

Нормирование точности и подтверждение соответствия в радиационном контроле

Е. И. ГРИГОРЬЕВ, В. П. ЯРЫНА

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: grig@vniiftri.ru

Сформулировано понятие «нормы точности» для области радиационных измерений. В соответствии с международными рекомендациями для количественного выражения точности измерений использовано понятие «неопределенность результата» и показано его применение в задачах радиационного контроля объектов. Сформулированы основные принципы применения критериев соответствия получаемых результатов нормативам безопасности. Дан пример критериев соответствия для одной из типовых ситуаций радиационного контроля.

Ключевые слова: радиационные измерения и контроль, нормы точности, неопределенность, критерии соответствия.

The concept of «accuracy standards» for radiation measuring area is formulated. According to international recommendations for quantitative expression of measurements accuracy the concept «uncertainty of result» is used and its application in problems of objects radiation control is shown. The main principles of application of conformity criteria of control results to safety standards are formulated. The example of conformity criteria for one of typical situations of the radiation control is given.

Key words: radiation measurements and control, accuracy standards, uncertainty, conformity criteria.

Под радиационным контролем (РК) понимаются измерения величин, характеризующих источники и поля ионизирующих излучений, а также радиационное облучение объектов (включая биологические), выполняемые для контролируемого объекта с целью определения (подтверждения) его соответствия установленным нормам, прежде всего нормам радиационной безопасности.

Очевидно, что РК предполагает наличие нормативов контроля (контрольных уровней), признаваемость результатов измерений всеми заинтересованными сторонами, а также

наличие критериев соответствия результатов измерения (контроля) установленным нормативам. Последнее важно, поскольку РК объективно присущи значительные неопределенности, обусловленные как стохастической природой излучения и его регистрации, так и присутствием существенных влияющих величин, без учета которых невозможно корректно интерпретировать результаты измерений.

Признаваемость результатов радиационных измерений имеет чрезвычайно важное социально-психологическое и, как следствие, экономическое значение. Как показали не-

давние события на АЭС «Фукусима» в Японии, спустя 25 лет после катастрофы на Чернобыльской АЭС у значительной части населения во всем мире сохраняется радиофобия, что, кроме недостаточности знаний, связано и с недоверием к результатам РК.

С метрологической точки зрения, признаваемость результатов радиационных измерений характеризуется их прослеживаемостью к эталонам единиц соответствующих величин, достоверностью, т. е. корректной оценкой их неопределенности, и подтверждением компетентности исполнителей РК. Последнее решается аккредитацией лабораторий РК в рамках государственной системы обеспечения единства измерений.

Обобщающей характеристикой признаваемости результатов измерений является их точность. Понятие «точность результата измерений» — качественная характеристика [1], отражающая близость измеренного значения к истинному значению измеряемой физической величины. Основными количественными характеристиками точности результата измерений являются его погрешность и (или) неопределенность.

Погрешность результата измерения — это отклонение результата от истинного значения измеряемой величины (такое определение является классическим как в отечественной, так и в зарубежной метрологии). Учитывая принципиальную непознаваемость истинного значения, его заменяют «условно истинным» («действительным») значением величины, представляющим собой наилучшее для данной цели приближение к истине. Характерным примером условно истинного значения является значение величины, воспроизводимой эталоном при калибровке средства измерений (СИ), при этом основная погрешность СИ определяется как допустимое отличие его показания от значения эталонной величины. Очевидно, что понятие «погрешность» результата измерения целесообразно применять в тех случаях, когда существует (обеспечена) возможность определения отклонения результата от условно истинного значения измеряемой величины. Практическим примером может служить измерение откалиброванным прибором в нормальных условиях измерений [1], т. е. условиях, настолько близких к регламентированным условиям калибровки прибора, что воздействием влияющих факторов на результат измерения можно пренебречь. В этом случае погрешность результата измерения (показания прибора) равна основной погрешности прибора с учетом реальной статистической погрешности измерения. Норма точности таких измерений — допускаемая суммарная погрешность результата и полный перечень ограничительных условий измерения.

