

Авторы:

Крикун Василий Михайлович,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Храменков Виктор Николаевич,
доктор технических наук, профессор.

Методическое пособие по расчету (оцениванию и выражению) неопределенности измерений в испытательных лабораториях (центрах).

1. Введение

Все более широкое применение неопределенности в последние десятилетия обусловлено тем, что это единственная, признанная на международном уровне, мера доверия к результатам измерений, в первую очередь полученных в результате лабораторной деятельности. В соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 (ISO/IEC 17025:2017) [1] лаборатория, выполняющая испытания, должна оценивать неопределенность измерений (раздел 7.6), соответствующие процедуры и результаты их применения учитываются при оценке компетентности испытательных лабораторий и достоверности (метрологической прослеживаемости) результатов испытаний (измерений, исследований).

В качестве общепризнанного документа (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) в 1993 году под эгидой Международного комитета мер и весов (МКМВ), Международной электротехнической комиссии (МЭК), Международной организации по стандартизации (ИСО), Международной организации по законодательной метрологии (МОЗМ), Международного союза по чистой и прикладной физике, Международного союза по чистой и прикладной химии, а также Международной федерации клинической химии было разработано первое "Руководство по выражению неопределенности измерения", которое постоянно дорабатывалось и в настоящее время издано в качестве рекомендаций ISO/IEC Guide 98-3:2008 (Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement) [2]. В Российской Федерации действует межгосударственный стандарт ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения" [3], который идентичен указанному международному документу "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения". Указанный стандарт следует применять совместно с ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 "Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения" [4], ГОСТ 34100.3.1-2017/ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло" [5] и ГОСТ 34100.3.2-2017/ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 2:2011 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин" [6].

Международная организация по аккредитации лабораторий ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) для оценки неопределенности измерений и прослеживаемости результатов измерений при аккредитации испытательных лабораторий рекомендует руководствоваться ILAC G17:2002 "Внедрение концепции неопределенности измерений при испытаниях в связи с применением Стандарта ИСО/МЭК 17025" [7], EA 4/16 G: 2003 "Руководство EA по выражению неопределенности в количественных испытаниях" [8], а также Политикой ILAC-P 14:01/2013 "ILAC Policy for Uncertainty in Calibration" [9], известной в Российской Федерации как Рекомендации по стандартизации Р 50.1.109-2016 "Политика ИЛАК в отношении неопределенности при калибровках" [10]. К наиболее практичным рекомендациям следует отнести APLAC TC 005 "Трактовки и рекомендации по вопросу оценки неопределенности измерений в области испытаний" [11], при применении этого документа следует учитывать, что в тексте содержатся ссылки на пункты стандарта ISO/IEC 17025 в настоящее время утратившего силу. Не следует упускать из виду и тот факт, что в действующей версии указанного стандарта [1] рассматриваемые в рекомендациях [11] вопросы стали еще более актуальными.

Рекомендации настоящего методического пособия базируются на основополагающем документе ISO/IEC Guide 98-3:2008 [2] в редакции ГОСТ 34100.3-2017 [3] (далее по тексту - Руководство) и учитывают подходы, изложенные в [4-10].

Под измерениями в настоящем методическом пособии понимаются любые измерения [численные (количественные) результаты испытаний или исследований], полученные с применением технических средств (средств измерений, испытательного оборудования или стандартных образцов).

Руководство разработано в целях:

- обеспечения предоставления полной информации о том, как получены утверждения о неопределенности измерений;
- создания основы для международного сопоставления результатов измерений;
- предоставления универсального метода для выражения и оценивания неопределенности измерений, применимого ко всем видам измерений и всем типам данных, которые используются при измерениях.

Существуют два подхода к оцениванию параметров (характеристик) точности измерений. Первый подход основан на понятиях и терминах, используемых в Руководстве, второй - на понятиях и терминах, применяемых в основополагающих нормативных документах в области обеспечения единства измерений, используемых в национальных системах обеспечения единства измерений. Российское законодательство [12] и разработанные в его развитие нормативные документы практически не учитывают подходы, изложенные в Руководстве, особенно в сфере государственного регулирования.

Во всех случаях целью измерений является получение оценки истинного значения измеряемой величины. Понятие погрешности измерений как разности между результатом измерений и истинным (действительным) значением измеряемой величины используется в нормативных документах по обеспечению единства измерений в Российской Федерации. При этом оценивание погрешности измерений подразумевает оценивание ее характеристик, исходя из предположения, что доверительные границы погрешности накрывают истинное значение измеряемой величины.

В Руководстве для выражения точности измерений вводится понятие неопределенности измерений, под которым понимается неполное знание значения измеряемой величины и для количественного выражения этой неполноты вводится распределение вероятностей возможных (обоснованно приписанных) значений измеряемой величины [3]. Параметр этого распределения (называемый - неопределенность) количественно характеризует точность результата измерений. При этом неопределенность характеризуется интервалом, содержащим заданную долю распределения значений измеряемой величины, которые обоснованно могут быть ей приписаны.

