

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА КАК МЕХАНИЗМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОВЕРИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Серенков П.С., Савкова Е.Н.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Обоснована необходимость разработки системного подхода к моделированию измерений с целью обеспечения заданного уровня доверия к их результатам. Решение измерительной задачи с учетом поставленной цели рассматривается как последовательное создание линейки моделей: модели процесса измерений и комплексной модели измерительного канала. В качестве доказательной основы обеспечения доверия к результату измерений сформулирован комплекс критериев полноты и неизбыточности.
(E-mail: Pavel_Serenkov@mail.ru)*

Ключевые слова: степень доверия, результат измерений, моделирование измерений, системный подход.

Введение

В современной метрологии наблюдается эволюция подходов к оцениванию точности измерений, что обусловлено расширением потребностей рынка в «достоверных, надежных, сопоставимых и эквивалентных» результатах, являющихся объективной основой принимаемых решений при контроле, испытаниях, учете энергоресурсов и других областях [1]. К сожалению, в настоящее время в метрологической практике имеет место децентрализация в разработке и применении подходов и методов оценивания точности измерений, что зачастую является причиной конфликтных ситуаций на рынке, например, когда возникает вопрос о признании результатов измерений (испытаний).

Прежде всего, это относится к неоднозначности понятия точности как важнейшего показателя качества процесса измерений. РМГ 29-99, VIM [2], СТБ ISO 5725 по-разному трактуют и определяют *точность результата измерений* (точность измерений).

Неоднозначность присуща также *представлению точности измерений*. Например, для описания точности метода измерений (испытаний) СТБ ISO 5725 предписывает применение двух понятий: правильность и прецизионность. Правильность касается близости между средним арифметическим значением большого числа результатов испытаний (измерений)

и истинным или принятым эталонным значением, а прецизионность характеризует близость между результатами измерений.

Можно также встретить целый ряд подходов к описанию результата измерения как интервала с заданным уровнем достоверности, среди которых стоит отметить четыре базовых: подходы на базе теории погрешностей, концепции неопределенности, подходы Международной электротехнической комиссии (IEC) и гибридный. Соответствующие им нормативные документы (на базе теории погрешностей – ГОСТ 8.207, МИ 1317, МИ 1552, концепции неопределенностей – GUM, СТБ ISO 5725, ISO/TC 21748), разработанные в разное время, устанавливают правила по обработке результатов измерений. Однако в них не делаются явные акценты на аспектах системного подхода, что зачастую является причиной разногласий при оценке соответствия и контроле продукции.

Таким образом, результаты измерений, представляемые как интервалы с заданными уровнями доверия, используемые для «внутренних» (операционный контроль, арбитражная перепроверка, поверка, градуировка, калибровка, исследовательские измерения) и «внешних» (сертификационные испытания, валидация методов измерений) целей, очевидно, должны сопровождаться информацией о том, в каких именно условиях прецизионности (повторяемо-

сти, воспроизводимости, промежуточных) они получены, поскольку от этого зависит ширина интервалов охвата, а следовательно, и риски поставщика и потребителя.

В условиях непрекращающейся глобализации мирового рынка растет необходимость взаимного признания результатов оценки соответствия продукции и услуг (в том числе результатов испытаний). Актуальность решения данной проблемы стимулирует научно-практическое развитие доказательной базы метрологии. Логика системного анализа требует упорядочения в описании результата измерений с позиций целей, применяемых методов и подходов, что может быть достигнуто посредством методологии метрологического моделирования.

Системный подход как инструмент обеспечения доверия к результату измерения

Согласно РМГ 29-99, *результат измерений* – значение величины, полученное путем ее измерения или, согласно VIM, набор значений величины, который приписывается измеряемой величине вместе с любой другой доступной важной информацией. Для решения проблемы обеспечения заданной степени доверия к результату измерения рационально подключить

системный анализ как «методологию решения крупных проблем» [3]. Процессный механизм решения проблемы предполагает, что одновременно с целенаправленными преобразованиями свойств объекта появляются и накапливаются так называемые потери качества, основной причиной которых является неизбежная вариация свойств участвующих в преобразовании ресурсов. Следовательно, выявление и структуризацию влияющих факторов следует производить в соответствии со структурой процесса, формирующего конечной результат деятельности системы. Очевидно, что необходимым условием обеспечения целостности модели измерительной задачи является корректно построенная модель процесса измерения как системы. С позиций стандартов ISO серии 9000 результативностью процесса формально можно управлять по двум направлениям: 1) через структуру процесса (организационная составляющая процесса); 2) через качество ресурсов, участвующих в преобразовании или добавлении ценности (техническая составляющая процесса). Применительно к процессу измерений (испытаний), результативность которого объективно определяется степенью доверия к результатам измерений, данная концепция может быть представлена, как показано на рисунке [4].