Для радиационных измерений любого вида (радиометрия, спектрометрия, дозиметрия) характерным является наличие влияющих факторов, в разной степени присутствующих в реальных условиях измерений. Калибровка СИ представляет собой процедуру передачи размера радиационной величины от эталона этой величины с целью установить калибровочное соотношение между показанием (откликом) СИ и измеряемой величиной. Полученное калибровочное соотношение справедливо только при выполнении строго установленных (регламентированных) условий калибровки, если эти условия воспроизводятся при измерении, то они называются «нормальными условиями измерений». Реальные условия радиационных измерений практически всегда отличаются от условий калибровки СИ, отклонение реаль-

ного условия от регламентированного (нормального) является влияющим фактором, вызывающим изменение показания СИ, которое необходимо оценить и учесть введением соответствующего поправочного коэффициента (поправки) к показанию СИ. Таким образом, результат радиационного измерения связан с показанием прибора (радиационного поправочный множитель) и значениями поправок на влияющие факторы. Для уравнений такой связи в публикации МЭК [4] рекомендован термин «модельная функция измерений», который будет использоваться в данной работе. Обозначим A — результат радиационного измерения; N — показание (отклик) СИ; g — калибровочный коэффициент; $\prod_j k_j$ — произведение поправок на влияющие факторы, где j — индекс влияющего фактора. Результат радиационного измерения в реальных условиях выражается модельной функцией

$$A = gN \prod_j k_j. \quad (1)$$

В области радиационных измерений реальными являются такие влияющие факторы, для которых учитывающие их воздействие поправки k_j могут на десятки процентов и в разы отличаться от единицы и оказывать существенное влияние на точность измерений. Очевидно, что количественные характеристики точности измерений будут зависеть от конкретных реальных условий и должны определяться в процессе измерения. Понятие норм точности, сформулированное для погрешности, в этом случае практически не применимо.

С целью достижения международного единства по вопросу количественного выражения точности измерений под эгидой Международного Бюро мер и весов (МБМВ) была создана Рабочая группа из экспертов основных международных организаций, включая Международную организацию по стандартизации (ИСО), которая разработала концепцию неопределенности измерения и на ее основе руководящий документ — «Руководство по выражению неопределенности измерения» [3]. (Далее — Руководство.) Понятие «неопределенность результата измерения» следует понимать как интервал вокруг измеренного значения, внутри которого с известной доверительной вероятностью находится истинное значение величины. Руководство [3] устанавливает общие правила вычисления и выражения неопределенности результата измерения, содержит теоретические обоснования и примеры высокоточных измерений и рассчитано на высокую квалификацию пользователя, поэтому его внедрение в практику измерений предполагает разработку национальных стандартов, основанных на Руководстве, и других документов, ориентированных на конкретные виды измерений и адресованные пользователям разной квалификации. Таким внедренческим документом является межгосударственная рекомендация [4]. Сложившаяся практика показала, что до непосредственных исполнителей измерений правила и процедуру вычисления неопределенности целесообразно доводить в составе методических документов, посвященных конкретному виду измерений и отражающих его специфику, например, в методиках выполнения измерений (МВИ) или в методиках выполнения контроля (МКВ).

Отметим важнейшие особенности понятия «неопределенность», отличающие его от понятия «погрешность».

1. Неопределенность не основывается на применении непознаваемой величины — «истинного значения» (погреш-

ность — отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины). Неопределенность только указывает, что в оцененном интервале вокруг результата измерения находится истинное значение величины.

2. Неопределенность не использует классификацию на «случайную» и «систематическую». Составляющие неопределенности делятся на два вида в соответствии с методами их оценки: неопределенность, вычисляемая статистическими методами — статистическая неопределенность (неопределенность типа А), и неопределенность, оцениваемая любыми другими методами (неопределенность типа В).

