М. А., Левичев М. Ю., Клушин А. М. Мера напряжения Н4-21 на основе джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников 12 41

Конопелько Л. А., Полянский А. М., Полянский В. А., Яковлев Ю. А. Новое метрологическое обеспечение измерений концентрации водорода в твёрдой пробе 12 46

Чубченко Я. К., Конопелько Л. А. Разработка стандартных образцов изотопного состава углерода нового типа 12 50