Рисунок – Концепция управления результативностью процесса измерения с позиций стандартов ISO серии 9000

В нашем случае в роли организационной составляющей, планирующей, обеспечивающей, реализующей процесс измерения в управляемых условиях и постоянно совершенствующей его выступает, например, аккредитованная измерительная (испытательная) лаборатория. В роли технической составляющей выступают элементы процесса измерения (испытания) методики, измерительное оборудование, персонал, условия и др. Эти две составляющие оценки представляют собой единое целое, обеспечивающее достаточную для данного этапа развития общества степень доверия к протоколам измерений (испытаний). В данной работе внимание сконцентрировано на технической составляющей – собственно измерительном процессе.

Результат измерений представляет собой реализацию случайной величины (ее аппроксимацию), диапазон значений с заданной вероятностью, типичная форма представления которой $Y = Y_0 \pm U_p, P$. Очевидно, что доверительная вероятность P только в первом приближении может служить оценкой степени доверия к результату измерений. Это первое приближение определяется рядом ограничений, в частности условиями организации процесса измерения, обеспечивающими уверенность в том, что все установленные требования соблюдены. С позиций классического системного анализа алгоритмически процесс получения значения результата измерений может быть сведен к двум основным этапам:

1) выявление и структуризация влияющих на измеряемый параметр качества продукции факторов, точнее на его неопределенность;

2) планирование и организация измерительного эксперимента, сбор, преобразование, анализ и обработка измерительной информации.

Естественно, простота алгоритма обманлива. На каждый из этапов накладываются ограничения, связанные с целым рядом обстоятельств.

Этап 1. Решаемая задача – разработка процессной модели измерения

Данный этап является наиболее критичным с позиций степени доверия к результатам измерений, поскольку часто основан на использовании менее затратного квалитетического аппарата при оценивании значимости источников изменчивости. В метрологической практике разработан целый ряд методов и приемов, об-

легчающих выявление и поиск данных источников:

- рекомендации классической теории погрешностей по группированию в инструментальную, методическую, субъективную, а также обусловленную изменением условий измерения составляющие (ГОСТ 8.009, ГОСТ 8.010, РМГ 29-99, МИ 1552);

- список факторов в концепции неопределенности, начиная с «а» – «неполного определения измеряемой величины» и заканчивая «j» – «изменениями в повторных наблюдениях измеряемой величины при явно одинаковых условиях» [5];

- причинно-следственные диаграммы, в которых источники неопределенностей результата измерения приписываются различным частям измерительной системы, например, S.W.I.P.E. (Эталон. Деталь. Измерительный прибор. Человек. Процедура и Окружающая среда), P.I.S.M.O.E.A. (Деталь. Измерительный прибор. Эталон. Метод. Оператор. Окружающая среда. Допущения) [6];

- методические указания ЕВРАХИМ СИТАК по четырехэтапному анализу составляющих суммарной неопределенности с наличием обратной связи;

- перечисление наиболее значимых факторов в эмпирическом подходе по СТБ ISO 5725: оператор, используемое оборудование, калибровка оборудования, условия окружающей среды (температура, влажность, загрязнение воздуха и т.д.), время, проходящее между измерениями.

Из перечисленных подходов лишь последний дает рекомендации относительно конкретных условий формирования интервала охвата – повторяемости, воспроизводимости и промежуточной прецизионности.

Все приведенные методы относятся к категории так называемых простых методов, которые в условиях все возрастающих требований к степени доверия к результатам измерений (испытаний) уже не могут обеспечить должного уровня чувствительности.

Решение данной проблемы следует искать в основах системного подхода, в частности в обеспечении критерия полноты информации для формирования и принятия эффективного решения. Данная задача обеспечения полноты множества факторов является прерогативой системы сбора и анализа данных, моделирование которой ставит своей целью получение инфор-

мации, адекватной действительному состоянию процесса. Инструментом достижения критерия полноты, очевидно, является корректная модель процесса измерения, которая, как и в случае с организационной составляющей, объективно обеспечивает прозрачность в понимании механизма идентификации влияющих факторов, является необходимым условием обеспечения доверия к результату измерения [8, 9].

Корректная модель процесса измерения является основой цельной методологии моделирования измерительного канала, ориентированной, с одной стороны, на *полный жизненный цикл измерения*, а с другой – на *конечные цели измерения*.

Ориентирование на полный жизненный цикл измерения предполагает, что корректно построенная на первом этапе функциональная модель, описывающая структуру, взаимосвязи и взаимодействия процессов преобразования измерительной информации на всем протяжении измерительного канала, формирует структуру модели измерительного канала. Последняя, в свою очередь, являясь своего рода скелетом модели количественной оценки рассеяния результата измерения, обеспечивает выполнение критерия полноты информации [8].