3. Концепция неопределенности не нуждается в классификации измерений на прямые, косвенные и др. Установлены единые правила вычисления и выражения неопределенности для всех классов измерений.

4. Все составляющие суммарной неопределенности результата (неопределенности входных величин модельной функции) должны быть выражены в виде стандартных отклонений (стандартных неопределенностей). Суммарная стандартная неопределенность результата получается путем соответствующего суммирования всех составляющих стандартных неопределенностей (с единым подходом к типам А и В). Расширенная неопределенность образуется умножением стандартной неопределенности на коэффициент охвата (коэффициент расширения), значение которого зависит от назначенной доверительной вероятности неопределенности.

Объем и уровень сложности представленного здесь материала и модельная функция (1) соответствуют наиболее характерным задачам практических радиационных измерений и не касаются многих аспектов, содержащихся в Руководстве, например, вопросов корреляции входных параметров, анализа степеней свободы и др. Рассмотрим пример вычисления относительной суммарной стандартной неопределенности результата измерения, определенного модельной функцией (1). Неопределенности всех входных величин должны быть выражены в виде стандартных (в данном случае относительных) неопределенностей: показание N средства измерений охарактеризовано статистической стандартной неопределенностью σ_N типа А, калибровочный множитель g — стандартной неопределенностью u_g типа В, поправки k_j — стандартными неопределенностями u_j типа В, возможная неточность модельной функции — стандартной неопределенностью u_m типа В. Суммарная стандартная неопределенность результата измерения вычисляется по формуле

$$u_A = \sqrt{\sigma_N^2 + u_g^2 + u_m^2 + \sum_j u_j^2}.$$

Получение стандартных неопределенностей из информации, которой располагает исполнитель измерений, — это действия и приемы, характерные для каждой конкретной измерительной задачи, которые должны быть изложены в соответствующей целевой методике (МВИ или МВК). Чаще всего неопределенности поправок заданы в виде максимальных пределов или для доверительной вероятности 0,95 (обозначение U), обычно (если нет другого обоснования) им приписывают прямоугольное (равномерное) распределение, и стандартную неопределенность вычисляют как $u = UI\sqrt{3}$. Отметим, что неопределенность результатов

радиационных измерений (РК) при окончательном оформлении необходимо выражать для доверительной вероятности 0,95. Коэффициент расширения для каждого типового случая измерений определяют из анализа конкретных составляющих неопределенности и вводят при разработке целевой методики.

В большинстве практических радиационных измерений приемлемо значение коэффициента, равное 2.

Понятие «радиационный контроль» объекта трактуется [5] как «радиационные измерения, выполняемые для контролируемого объекта...». Результат таких измерений должен характеризовать объект в целом, а не отдельные его фрагменты (геометрические или временные). В общем виде РК объекта представляет собой развернутое измерение, включающее радиационные измерения в разных точках по геометрии объекта или во времени (точечные измерения) и процедуру распространения полученных точечных результатов на объект в целом. Такая процедура разрабатывается в рамках МВК для конкретного объекта и обычно основывается на экспериментальном или расчетном изучении распределения контролируемой величины по объекту, что вносит дополнительную к точечным измерениям неопределенность в результат РК объекта. Способ учета этой составляющей также должен быть установлен в МВК. Чтобы избежать путаницы под термином «радиационное измерение» при выполнении РК объекта следует понимать точечное (в пространстве или во времени) радиационное измерение на объекте контроля. Конечный результат РК должен быть представлен в виде $A(1 \pm U)$, где A — значение физической величины, измеренное в соответствии с модельной функцией (1); U — относительная суммарная неопределенность величины A , оцененная для доверительной вероятности 0,95.

