

**О РЕФЕРЕНТНЫХ И ПЕРВИЧНЫХ РЕФЕРЕНТНЫХ
МЕТОДИКАХ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОСЛЕЖИВАЕМЫХ
К ШКАЛАМ ИЗМЕРЕНИЙ**

С.В. Алёхин, А.С. Дойников

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия
ales@vniiftri.ru,
doynikov@vniiftri.ru

Аннотация. В статье рассмотрены проблемные вопросы обеспечения метрологической прослеживаемости с позиции теории шкал измерений. Проанализированы определения и смысл терминов «прослеживаемость», «метрологическая прослеживаемость» и «метрологическая прослеживаемость к единице», показано, что «прослеживаемость к шкале измерений» является более общим понятием по отношению к «прослеживаемости к единице измерений».

Обосновано положение о том, что шкалы измерений являются универсальными основами для сравнения результатов измерений с целью обеспечения метрологической прослеживаемости, при этом первичные референтные методики измерений, референтные методики измерений рассматриваются как реализации шкал измерений соответствующих величин и неразмерных (качественных) свойств объектов измерений.

Показана необходимость пересмотра определений ряда метрологических терминов: измеряемое свойство, шкала измерений, первичная референтная методика измерений, метрологическая прослеживаемость — и введения определённого понятия «основа для сравнения» не только для количественных свойств (величин), но и для неразмерных (качественных) свойств.

Ключевые слова: метрологическая прослеживаемость, измеряемое свойство, основа для сравнения, шкала измерений, первичная референтная методика измерений, референтная методика измерений.

**ON THE REFERENCE AND PRIMARY REFERENCE
MEASUREMENT PROCEDURES THAT ARE TRACEABLE
TO MEASUREMENT SCALES**

S.V. Alekhin, A.S. Doynikov

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
ales@vniiftri.ru,
doynikov@vniiftri.ru

Annotation. The article discusses the problematic issues of ensuring metrological traceability from the standpoint of the theory of measurement scales. The definitions and meaning of the terms "traceability", "metrological traceability" and "metrological traceability to a unit" are analyzed, it is shown that "traceability to a measurement scale" is a more general concept in relation to "traceability to a measurement unit".

The article substantiates the position that measurement scales are universal bases for comparison of measurement results in order to ensure metrological traceability, while primary reference measurement procedures, reference measurement procedures are considered as implementations of measurement scales of corresponding quantities and non-dimensional (qualitative) properties of measurement objects.

It is shown that it is necessity of revise the definitions of a number of metrological terms: measurable property, measurement scale, primary reference measurement procedure, metrological traceability and to introduce a certain concept "basis for comparison" not only for quantitative properties (quantities) but also for non-dimensional (qualitative) properties.

Key words: metrological traceability, measurable property, basis for comparison, measurement scale, primary reference measurement procedure, reference measurement procedure.

Введение

Сформировавшиеся к настоящему времени понятийно-терминологические представления в области метрологии претерпели существенные изменения за последние три десятилетия. Происходит процесс внесения назревших изменений в положения законодательной метрологии. Возникла необходимость использования наиболее общей методологии метрологической прослеживаемости, пригодной для получения результатов измерений не только количественных, но и качественных свойств объектов, необходимость применения оценок не только погрешностей, но и неопределённостей результатов измерений.

Наиболее подходящей основой для адекватной трактовки всех перечисленных процессов является теория шкал измерений. Теория шкал измерений является более общей понятийной системой (метасистемой) по отношению к системе метрологических понятий, соответствующих измерениям только пропорциональных и аддитивных величин. Изложение основ метрологии с позиции этой теории стало возможным после развития теории шкал до прикладного уровня (Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 83-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы измерений. Термины и определения» (далее — РМГ 83), Рекомендация КОOMET R/GM/20:2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы измерений. Термины и определения», [1–6]). При этом сохранены традиционные для метрологии положения, но сделаны необходимые расширительные обобщения и дополнения метрологических понятий для адекватного описания ныне существующих измерительных процедур, выполняемых по шкалам измерений различных типов (метрических и неметрических).