2. Общие положения

Результат измерений параметра (характеристики) объекта испытаний (далее по тексту, исходя из положений [1] - образца) должен сопровождаться некоторой количественной характеристикой качества результата измерений, позволяющей при его использовании для оценки соответствия образца заданным (установленным) требованиям определять достоверность (обоснованность) принятого решения о соответствии или несоответствии испытываемого образца. Без такой информации результаты измерений нельзя сопоставить ни друг с другом, ни со значениями, указанными в нормативных документах (спецификациях, технических условиях, стандартах, программах и методиках испытаний и т.д.). При этом указанная количественная характеристика качества результата измерений должна определяться путем реализации простой в применении, понятной и общепризнанной процедуры, позволяющей характеризовать качество результата измерений, т.е. необходимо оценивать и выражать его неопределенность [2] результата измерений.

В общем случае основными источниками неопределенности измерений являются:

- а) неполное определение измеряемой величины;
- б) несовершенная реализация определения измеряемой величины;
- в) нерепрезентативность выборки (измерения проводят на образце, не представляющем измеряемую величину);
- г) неточное знание влияния условий окружающей среды на результат измерения или неточное измерение величин, характеризующих эти условия;
- д) субъективная систематическая погрешность (вносимая оператором при снятии показаний аналоговых средств измерений);
- е) конечная разрешающая способность или порог чувствительности средства измерений;
- ж) неточные значения, приписанные эталонам и стандартным образцам;
- з) неточные знания физических констант и других параметров, полученных из сторонних источников и используемых при обработке данных;
- и) аппроксимации и предположения, используемые в методе и методике измерений (измерительной процедуре);
- к) изменчивость в повторных наблюдениях при, казалось бы, неизменных условиях измерений.

Общепризнанно, что после того, как найдены оценки всех ожидаемых составляющих погрешности и в результат измерения внесены соответствующие поправки, все еще остается некоторая неопределенность в отношении полученного результата, т.е. сомнение в том, насколько точно он соответствует значению измеряемой величины [3].

Подобно тому, как Международная система единиц (СИ), будучи системой практически универсального использования, привнесла согласованность во все научные и технические измерения, международное единство в оценивании и выражении неопределенности измерения обеспечивает должное понимание и правильное использование широкого спектра результатов измерений в науке, технике, торговле, промышленности и законодательстве. В условиях международного рынка чрезвычайно важно, чтобы метод оценивания и выражения неопределенности был единым во всем мире, а результаты измерений, проведенных в разных странах, были легко сопоставимы между собой.

Кроме того, зачастую в промышленности и торговле, а также в здравоохранении и в сфере обеспечения безопасности результат измерений должен быть представлен с указанием охватывающего его интервала, в пределах которого, как можно ожидать, будет находиться большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны измеряемой величине. Таким образом, идеальный метод оценивания и выражения неопределенности измерения должен предоставлять возможность указать такой интервал, который был бы действительно близок к доверительному интервалу с заданным уровнем доверия.

Общие правила оценивания и выражения неопределенности измерений, которые следует соблюдать при измерениях разной точности и в разных областях - от технических измерений на производстве до фундаментальных научных исследований - установлены в [3]. Предложенный в Руководстве подход к оцениванию и выражению неопределенности измерений распространяется на широкий спектр измерений, результаты которых используются для:

- обеспечения требуемого качества продукции и контроля качества на производстве;
- проверки выполнения требований законов и нормативных документов;

- проведения фундаментальных и прикладных исследований и разработок в науке и технике;
- калибровки эталонов и средств измерений, а также проведения испытаний в соответствии с национальной схемой обеспечения единства измерений (для обеспечения прослеживаемости к национальным эталонам);
- разработки, поддержания и сличения международных и национальных эталонов единиц физических величин, включая стандартные образцы веществ и материалов;
- оценивания и выражения неопределенности результатов теоретических расчетов и испытаний, методов измерений, анализа сложных систем;
- во многих иных целях.

При оценивании и выражении неопределенности измерений в первую очередь рассматривают оценку неопределенности измерений хорошо определенной физической величины, характеризуемой единственным значением. Если предмет изучения нельзя охарактеризовать единственным значением, а лишь некоторым распределением значений, или если он характеризуется зависимостью от одного или более параметров (например, представляет собой временной процесс), то измеряемыми величинами, требуемыми для его описания, являются параметры распределения или зависимости.

Руководство устанавливает общие правила оценивания и выражения неопределенности измерений и не содержит подробных указаний для конкретных измерений. В нем не рассматривается также вопрос, каким образом полученная оценка неопределенности результата конкретного измерения может быть использована в дальнейшем, например, для вывода о сопоставимости данного результата с результатами аналогичных измерений, для установления допусков в технологическом процессе, для заключения о соблюдении или несоблюдении установленных требований безопасности.