Важнейшая особенность радиационных измерений (контроля), определяющая подход к установлению точностных требований к результатам, состоит в том, что результат радиационных измерений (РК) зависит от влияющих факторов, которые в разной степени, но всегда присутствуют при измерении, отражая различие условий конкретных измерений. Значение неопределенности результата оценивают в процессе каждого измерения, учитывая конкретные условия и вызванные ими влияющие факторы. Названная особенность является основной причиной того, что стандарт [6] для области радиационных измерений имеет ограниченное (информационное) применение. Очевидно, что нормой точности таких измерений (точностными требованиями) не может быть единственное значение неопределенности, универсальное для всех возможных условий измерения. В современной практике точностные требования к радиационным измерениям задают в виде диапазона значений неопределенности, характерного для конкретной измерительной задачи. Границы диапазона определяют из анализа возможной (допустимой) изменчивости условий измерения и возникающих из-за этой изменчивости диапазонов неопределенностей входных величин (из модельной функции измерения). Наиболее приближенными к непосредственному исполнителю измерений нормативно-методическими документами, регламентирующими измерительную задачу, являются МВИ, МВК. Всесторонние требования к таким методикам установлены для методического обеспечения РК в различных нормативных документах системы САРК (Система аккредитации лабораторий радиационного контроля). Современное состояние методического обеспечения изложено в [7]. Имен-

но методика устанавливает границы условий, при которых могут выполняться нормированные измерения (измерения с указанной нормой точности), сюда входят и требования к допускаемому СИ (или их перечень), а также способ вычисления суммарной неопределенности и ее составляющих. Совокупность этих ограничений и регламентаций составляет ограничительные условия применения методики. Отсюда следует определение понятия «нормы точности радиационных измерений»: это допускаемый диапазон суммарной неопределенности результата при доверительной вероятности 0,95 с ограничительными условиями, установленными применяемой методикой измерений.

Нормирование точности радиационных измерений — это процедура установления норм, представляющая собой исследование и назначение обоснованного диапазона неопределенности результата, разработку и назначение ограничительных условий измерений и установление правил вычисления неопределенностей. Очевидно, что такая процедура должна выполняться при разработке каждой конкретной методики измерений.

Подтверждение соответствия результатов РК установленным нормативам безопасности объекта контроля является завершающей стадией контроля. Суть оценки соответствия состоит в том, что полученный результат РК объекта необходимо сопоставить с нормативом и сделать вывод о степени соответствия контролируемого радиационного параметра установленному нормативу. Способ такого сравнения индивидуален для каждого конкретного вида РК и должен быть сформулирован в виде критериев соответствия в МВК на данный вид РК. Применяемые в различных методиках РК критерии соответствия, не обусловленные единым подходом, отражают частное представление разработчика методики и могут служить источником отличающихся трактовок радиационной ситуации. В публикации [8] детально представлены общие принципы, подходы и критерии соответствия, введенные нормативными документами в практику РК на атомных станциях. В качестве основных принципов при оценке соответствия приняты:

сравнение результата контроля с нормативом обязательно должно проходить с участием неопределенности результата измерения контролируемого параметра. Критерий соответствия должен ясно показывать, что снижение неопределенности измерения является инструментом повышения достоверности оценки соответствия. Неприемлемым является подход с введением в критерий соответствия каких-либо параметров, нивелирующих требования качества (точности) измерений;

сравнение результатов РК с нормативами безопасности выполняется с применением принципа консервативности оценки соответствия, что реализуется использованием «предельного значения» контролируемого параметра, равного сумме измеренного значения и суммарной расширенной неопределенности результата измерения (для $P = 0,95$).