Нужно иметь в виду совершенно общее положение: всякое определение термина, обозначающего какое-либо понятие, обладает неполнотой — неопределённостью смысла. Наиболее полно смысл терминов и вообще слов раскрывается через контекст их применения в рассматриваемой предметной

области. Это особенно важно для осмысливания метрологических терминов, которые многогранно взаимосвязаны на общем множестве смыслов. Например, в приложении А Рекомендаций по межгосударственной стандартизации РМГ 29-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения» (далее — РМГ 29) приведены схемы, наглядно показывающие логическую взаимосвязь между понятиями.

О метрологической прослеживаемости

Рассмотрим соотношение и смысл терминов «прослеживаемость», «метрологическая прослеживаемость» и «метрологическая прослеживаемость к единице (измерений)». В Федеральном законе Российской Федерации от 26 июня 2008 г. «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ (далее — федеральный закон № 102-ФЗ) имеются понятия: «прослеживаемость — свойство эталона единицы величины, средства измерений или результата измерений, заключающееся в документально подтверждённом установлении их связи с государственным первичным эталоном или национальным первичным эталоном иностранного государства соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений» и «эталон единицы величины — техническое средство, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины».

Согласно международному словарю по метрологии¹ (далее — словарь VIM 3) и РМГ 29 «метрологическая прослеживаемость — свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесён с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределённость измерений»; «метрологическая прослеживаемость к единице (измерения) — метрологическая прослеживаемость, когда основой для сравнения является определение единицы измерения через её практическую реализацию». При этом поясняется, что в этих определениях основой для сравнения может быть определение единицы измерения через её практическую реализацию или методика измерений, включающая единицу измерения для величин, отличных от порядковых, или эталон. Однако применяемое в определениях ключевое по смыслу выражение «основа для сравнения» как понятие в РМГ 29 и словаре VIM 3 не обозначено, хотя присутствует в прилагаемых «Схемах взаимосвязи между

¹ Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. — Изд. 2-е испр. — СПб.: НПО «Профессионал», 2010. — 82 с.; International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms VIM 3. 200:2008 (E/F). — JCGM, 2010.

понятиями» и в определении понятия «эталон — реализация определения данной величины с установленным значением величины и связанной с ним неопределённостью измерений, используемая в качестве основы для сравнения» (словарь VIM 3). В РМГ 29 используется следующее определение понятия «эталон (единицы величины или шкалы измерений) — средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений», а также определение понятия «метод измерений — приём или совокупность приёмов сравнения измеряемой величины с её единицей или соотношения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений».

Анализ приведённых определений и комментариев к понятиям о прослеживаемости приводит к следующим выводам.

Федеральным законом № 102-ФЗ предусмотрена прослеживаемость эталонов, средств измерений или результатов измерений только таких величин, для которых установлены соответствующие единицы измерений величин. При этом измерения порядковых величин и неразумных (качественных) свойств, для которых принципиально невозможно устанавливать единицы измерений, а также величин, отсчитываемых от условного (принятого по соглашению) нуля, оказываются вне понятия «прослеживаемость».

В словаре VIM 3 и РМГ 29 термин «метрологическая прослеживаемость» по определению рассматривается только применительно к результату измерения — множеству «значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией». При этом результат измерения соотносится с основой для сравнения: определением единицы измерения, или методикой измерений, или эталоном. Здесь определения понятий «методика измерений» и «эталон» относятся также к порядковым величинам без единиц измерений.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что в федеральном законе № 102-ФЗ, словаре VIM 3 и РМГ 29 отсутствуют общие определения понятий «метрологическая прослеживаемость» и «основа для сравнения», охватывающие все виды измеряемых свойств и варианты основ для сравнения.

Шкалы измерений как исходные основы измерений

Формулирование таких общих определений возможно на основе системного подхода к рассмотрению данной проблемы с позиции теории шкал измерений, основные положения которой изложены в РМГ 83. Данный подход позволяет использовать в качестве единой основы для сравнения с целью обеспечения метрологической прослеживаемости понятие «шкала измерений» (шкала (значений) величины), охватывающее все виды качественных (неразумных) и количественных измеряемых свойств, определённое в РМГ 83 как

«отображение множества различных проявлений количественного или качественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений)».

Примерами систем знаков, образующих шкалы измерений, кроме множества чисел, являются множество баллов оценки свойств объектов, множество обозначений (названий) цвета, множество названий состояния объекта, совокупность классификационных символов или понятий, множество точек в модельной системе координат.

Различают пять основных типов шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные.