3. Термины и определения

Определения ряда общих метрологических терминов по тематике оценивания и выражения неопределенности измерений (например, "измеримая величина", "измеряемая величина", "погрешность измерений" и др.), приведены в [13].

На термине "неопределенность" следует остановиться подробнее ввиду неоднозначности его трактовки в различных сферах применения. Слово "неопределенность" означает сомнение, и, таким образом, в широком смысле "неопределенность измерения" означает сомнение в достоверности результата измерения. Специальные термины для величин, характеризующих количественную меру такого сомнения (например, стандартного отклонения), отсутствуют, поэтому слово "неопределенность" используют и в указанном широком смысле, и в смысле некоторой количественной меры. Исходя из положений Руководства, слово "неопределенность", используемое без прилагательного, относится как к общему понятию неопределенности, так и к любым количественным мерам неопределенности. Если необходимо уточнить, какая количественная мера имеется в виду, то для этого используется соответствующее прилагательное.

Приведенные ниже термины и их определения соответствуют [3], выделение в термине слова скобками означает, что данное слово, если только это не приводит к путанице, может быть опущено. Более полное рассмотрение приведенных терминов содержится непосредственно в Руководстве.

3.1 Неопределенность (измерения) [uncertainty (of measurement)]: Параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Примечание 1 - параметром может быть, например, стандартное отклонение (или величина, пропорциональная стандартному отклонению) или полуширина интервала, которому

соответствует заданный уровень доверия.

Примечание 2 - неопределенность измерения, как правило, включает в себя много составляющих. Некоторые из них могут быть оценены из статистического распределения результатов ряда измерений и описаны выборочными стандартными отклонениями. Другие составляющие, которые также могут быть описаны стандартными отклонениями, оценивают, исходя из основанных на опыте предположений или иной информации о виде закона распределения.

Примечание 3 - предполагается, что результат измерения является лучшей оценкой измеряемой величины, а все составляющие неопределенности, включая обусловленные систематическими эффектами (разного рода поправками, используемым эталоном сравнения), вносят вклад в разброс значений измеряемой величины.

Такое определение не противоречит использованию понятия неопределенности измерений в других смыслах, таких как:

- мера возможной погрешности оценки измеряемой величины, полученной как результат измерений;

- оценка, характеризующая диапазон значений, в пределах которого находится истинное значение измеряемой величины.

Определение является рабочим, привязанным в первую очередь к понятиям результата измерения и оценки его неопределенности.

3.2 Стандартная неопределенность (standard uncertainty): Неопределенность результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения.

3.3 Оценивание (неопределенности) типа А [Type A evaluation (of uncertainty)]: Метод оценивания неопределенности путем статистического анализа ряда наблюдений.

3.4 Оценивание (неопределенности) типа В [Type B evaluation (of uncertainty)]: Метод оценивания неопределенности, отличный от статистического анализа ряда наблюдений.

3.5 Суммарная стандартная неопределенность (combined standard uncertainty): Стандартная неопределенность результата измерения, полученного из значений ряда других величин, равная положительному квадратному корню взвешенной суммы дисперсий или ковариаций этих величин, весовые коэффициенты при которых определяются зависимостью изменения результата измерения от изменений этих величин.

3.6 Расширенная неопределенность (expanded uncertainty): Величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, который, как ожидается, содержит в себе большую часть распределения значений, что с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине. В документах, принятых до вступления в силу Руководства, расширенная неопределенность названа общей неопределенностью.

Примечание 1 - долю распределения, охватываемую интервалом, можно рассматривать как вероятность охвата или уровень доверия для данного интервала.

Примечание 2 - чтобы сопоставить интервалу, рассчитанному через расширенную неопределенность, некоторое значение уровня доверия, необходимо сделать в явном или неявном виде предположение о форме распределения, характеризуемого результатом измерения и его суммарной стандартной неопределенностью. Уровень доверия, поставленный в соответствие этому интервалу, может быть известен только в той мере, в которой оправдано сделанное предположение о форме распределения.

3.7 Коэффициент охвата (coverage factor): коэффициент, на который умножают суммарную стандартную неопределенность для получения расширенной неопределенности.

Примечание - коэффициент охвата обычно принимает значения от 2 до 3.

4. Показатели неопределенности измерения

В Руководстве [3] разделяет составляющие неопределенности на две категории в зависимости от метода оценивания: по типу А или В. Эта классификация применима только к **неопределенности** и не является заменой классификации погрешности на случайную и систематическую. Неопределенность поправки на известный систематический эффект может в некоторых случаях быть оценена по типу А, а в других случаях - по типу В. То же самое относится к неопределенности, обусловленной случайными эффектами.