Ориентирование на конечные цели предполагает, что измерения, согласно МИ 1317, не являются самоцелью, а имеют определенную область использования, т.е. проводятся для достижения некоторого конечного результата, который не обязательно представляет собой оценку истинного значения измеряемой величины в зависимости от назначения измерений. Практикой применения концепции неопределенности в отношении подходов и методов сформулировано правило разумной достаточности: «Цель определяет средства ее достижения» [9].

Этап 2. Решаемая задача – создание модели измерительного канала на основе модели процесса измерения

Так, если измерения являются частью контроля, то конечным результатом будет заключение о соответствии (несоответствии) объекта по рассматриваемому параметру; применительно к испытаниям – оценка состояния объекта; в диагностике – технический диагноз и т.д. Таким образом, окончательная модель измерения и результата формируется исходя из конечной цели измерений.

Ориентирование на конечные цели измерений при построении модели измерительного канала позволяет регламентировать процесс выявления и учета вкладов источников изменчивости по всему жизненному циклу измерения. Процессная модель измерения, отрабатывая критерий полноты измерительной информации, обеспечивает возможность идентификации источников изменчивости практически до бесконечности. Формирование доверительного интервала результата измерений является своего рода компромиссом между затрачиваемыми ресурсами и получаемой на выходе канала точностью результата [9]. Трудоемкость измерений, прежде всего, определяется множеством оцениваемых факторов, рациональность которого определяется, в свою очередь, критерием избыточности. Задача обеспечения избыточности множества факторов является ключевой в повышении эффективности измерений.

Организационно решение задачи достижения максимальной эффективности процесса измерения по критерию «точность/трудоемкость» (избыточность оцениваемых факторов) при заданной степени доверия может быть достигнуто через обратную связь между входами и выходами модели измерительного канала, что позволяет осуществлять активное управление измерительным процессом, основываясь на принципе необходимости и достаточности затрачиваемых ресурсов: методов получения данных, применяемых технических средств, человеческих ресурсов, процедур обработки данных.

Анализ проблемы обеспечения заданной степени доверия к результатам измерений с учетом приведенных выше ограничений позволил сделать вывод, что модель измерительного канала в общем случае не является однородной.

Наиболее рациональной нами принята двухуровневая структура модели измерительного канала, приведенная в таблице. Иерархическая структура модели измерительного канала позволяет решать метрологическую задачу, применяя принцип стратификации – поэтапно. Например, решение задачи планирования измерения может выглядеть следующим образом. В зависимости от конечных целей измерений выбирается одна из трех моделей второго уровня. Для выбранного варианта модели формулируются требования к точности оценки величины A , что можно считать исходными данными для полного определения этой модели. В свою оче-

редь, модель второго уровня однозначно определяет модель первого уровня как модель единичного измерительного канала. Практически реализация моделирования заключается в построении физической и математической моделей объекта измерений, спецификации измеряемой величины, формулировке измерительной

задачи, планировании и организации эксперимента с позиций «опережающей точности» и ресурсных затрат, разработке математической модели измерения (модели математических ожиданий и рассеяния) и ее анализе, определении интервала охвата результата измерений, принятии решения.

Таблица

Двухуровневая структура модели измерительного канала

Модель	Сущность	Реализация модели, область применения
I уровень		
Модель единичного измерительного канала	$Y = Y_0 \pm U, P$	<i>Назначение</i> – найти значение величины Y в виде интервала охвата с заданным уровнем достоверности; <i>Типичный вид измерений</i> – прямые; <i>Область применения</i> – все модели второго уровня.
II уровень		
Модель присвоения (идентификации)	$A = Y \in Y_0 \pm U$	<i>Назначение измерительного канала</i> – определить значение величины A . <i>Область применения:</i> - прямые измерения в научных исследованиях; - определение значений констант; - дискретная (точечная) градуировка; - калибровка средств измерений и т.д.
Модель сравнения	$[Y_{min}] \leq A = Y \leq [Y_{max}]$	<i>Назначение измерительного канала</i> – определить путем сравнения, факт принадлежности значения величины A заданному диапазону значений. <i>Область применения:</i> - все виды контроля и испытаний; - аттестация, поверка, калибровка средств измерений; - верификация, валидация результатов и методов измерений и т.д.
Модель взаимосвязи	$A = f(Y_i \in Y_{i0} \pm U_i)$	<i>Назначение измерительного канала</i> – определить значение величины A косвенно, через функцию связи f с одним или группой значений величин Y_i – результатов реализаций единичных измерительных каналов. <i>Область применения:</i> - косвенные измерения, использующие неоднородные единичные измерительные каналы, например измерение силы тока с использованием закона Ома через измерения значений напряжения и сопротивления цепи; - косвенные измерения, использующие однородные единичные измерительные каналы, например измерение отклонения от плоскостности поверхности детали