Шкала наименований: шкала измерений качественного свойства, характеризующаяся только соотношениями эквивалентности или отличиями проявлений этого свойства. В шкалах наименований нельзя ввести понятия единицы измерений, а следовательно, и размерности, в них отсутствует также нулевой элемент. Примеры шкал наименований: шкалы измерений цвета, геодезические шкалы для обозначения местоположения на Земле в установленных системах координат, шкалы пространственной симметрии и др.

Шкала порядка: шкала измерений количественного свойства (величины), характеризующаяся соотношениями эквивалентности и порядка по возрастанию (убыванию) различных проявлений свойства. В этих шкалах нельзя ввести единицы измерений из-за того, что они принципиально нелинейны: логически невозможно установить равенство интервалов на различных участках шкалы. Результаты измерений в таких шкалах выражают в числах, баллах, степенях, уровнях, а не в единицах измерений. Хотя результаты измерений в таких шкалах часто обозначают непрерывными множествами действительных арифметических чисел, невозможно подразумевать пропорциональность этих значений (логически невозможно определить, во сколько раз одна реализация свойства больше или меньше другой). Примеры шкал порядка: шкалы твердости металлов, шкалы белизны различных объектов, шкалы уровней громкости, шкалы октановых чисел топлив.

Шкалы разностей (интервалов) отличаются от шкал порядка тем, что для описываемых ими свойств имеют смысл не только соотношения эквивалентности и порядка, но и равенства и суммирования интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойств. Характерный пример — шкала интервалов времени. Интервалы времени можно складывать и вычитать, но складывать даты каких-либо событий бессмысленно. Шкалы разностей имеют условные (принятые по соглашению) единицы измерений и условные нули, основанные на каких-либо реперах. Примеры шкал разностей: международная шкала равномерного атомного времени (TAI); шкала координированного времени (UTC), в которой начало счёта может меняться ровно на 1 с; шкала температуры по Цельсию, в которой единица измерений (градус Цельсия) равна кельвину и за условный ноль принята термодинамическая температура 273,16 К и др.

Шкала отношений: шкала измерений количественного свойства (величины), характеризующаяся соотношениями эквивалентности, порядка, пропорциональности (допускающими в ряде случаев операцию суммирования) различных проявлений свойства. В шкалах отношений существуют условные (принятые по соглашению) единицы и естественные нули. Шкалы отношений, в которых не имеет смысла операция суммирования, называют «пропорциональными шкалами отношений» (1-го рода), а шкалы, в которых эта операция имеет смысл, называют «аддитивными шкалами отношений» (2-го рода). Например, шкала термодинамических температур — пропорциональная, шкала масс — аддитивная.

Шкалы разностей и отношений объединяют термином «метрические шкалы».

Абсолютная шкала: шкала отношений (пропорциональная или аддитивная) безразмерной величины. Абсолютные шкалы обладают всеми признаками отношений, но дополнительно в них существует естественное однозначное определение единицы измерений. Такие шкалы используют для измерений относительных величин (отношений одноименных величин). Примеры абсолютных шкал: шкалы плоских углов, шкала телесных углов, шкалы коэффициентов (амплитудной модуляции, нелинейных искажений, усиления, ослабления, отражения).

Различают одномерные и многомерные шкалы измерений.

В настоящее время понятие «шкала измерений» применяется во многих документах и нормативно-правовых актах. Определения, приводимые в них для данного термина, отличны от определения по РМГ 83 и не обладают необходимой общностью. Так, в соответствии со словарём VIM 3 «шкала значений величины, шкала величины, шкала измерений — упорядоченный набор значений величин данного рода, используемый для ранжирования в соответствии с размером величин этого рода». РМГ 29 определяют термин «шкала (значений) величины; шкала измерений» как «упорядоченная совокупность значений величины, служащая исходной основой для измерений данной величины». Аналогичное определение содержится и в приложении № 10 к Договору о Евразийском экономическом союзе «Протокол о проведении согласованной политики в области обеспечения единства измерений»: «Шкала величины — упорядоченная совокупность значений величины, служащая исходной основой для измерения соответствующей величины».

Таким образом, из проведённого анализа положений вышеназванных документов следует, что шкала измерений любой величины является универсальной исходной основой для измерения (сравнения) данной величины, но при этом не используется для определения термина «метрологическая прослеживаемость», являющегося одним из ключевых в современной метрологии и опирающегося на понятие «основа для сравнения».