В ряде публикаций составляющие неопределенности разделяют на "случайные" и "систематические", связывая их с погрешностями, возникающими, соответственно, из случайных и известных систематических эффектов. Такая классификация составляющих неопределенности может привести к неоднозначности толкования при ее практическом применении. Например, "случайная" составляющая неопределенности в одном измерении может стать "систематической" составляющей в другом измерении, в котором результат первого измерения используется в качестве входных данных. При классификации методов оценивания составляющих неопределенности, а не самих составляющих, такая неоднозначность устраняется.

Классификация неопределенностей измерения по типам А и В введена для указания на наличие двух разных способов оценивания составляющих неопределенности и для удобства обсуждения. Ее не следует интерпретировать как различие в природе составляющих неопределенности, полученных разными методами оценивания. Оба способа оценивания основаны на **распределении вероятностей**, и независимо от способа оценивания составляющие неопределенности количественно характеризуются одним и тем же параметром: дисперсией или стандартным отклонением.

Оценку дисперсии для составляющей неопределенности, оцениваемой по типу А, получают на основе ряда повторных наблюдений, и она совпадает с известной статистической характеристикой - выборочной дисперсией.

Оценку дисперсии для составляющей неопределенности, оцениваемой по типу В, получают по имеющейся информации, а оценку стандартного отклонения иногда называют стандартной неопределенностью типа В.

Таким образом, стандартную неопределенность типа А рассчитывают по **плотности распределения**, полученной из **распределения частот**, а стандартную неопределенность типа В - по **предполагаемой плотности распределения**, отражающей степень уверенности в появлении того или иного события. Оба подхода являются общепринятой интерпретацией понятия вероятности.

Стандартную неопределенность результата измерения, полученного из значений ряда других величин, называют **суммарной стандартной неопределенностью** и обозначают U_c . Она является оценкой стандартного отклонения результата измерения, равной положительному квадратному корню из суммарной дисперсии, т.е. суммы дисперсий и **ковариаций** всех составляющих неопределенности.

Для удовлетворения потребностей в ряде областей промышленности и торговли, а также требований в областях здравоохранения и обеспечения безопасности используют **расширенную неопределенность U**, получаемую умножением суммарной стандартной неопределенности $U_c(y)$ на **коэффициент охвата k**. Назначением **k** является построение интервала, охватывающего результат измерения, в пределах которого, как можно ожидать, будет находиться большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны измеряемой величине. Выбор коэффициента **k**, обычно принимающего значения от 2 до 3, зависит от вероятности охвата или уровня доверия, соответствующего данному интервалу. Вместе со значением расширенной неопределенности следует всегда указывать коэффициент охвата **k**. Это позволяет восстановить значение стандартной неопределенности измеряемой величины, которая впоследствии может быть использована для расчета суммарной стандартной

неопределенности результата измерения другой величины, зависящей от первой.

5. Оценивание показателей неопределенности измерения

5.1. Модель оценивания и выражения неопределенности измерения

В большинстве случаев измеряемую величину Y не измеряют непосредственно, а определяют через (с учетом) N других случайных величин X_1, X_2, \dots, X_N посредством функциональной зависимости

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (1)$$

Если имеется ряд наблюдений измеряемой величины, то k -е наблюдение случайной величины X_i обозначается как X_{ik} .

Входные величины X_1, X_2, \dots, X_N , от которых зависит выходная величина Y , также можно рассматривать как измеряемые величины, и они тоже могут зависеть от других величин, включая поправки и поправочные коэффициенты на систематические эффекты, что усложняет вид функциональной зависимости $f(\bullet)$, которая, таким образом, никогда не может быть в явном виде определена полностью. Кроме того, функциональная зависимость может быть определена экспериментально или существовать только в виде алгоритма численного расчета. Поэтому функциональная зависимость $f(\bullet)$ понимается в более широком смысле, а именно, как функция, которая включает в себя все величины, в том числе поправки и поправочные коэффициенты, способные существенно влиять на неопределенность измерения.

Входные величины X_1, X_2, \dots, X_N могут быть разделены на две группы:

- величины, значения и неопределенности которых определяют непосредственно в текущем измерении. Эти значения и неопределенности можно получить, например, в результате однократного наблюдения, повторных наблюдений или по основанным на опыте суждениям. Они могут включать определения поправок к показаниям средств измерений и поправок на влияющие величины, такие как окружающая температура, атмосферное давление, влажность и другие;

- величины, значения и неопределенности которых получены из сторонних источников. К ним относятся величины, указанные в документах на используемые средства измерений, стандартные образцы веществ и материалов, а также величины, значения которых указаны в справочниках.

Оценку измеряемой величины Y , обозначаемую y , получают из формулы (1), подставляя в нее оценки x_1, x_2, \dots, x_N для входных величин X_1, X_2, \dots, X_N . Таким образом, выходная оценка y , являющаяся результатом измерений, имеет вид

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2)$$

В некоторых случаях оценку y получают как среднее арифметическое n независимых определений Y_k величины Y по формуле:

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{N,k}) \quad (3)$$

Оценку стандартного отклонения результата измерения (оценки выходной величины) в виде суммарной стандартной неопределенности, обозначаемой $U_c(y)$, получают из оценок

стандартного отклонения результатов измерений (оценок) x_i каждой входной величины в виде стандартных неопределенностей, обозначаемых $U(x_i)$.