На основе анализа существующих объектов РК и его видов в [8] выделены четыре типовые ситуации, для которых сформулированы общие подходы к установлению критериев соответствия. Кратко эти типовые ситуации названы: РК с полной суммарной неопределенностью, с допускаемой вариативностью объекта, с использованием физической модели, радиационный мониторинг. В качестве примера реализации названных общих принципов ниже рассмотрены критерии соответствия для типовой ситуации, когда нор-

мируемый контролируемый параметр характеризует объект в целом, а его суммарная неопределенность гарантирована учитывает все влияющие факторы, включая неравномерность распределения параметра по объекту во времени и (или) пространстве. Если радиационная безопасность объекта определяется одним контролируемым параметром (многофакторное воздействие), то оценка соответствия (мощность в сравнении значения указанного параметра с заданным нормативом этой величины (основные нормативы, различные контрольные уровни) и выдаче заключения о соответствии).

Исходными данными для оценки соответствия при многофакторном воздействии должны быть: A — значение контролируемого параметра для объекта, измеренное в соответствии с принятой модельной функцией контроля; U — относительная суммарная неопределенность параметра A (для $P = 0,95$); L — норматив для параметра A , относительного которого оценивают соответствие.

Объект безусловно соответствует нормативу при выполнении соотношения

$$A(1 + U) \leq L.$$

Объект безусловно не соответствует нормативу при выполнении соотношения

$$A(1 - U) > L.$$

Объект возможно соответствует нормативу при одновременном выполнении соотношений

$$A(1 + U) > L, \quad A(1 - U) \leq L. \quad (2)$$

Критерий (2) означает, что при его выполнении существует возможность достижения соответствия нормативу путем более точных измерений контролируемого параметра (уменьшением неопределенности U).

В случае многофакторного воздействия исходные данные для оценки соответствия должны включать: A_i — измеренные значения всех контролируемых парциальных параметров (i — вид параметра); u_i — относительные стандартные суммарные неопределенности каждого параметра (парциальные стандартные неопределенности); L_i — нормативы для каждого парциального параметра.

Объект безусловно соответствует всем нормативным требованиям при выполнении соотношения

$$\sum_i \frac{A_i}{L_i} + 2 \sqrt{\sum_i \left(\frac{A_i u_i}{L_i} \right)^2} \leq 1.$$

Для всех видов контроля (измерительных задач), в которых результат РК и его неопределенность отвечают требованиям данной типовой ситуации, процедура оценки соответствия должна базироваться на установленных выше критериях соответствия, и для каждого конкретного вида контроля в соответствующей МВК должен быть изложен регламент такой процедуры. Для других трех типовых ситуаций, названных в [8], рекомендованы свои типовые критерии, удовлетворяющие общим принципам оценки соответствия.

В заключение подчеркнем необходимость применения понятия «неопределенность» для количественного выраже-

Измерения ионизирующих излучений

ния точности измерений в РК и обязательность его использования при оценке соответствия.

Для оценки неопределенности результата обычно требуется больше квалифицированных усилий, чем для проведения самих измерений. В то же время процесс анализа неопределенностей позволяет обеспечить наилучшую оценку измеряемой величины, что вполне компенсирует затраченные усилия, особенно в критических ситуациях подтверждения соответствия.

Л и т е р а т у р а

1. **PMГ 29—99.** Метрология. Основные термины и определения.

2. **IEC TR 62461.** Технический отчет МЭК. Измерительная аппаратура для защиты от радиации. Определение неопределенности измерения. Первое издание. 2006—12.

3. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.** Geneva: ISO, 1995; Руководство по выражению неопределенности измерения. СПб: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999.

4. **PMГ 43—2001.** Применение Руководства по выражению неопределенности измерений

5. **ГОСТ Р 8.594—2002.** ГСИ. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения.

6. **ГОСТ Р 8.563—2009.** ГСИ. Методики (методы) выполнения измерений.

7. **Григорьев Е. И. и др.** Методическое обеспечение радиационного контроля на АЭС // АНРИ. 2008. № 4(55). С. 9—13.

8. **Григорьев Е. И. и др.** Критерии соответствия в радиационном контроле // АНРИ. 2011. № 1(64). С. 2—6.

Дата принятия 07.04.2011 г.