В общем случае определения шкал измерений могут содержать: определения измеряемых свойств (в том числе величин), определения единиц измерений, естественные или условные нули, константы и модельные функции, описания абстрактных моделей (например, цветового пространства), конкретных методов измерений (например, шкалы измерений твёрдости), системы пространственных координат и др. При этом, в зависимости от типа шкал, могут встречаться самые разнообразные, порой взаимоисключающие варианты их определений. Так, некоторые метрические шкалы, например шкалы массы и длины, достаточно полно описываются стандартизованными определениями единиц измерений; для шкал наименований и порядка понятие «единица измерений» не имеет смысла, они устанавливаются описанием конкретных методов измерений.

Поэтому «прослеживаемость к шкале измерений» является более общим понятием по отношению к «прослеживаемости к единице измерений».

О соотношении терминов «первичная референтная методика измерений», «референтная методика измерений», «эталон» с понятием «шкала измерений»

Каким образом шкалы измерений, являющиеся универсальными основами для сравнения результатов измерений, реализуются на практике?

Рассмотрим соотношение понятий «референтная методика измерений» (РМИ) и «первичная референтная методика измерений» (ПРМИ) с определённым выше понятием «шкала измерений». При этом необходимо различать понятия «принцип измерений — явление, лежащее в основе измерения», «метод измерений — общее описание логической последовательности операций при измерении» и «методика измерений (процедура измерений) — детальное описание измерения в соответствии с одним или более принципами измерений и данным методом измерений, которое основано на модели измерений и включает вычисления, необходимые для получения результата измерения» (словарь VIM 3); «метод измерений — приём или совокупность приёмов сравнения измеряемой величины с её единицей или соотнесения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений»; «методика (выполнения) измерений — установленная логическая последовательность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений в соответствии с принятым методом измерений» (PMГ 29).

В основных терминологических документах по метрологии — словаре VIM 3 и PMГ 29 — даны следующие одинаковые определения:

- референтная методика измерений: методика измерений, принятая для получения результатов измерений, которые могут быть использованы для оценки правильности измеренных значений величины, полученных по другим методикам измерений величин того же рода, а также для калибровки или для определения характеристик стандартных образцов;

- первичная референтная методика измерений: референтная методика измерений, которая используется для получения результата измерения без сравнения с эталоном единицы величины того же рода;
- первичный эталон: эталон, основанный на использовании первичной референтной методики измерений или созданный как артефакт, выбранный по соглашению.

Определение понятия «референтная методика измерений» в федеральном законе № 102-ФЗ по смыслу соответствует определениям по словарю VIM 3 и РМГ 29.

Для термина «первичная референтная методика (метод) измерений» федеральный закон № 102-ФЗ даёт следующее определение: «референтная методика (метод) измерений, позволяющая получать результаты измерений без их прослеживаемости». Отличие в формулировке от вышеприведённых определений обусловлено специфическим толкованием понятия «прослеживаемость».

Выполненный анализ смысла вышеназванных понятий позволяет рассматривать первичные референтные методики измерений, референтные методики измерений как реализации шкал измерений соответствующих величин (неразмерных свойств объекта измерений). При этом ПРМИ конкретной величины (свойства) воспроизводит шкалу её измерений с наивысшей точностью. Референтные методики измерений реализуют шкалы измерений с более высокой, по сравнению с другими (референтными или обычными) методиками измерений, точностью.

Возможны следующие варианты применения ПРМИ:

- Создание первичного эталона, основанного на использовании ПРМИ для обеспечения метрологической прослеживаемости значительного количества вторичных и рабочих эталонов, средств измерений данного измеряемого свойства. Возможно создание первичных эталонов шкал измерений неразмерных (качественных) свойств, шкал измерений порядковых величин (без единиц измерений), шкал измерений интервальных величин (с единицами измерений и условными нулями отсчёта), величин (с естественными нулями, принятыми по соглашению и относительными единицами измерений), шкал измерений многомерных величин, шкал измерений, опирающихся на системы пространственных координат.
- Использование ПРМИ в качестве исходной, более точной референтной методики измерений для обеспечения метрологической прослеживаемости измеряемого свойства.
- Использование ПРМИ непосредственно для выполнения измерений свойств конкретных объектов. При этом для выполнения измерительной процедуры используются совокупности необходимых технических устройств, средств

сравнения, средств измерений, стандартных образцов, материалов, технические и метрологические характеристики которых должны соответствовать установленным в ПРМИ требованиям допустимых отклонений от номинальных значений и метрологической прослеживаемости.