Каждую входную оценку x_i и связанную с ней стандартную неопределенность $U(x_i)$ получают из распределения вероятности значений входной величины X_i . Это распределение вероятности можно интерпретировать либо как частотную вероятность, основанную на серии наблюдений величины X_{ik} , либо как априорное распределение вероятности величины X_i . Оценки составляющих стандартной неопределенности по типу А основаны на частотном представлении вероятности, а по типу В - на априорных распределениях составляющих. В обоих случаях распределения вероятности отражают некоторое модельное представление знаний о случайной величине.

5.2. Оценивание стандартной неопределенности измерения

Исходными данными для расчета стандартной неопределенности измерения входной величины X_i типа А являются результаты ее многократных измерений x_i , при этом стандартная неопределенность входной величины x_i определяется по формуле [3]:

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i - 1)} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}, \quad (4)$$

где:

\bar{x}_i - среднее арифметическое результатов измерений i -й входной величины;

n_i - число измерений входной величины X_i .

Стандартную неопределенность измерения входной величины, вычисляемую по типу В, определяют по формуле [3]:

$$u_B(x_i) = \frac{b_B - b_H}{2\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где:

b_B и b_H - соответственно верхняя и нижняя границы неопределенности для входной величины x_i .

Информация о значениях b_B и b_H может быть получена из данных предшествующих измерений, опытным или теоретическим путем из данных о характеристиках применяемых технических средств (средств измерений, испытательного оборудования или стандартных образцов), или из данных, приводимых в свидетельствах о поверке или сертификатах калибровки применяемых средств измерений, протоколов аттестации испытательного оборудования, паспортов стандартных образцов и др.

5.3. Оценивание суммарной стандартной неопределенности измерения

Суммарная стандартная неопределенность измерения рассчитывается по формуле [3]:

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i)}, \quad (6)$$

где:

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ - частная производная функции **f(y)** по x_i ;

$U(x_i)$ - стандартная неопределенность i -й входной величины, оцениваемой по типу А или типу В.

Если при измерениях имеются достаточно достоверные данные о корреляции оценок входных величин X_i ($i=1,m$), то суммарная стандартная неопределенность измерения показателя, оцениваемого при испытаниях образца, оценивается по формуле [3]:

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} U(x_i, x_j)}, \quad (7)$$

где:

- x_i, x_j являются оценками соответственно X_i и X_j ;

- $U(x_i, x_j) = U(x_j, x_i)$ - оценка ковариации x_i и x_j .

5.4. Оценивание расширенной неопределенности измерения

Расширенная неопределенность измерений **U** оцениваемого объекта рассчитывается по формуле [3]:

$$U = k U_c(y), \quad (8)$$

где:

k - коэффициент охвата.

Результат измерения рекомендуется выражать в виде

$$Y = y \pm U. \quad (9)$$

Значение коэффициента охвата **k** выбирают на основе уровня доверия, требуемого для интервала от **y-U** до **y+U**. В соответствии с положениями Руководства [3] для ситуаций, когда распределение вероятностей оценки $U_c(y)$ близко к нормальному, а число эффективных степеней свободы при ее оценивании достаточно велико, что часто встречается на практике, можно принять, что значение **k = 2** соответствует интервалу с уровнем доверия, близким к 95%, а значение **k = 3** - интервалу с уровнем доверия, близким к 99%.

6. Представление результатов измерения и оценивания показателей неопределенности измерения

При представлении результата измерения и значения неопределенности измерения в виде суммарной стандартной неопределенности измерений $U_c(y)$ следует:

а) дать подробное определение измеряемой величины **Y**;

б) привести оценку **y** измеряемой величины **Y** и суммарной стандартной неопределенности

измерения $U_c(y)$ с указанием единиц измерений;

в) при необходимости указать относительную суммарную стандартную неопределенность измерения $U_c(y)/|y| \neq 0$.

При представлении результата измерения и значения неопределенности измерения в виде расширенной неопределенности измерений $U = kU_c(y)$ следует:

а) дать подробное определение измеряемой величины Y ;

б) указать результат измерений в виде $Y = y \pm U$ с указанием единиц измерений для Y и U , а также значение коэффициента охвата k ;

в) при необходимости указать относительную расширенную неопределенность измерений $U/|y|$, $y \neq 0$.

7. Процедура оценивания и представления результата измерения и показателя неопределенности измерения

Процедура оценивания и представления результата измерения и показателя неопределенности измерения включает следующие этапы:

Этап 1.

Установление связи между измеряемой величиной Y и входными величинами X_i , от которых она зависит, в виде функциональной зависимости, формула (1). Функция $f(\bullet)$ должна содержать все величины, включая поправки и поправочные коэффициенты, которые могут существенно повлиять на неопределенность результата измерений.