Следует отметить, что предлагаемый подход нашел свое отражение в ряде нормативных документов для решения частных типовых измерительных задач. Например, частично модель присвоения в контексте теории погрешностей проработана в ГОСТе 8.207, МИ 1552, МИ 1317, а в контексте концепции неопределенностей – в GUM [5]. Применительно к испытаниям модель сравнения достаточно полно прописана в СТБ ISO 5725. В зависимости от различных условий реализации испытаний (условий повторяемости, промежуточной прецизионности и воспроизводимости), которые рассматриваются как исходные данные и должны определяться договором, контрактом или требованием ТНПА, приведены модели математического ожидания и вариации результата, методика планирования и организации измерительного эксперимента, методика обработки измерительной информации, критерии оценки [10]. Модель взаимосвязи для целей химического и спектрального анализа регламентирована GUM и ISO/TC 21748.

Выводы

Обоснована необходимость разработки системного подхода к моделированию измерений с целью обеспечения заданного уровня доверия к их результатам. Предложена реализация системного подхода в виде линейки моделей: модели процесса измерений и комплексной модели измерительного канала. Последняя, в свою очередь, имеет двухуровневую структуру, что позволяет упорядочить методы планирования, сбора, обработки и анализа измерительной информации и подходы к описанию результата измерений. При этом модель первого уровня, являющаяся основой методологии метрологического моделирования, формируется для каждой входной величины исходя из области применения измерений (модель второго уровня) и принципа «опережающей» точности с учетом критерия минимизации затрат ресурсов измерительной лаборатории. Модель второго уровня включает также решение вопросов организационного характера: при контрактных условиях заказчик и исполнитель должны согласовать эталонные значения величин, условия прецизионности и способы обработки измерительной информации.

Основное преимущество предлагаемого подхода заключается в том, что он на основе

принципов системного и процессного подходов, а также критериев полноты и избыточности обеспечивает доказательную базу для оценки степени доверия к результату измерений.

Список использованных источников

1. Отчеты консультативных комитетов Международного комитета мер и весов. Документы 23-й Генеральной конференции мер и весов. – Минск : Белорусский государственный институт метрологии, 2003. – С. 93.
2. ISO/IEC Руководство 99. Международный словарь по метрологии – Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM).
3. Оптнер, С.Л. Системный анализ: этап развития методологии решения проблем в США / С.Л. Оптнер; пер. с англ. С.П. Никанорова. – М. : Прогресс, 1969. – 254 с.
4. Серенков, П.С. Развитие доказательной базы метрологии на основе принципов системного подхода / П.С. Серенков // Метрология и приборостроение. – Минск, 2009. – № 1. – С. 8–11.
5. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
6. DaimlerChrysler, Ford, General Motors (2002), Measurement Systems Analysis 3rd Edition, available from Carwin Ltd., UK (www.carwin.co.uk/qs).
7. Серенков, П.С. Научно-методические аспекты современной метрологии / П.С. Серенков, Н.А. Жагора, Е.Н. Савкова // Метрология и приборостроение. – Минск, 2010. – № 2. – С. 13–21.
8. Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. Методология организационного проектирования инженерной составляющей системы менеджмента качества : монография / П.С. Серенков. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – 491 с.
9. Серенков, П.С. Концепция измерения, основанная на процессном подходе / П.С. Серенков, Е.Н. Савкова // «Стандартизация, метрология и сертификация: интеграция в международное пространство» : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию Независимости Республики Казахстан / Астана, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2011. – С. 31–34.
10. Серенков, П.С. Систематизация факторов, влияющих на ширину интервала охвата результата измерения / П.С. Серенков, Е.Н. Савкова // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2011», Минск, БНТУ, 2011. – С. 227–229.

Serenkov P.S., Savkova E.N.

The system approach to measuring channel modelling as the mechanism of maintenance of trust to results of measurements

Necessity of system approach development to measurement modeling for the purpose of maintenance of the trust set level to their results is proved. The decision of a measuring problem subject to determined aim is considered as creation of models sequence: measurement process model and complex measuring channel model. As a demonstrative basis of maintenance of trust to result of measurements the complex of criteria of completeness and irredundant is formulated. (E-mail: Pavel_Serenkov@mail.ru)

Key words: degree of belief, result of measurements, modelling of measurements, the system approach.

Поступила в редакцию 01.02.2012.