Для шкал наименований и порядка первичная референтная методика, как правило, регламентируется документом по стандартизации, однозначно описывающим способы и условия их воспроизведения. Внесение изменений в такой документ, определяющий шкалу наименований или порядка, невозможно, так как фактически означает введение новой шкалы; применяемые технические средства воспроизводят весь используемый на практике участок шкалы (пример — эталоны твёрдости).

Шкалы разностей и отношений (метрические шкалы), как правило, воспроизводятся эталонами. Эталоны этих шкал измерений могут воспроизводить одну точку шкалы (эталон массы), некоторый участок шкалы (эталон длины) или практически всю шкалу (эталон времени). Подавляющее большинство эталонов основано на использовании (первичных) референтных методик измерений.

Наряду с этим в некоторых видах измерений прослеживаемость к шкалам измерений (реализациям шкал измерений) может обеспечиваться и с помощью эталонов, являющихся артефактами (гири, меры длины и др.), или стандартных образцов, принятых по соглашению (измерения физико-химического состава и свойств веществ, аналитические измерения в области лабораторной медицины и др.).

Тем не менее основным инструментом обеспечения метрологической прослеживаемости являются ПРМИ, РМИ, как реализации соответствующих шкал измерений. И именно поэтому есть все основания говорить о прослеживаемости ПРМИ, РМИ к шкалам измерений.

Заключение

На основе выполненного анализа смысла рассмотренных понятий и сформулированных более общих определений предлагается следующая иерархия понятий метрологической прослеживаемости.

1. Измеряемое свойство (количественное — порядковая, скалярная, многомерная величина; качественное — неразмерное свойство).
2. Шкала измерений — исходная основа для сравнения различных проявлений неразмерного свойства или величины.
3. Метод сравнения различных проявлений измеряемого свойства при реализации шкалы измерений.
4. Первичная референтная методика измерений, референтная методика измерений — реализации шкал измерений соответствующих величин (свойств объекта измерений).
5. Метрологическая прослеживаемость.

Как уже было сказано выше, в федеральном законе № 102-ФЗ, словаре ВIM 3 и РМГ 29 отсутствуют общие определения понятий «метрологическая прослеживаемость», «основа для сравнения», «первичная референтная методика измерений», охватывающие все виды измеряемых свойств и вариантов основ для сравнения.

Опираясь на определение термина «шкала измерений» в соответствии с РМГ 83, можно дать следующие определения понятий:

- метрологическая прослеживаемость (к шкале измерений) — свойство метода измерений, методики измерений, эталона, средства измерений или результата измерений, в которых исходной основой для сравнения является определение конкретной шкалы измерений через её практическую реализацию;
- исходная основа для сравнения — определение шкалы измерений через её практическую реализацию;
- первичная референтная методика измерений — документированная детально описанная логически последовательная процедура соотнесения различных проявлений измеряемого свойства к значениям по шкале измерений этого свойства. ПРМИ может документально объединять по смыслу определения измеряемого свойства, шкалы измерений и метода сравнения.

Список литературы

1. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога: справочник. — М.: Издательство стандартов, 1991. — 79 с.
2. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. — М.: ВНИИФТРИ, 2004. — 222 с.
3. Брянский Л.Н. Непричёсанная метрология. — 2-е издание, перераб. и дополн. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. — 276 с.
4. Дойников А.С., Брянский Л.Н., Крупин Б.Н. Справочник по метрологии. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. — 144 с.
5. Дойников А.С. Лекции по метрологии. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. — 292 с.
6. Статьи по метрологии: Метрология, Измеряемое свойство, Измеряемая величина, Измерение, Результат измерения, Шкала измерений, Единица измерений, Международная система единиц и др. // Большая российская энциклопедия (БРЭ): [сайт]. — 2005. — Т. 1. — 2017. — Т. 35. — URL: www.bigenc.ru.

Статья поступила в редакцию: 29.03.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 26.03.2021 г.

Статья принята в работу: 01.04.2021 г.