Этап 2.

Получение оценки x_i входной величины X_i либо на основе статистического анализа ряда наблюдений (по типу А), либо другими способами (по типу В).

Этап 3.

Оценивание стандартной неопределенности $U(x_i)$ каждой входной оценки x_i . Для входной оценки, полученной из статистического анализа ряда наблюдений, оценку стандартной неопределенности получают согласно оцениванию стандартной неопределенности типа А по формуле (4). Для входной оценки, полученной другими способами, оценку стандартной неопределенности получают согласно оцениванию стандартной неопределенности типа В по формуле (5).

Этап 4.

Если среди входных величин X_i есть коррелированные между собой величины, то проводят оценивание их ковариации.

Этап 5.

Определение результата измерения, т.е. нахождение оценки измеряемой величины по функциональной зависимости (2), используя в качестве аргументов функции X_i их оценки x_i , полученные на этапе 2.

Этап 6.

Определение суммарной стандартной неопределенности результата измерений $U_c(y)$ по

стандартным неопределенностям и ковариациям входных оценок, по формуле (6) или (7).

Этап 7.

Оценивание расширенной неопределенности измерений U по формуле (8) для определения интервала от $[y-U]$ до $[y+U]$ по формуле (9), в пределах которого, предположительно, находится большая часть распределения значений, которые можно с достаточным основанием приписать измеряемой величине Y . Значение k выбирают, исходя из желаемого уровня доверия для интервала от $y-U$ до $y+U$, в соответствии с рекомендациями п.5.4 настоящего Пособия или положений раздела 6.3 Руководства [3].

Этап 8.

Представление результата измерения y вместе с его суммарной стандартной неопределенностью $U_c(y)$ или расширенной неопределенностью U в виде $Y = \dots; U_c = \dots$, или $Y = y \pm U$ соответственно.

8. Примеры оценивания результата измерения и показателей неопределенности измерения

8.1. Оценивание результата измерений и показателей неопределенности измерений при испытаниях материалов металлических на растяжение

Исходные данные: *Проводятся испытания продольного образца, изготовленного из трубы диаметром 85 мм с толщиной стенки $a_0 = 3$ мм и шириной $b_0 = 8$ мм с целью определения его предела прочности R_m . Для этого образец подвергают растяжению под действием плавно возрастающего усилия до его разрушения.*

Этап 1.

Предел прочности образца R_m определяется косвенным методом по следующей функциональной зависимости:

$$R_m = \frac{F_m}{a_0 \cdot b_0}, \quad (10)$$

где F_m - наибольшее усилие, создаваемое разрывной машиной, предшествующее разрушению образца и соответствующее его пределу прочности.

Этап 2.

Для создания усилия F применяется универсальная испытательная машина TIME Group Inc. с диапазоном усилий 0,4-100 кН и пределом допускаемой относительной погрешности $\pm 1\%$. Ширина образца b_0 измеряется штангенциркулем ШЦ-II, предел допускаемой абсолютной погрешности составляет $\pm 0,1$ мм, а толщина стенки - микрометром МК 25 с пределом допускаемой абсолютной погрешности ± 2 мкм.

Этап 3.

Для однократного измерения оценка стандартной неопределенности не проводится, рассчитываем неопределенность по типу В.

Этап 4.

Входные величины не коррелированы между собой.

Этап 5.

При проведении испытания получены следующие результаты измерения:

толщина стенки $a_0 = 3$ мм (см. исходные данные);

шириной образца $b_0 = 8$ мм (см. исходные данные);

разрушение испытуемого образца произошло при усилии F_m , равном 50 кН.

Предел прочности образца согласно выражению (10) будет равен

$$R_m = \frac{50}{3 \cdot 8} = 2,083 \text{ кН/мм}^2.$$

Этап 6.

Оценка суммарной стандартной неопределенности предела прочности испытуемого образца R_m рассчитывается по формуле, выражение (6):

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i)} \quad (11)$$

где:

$\frac{df}{dx_i}$ - частные производные функции R_m по F_m , a_0 и b_0 соответственно;

$U(x_i)$ - стандартные неопределенности входных величин F_m , a_0 и b_0 .

В соответствии с правилами дифференцирования функциональной зависимости (10) получим:

Частная производная функции R_m по F_m равна $\frac{dR_m}{dF_m} = \frac{1}{a_0 \cdot b_0}$;

Частная производная функции R_m по a_0 равна $\frac{dR_m}{da_0} = -\frac{F_m}{a_0^2 \cdot b_0}$;

Частная производная функции R_m по b_0 равна $\frac{dR_m}{db_0} = -\frac{F_m}{a_0 \cdot b_0^2}$.

Подставляя в полученные выражения значения F_m , a_0 и b_0 получим:

$$\frac{dR_m}{dF_m} = \frac{1}{3 \cdot 8} = 0,0417;$$

$$\frac{dR_m}{da_0} = -\frac{50}{9 \cdot 8} = -0,694;$$

$$\frac{dR_m}{db_0} = -\frac{50}{3 \cdot 64} = -0,260.$$

Для расчета стандартных неопределенностей входных величин F_m , a_0 и b_0 по типу В используются данные о показателях точности применяемых при измерении этих величин средств измерений и испытательного оборудования.

Согласно выражению (5) и с учетом наличия информации (см. этап 5) о погрешностях

применяемых технических средств (средств измерений и испытательного оборудования) получим:

- стандартная неопределенность для универсальной испытательной машины TIME Group Inc. (предел допускаемой относительной погрешности $\pm 1\%$) равна

$$U_{Fm} = \frac{0,01 \cdot 50}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ кН};$$

- стандартная неопределенность для микрометра МК 25 (допускаемая абсолютная погрешность ± 2 мкм) равна

$$U_{ao} = \frac{0,002}{\sqrt{3}} = 0,00116 \text{ мм};$$

- стандартная неопределенность для штангенциркуля ШЦ-II (допускаемая абсолютная погрешность $\pm 0,1$ мм) равна

$$U_{bo} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,05780 \text{ мм}.$$

Подставляя полученные значения в выражение (11), получим

$$U_c(y) = \sqrt{0,0417^2 \cdot 0,29^2 + 0,694^2 \cdot 0,00116^2 + 0,260^2 \cdot 0,05780^2},$$

$$U_c(y) = \sqrt{0,0017 \cdot 0,0841 + 0,4816 \cdot 0,0000 + 0,0676 \cdot 0,0033},$$

$$U_c(y) = \sqrt{0,00014 + 0,00000 + 0,00022},$$

$$U_c(y) = \sqrt{0,00036} = 0,019 \text{ (кН/мм}^2\text{)}.$$

Этап 7.

Расширенная неопределенность рассчитывается по выражению: $U = k \cdot U_c(y)$,

при коэффициенте охвата $k=2$ расширенная неопределенность U будет равна $0,038 \text{ кН/мм}^2$,

при коэффициенте охвата $k=3$ расширенная неопределенность U будет равна $0,057 \text{ кН/мм}^2$.

Этап 8.

Результат измерений предела прочности образца может быть представлен в виде:

$$R_m = 2,083 \pm 0,038 \text{ кН/мм}^2, \text{ при } k=2;$$

$$R_m = 2,083 \pm 0,057 \text{ кН/мм}^2, \text{ при } k=3.$$

8.2. Оценивание результата измерений и показателей неопределенности измерений крутящего момента при аттестации Установки для воздействия на провод соединителя крутящим моментом по ГОСТ Р 51322.1-2011

Установка предназначена для воздействия на испытываемый провод соединителя крутящим моментом, который воспроизводится с помощью груза, подвешенного на свободном конце нити, второй конец которой закреплен на подвижном шкиве (барабане). Согласно паспорту на Установку, воспроизводимый крутящий момент должен быть равен: $0,15 \pm 0,01 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Этап 1.

Модель воспроизведения Установкой крутящего момента $M_{кр}$ имеет вид:

$$M_{кр} = R \cdot m \cdot g, \quad (12)$$

где:

R - радиус шкива;

m - масса груза;

g - ускорение свободного падения.

Этап 2.

При аттестации Установки применяются для измерения радиуса шкива и массы груза следующие средства измерений:

- штангенциркуль, диапазон измерений $0 \div 125$ мм, предел суммарной погрешности 0,1 мм;

- весы, диапазон измерений $0 \div 10$ кг, предел суммарной погрешности 0,005 кг.

Этап 3.

Для однократного измерения оценка стандартной неопределенности не проводится, рассчитываем неопределенность по типу В.

Этап 4.

Входные величины не коррелированы между собой.

Этап 5.

R - радиус шкива, равный 12,5-0,3 мм;

m - масса груза, равна $(1,22 \pm 0,03)$ кг;

g - ускорение свободного падения, равное 9,807 м/с².

Этап 6.

В связи с тем, что для используемых при аттестации испытательного оборудования средств измерений (штангенциркуля и весов) нормируются границы суммарной погрешности измерений, для расчета суммарной стандартной неопределенности измерения значения крутящего момента $\Theta(P)$ при доверительной вероятности P используется выражение для суммарной неопределенности измерения:

$$\Theta(P) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (\partial f / \partial a_i)^2 \cdot \Theta_i^2}, \quad (13)$$

где:

f - функциональная зависимость, приведенная в формуле (12);

a_i - параметры Установки, измеряемые при аттестации (радиус шкива и масса груза);

Θ_i - стандартная неопределенность i -й составляющей измерения значения крутящего момента (радиуса шкива и массы груза);

k - поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом m составляющих Θ_i .

При доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе суммирующихся аргументов $m > 4$ коэффициент k равен 1,1, а при $P = 0,99$ - k равен 1,4. При $m \leq 4$, коэффициент k всегда равен 1,4.

Выражения для частных производных функции (12) по аргументам R и m равны:

частная производная функции $M_{кр}$ по R равна $m \cdot g$;

частная производная функции $M_{кр}$ по m равна $R \cdot g$.

Подставляя в полученные выражения значения исходных данных (см. этап 5) R , m и g , получаем:

$$\partial M_{кр} / \partial R = 1,22 \cdot 9,807 = 11,965;$$

$$\partial M_{кр} / \partial m = 0,0125 \cdot 9,807 = 0,122.$$

Стандартные неопределенности измерений радиуса шкива и массы груза определяются по известным погрешностям применяемых средств измерений по формуле (5) для неопределенности типа B и равны:

$$\Theta_R = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} = 0,0001 \text{ (м)};$$

$$\Theta_m = \frac{0,005}{\sqrt{3}} = 0,003 \text{ (кг)}.$$

Подставляя в выражение (13) рассчитанные значения производных функции (12) и стандартных неопределенностей измерений значений параметров R и m для значения коэффициента k равного 1,4, получаем значение суммарной стандартной неопределенности воспроизведения аттестуемой Установкой крутящего момента:

$$\Theta(P) = 1,4 \sqrt{11,965^2 \cdot 0,0001^2 + 0,122^2 \cdot 0,003^2},$$

$$\Theta(P) = 1,4 \sqrt{143,161225 \cdot 0,00000001 + 0,014884 \cdot 0,000009},$$

$$\Theta(P) = 1,4 \sqrt{0,00000143 + 0,00000013},$$

$$\Theta(P) = 1,4 \sqrt{0,00000156}.$$

$$\Theta(P) = 1,4 \cdot 0,0013 = 0,0018 \text{ (Нм)}.$$

Этап 7.

Расширенная неопределенность рассчитывается по выражению: $U = k \cdot \Theta(P)$,

при коэффициенте охвата $k=2$ расширенная неопределенность U будет равна 0,0036 Нм,

при коэффициенте охвата $k=3$ расширенная неопределенность U будет равна 0,0054 Нм.

Этап 8.

Результат измерений воспроизводимого крутящего момента Установки может быть представлен в виде:

$$M_{кр} = M_{расч} \pm 0,0036 \text{ Нм, при } k=2;$$

$$M_{кр} = M_{расч} \pm 0,0054 \text{ Нм, при } k=3,$$

где:

$M_{расч}$ - значение крутящего момента, рассчитанное по формуле (12) с учетом измеренных значений R и m .

С другими практические примеры расчета неопределенности результатов измерений в самых широких отраслях промышленности и при различных видах испытаний с различной степенью детализации можно ознакомиться как в приведенных выше международных, межгосударственных и национальных документах, так и в различных пособиях и публикациях [14-19].

9. Литература

1. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 "Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий".
2. ISO/IEC Guide 98-3, "Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement".
3. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения".
4. ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 "Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения".
5. ГОСТ 34100.3.1-2017/ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло".
6. ГОСТ 34100.3.2-2017/ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 2:2011 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин".
7. ILAC G17:2002 "Внедрение концепции неопределенности измерений при испытаниях в связи с применением Стандарта ИСО/МЭК 17025".
8. EA 4/16 G: 2003 "Руководство EA по выражению неопределенности в количественных испытаниях".
9. ILAC-P 14:01/2013 "ILAC Policy for Uncertainty in Calibration", NEQ.
10. Р 50.1.109-2016 "Политика ИЛАК в отношении неопределенности при калибровках".
11. APLAC TC 005 "Трактовки и рекомендации по вопросу оценки неопределенности измерений в области испытаний".
12. Федеральный закон РФ "Об обеспечении единства измерений" N 102-ФЗ от 26 июня 2008 года.
13. РМГ 29-2013 "ГСИ. Метрология. Основные термины и определения".
14. Оценка неопределенности в измерениях: Практическое пособие/Н.Ю.Ефремова. Минск: БелГИМ, 2003.
15. Примеры оценивания неопределенностей из различных областей измерений и испытаний:

Практическое пособие/Н.Ю.Ефремова, С.А.Качур. Минск: БелГИМ, 2006.

16. Методическое пособие "Альтернативные подходы по оцениванию неопределенности измерения (на основании технического отчета EUROLAB, N 1/2007)", С.А.Качур, БелГИМ-Минск, 2011.

17. Руководство по применению СТБ ИСО/МЭК 17025. Оценка неопределенности в измерениях. Практическое пособие/Н.Ю. Ефремова. Минск: БелГИМ, 2003.

18. РИ 03-07.13 "СМ. Выражение и оценивание неопределенности результатов измерения", ТОО "Национальный центр аккредитации", г.Астана, 2017.

19. Оценка неопределенности или оценка погрешности, Крикун В.М., Ольховский А.Н., "Методы оценки соответствия", N 122009.