

Введение в оценку неопределенности измерений

Лектор: Байжұма Жандос Ескендірұлы

Тел.: +7 707 556 60 08

Email: zhandos.baizhuma@kaznu.edu.kz

Лекция 2. Вероятность охвата. Стандартная неопределенность. Этапы оценивания неопределенности. Этап формулирования измерительной задачи.

Трансформирование распределений и вычисление значений оценок.

Цель Дать представление о понятиях вероятности охвата и стандартной неопределенности, рассмотреть этапы оценивания неопределенности и принципы формирования измерительной задачи, а также методы преобразования распределений при расчёте оценок.

Основные вопросы:

1. Понятие вероятности охвата и коэффициента охвата.
2. Стандартная и расширенная неопределенности.
3. Этапы процесса оценки неопределенности измерений.
4. Формулирование измерительной задачи.
5. Преобразование распределений входных величин.
6. Вычисление оценок результата измерений.
- 7.

Краткие тезисы:

Стандартная неопределенность (u) — стандартное отклонение, характеризующее разброс результата.

Расширенная неопределенность (U) — интервал с заданной вероятностью охвата (обычно $P = 95\%$).

Этапы оценивания неопределенности:

- Формулировка измерительной задачи.
- Построение модели измерений.
- Определение входных величин и их распределений.
- Оценка неопределенностей типов A и B.
- Расчёт объединённой и расширенной неопределенностей.
- Представление результата измерения.

Формулирование измерительной задачи: определение цели, измеряемой величины, условий и требований к точности.

Трансформирование распределений: переход от распределений входных величин к распределению выходной величины через закон распространения неопределенностей.

Вычисление оценок: получение среднего значения, стандартного отклонения, доверительного интервала.

Стандартная неопределенность результата измерений, полученного из значений ряда других величин, называют суммарной стандартной неопределенностью, обозначаемой как u_c . Она является оцененным стандартным отклонением, связанным с результатом, и равна положительному квадратному корню и суммарной дисперсии, полученной из всех составляющих дисперсии и ковариации, однако вычисленная путем использования так называемого закона распространения неопределенности (см. раздел 5). Для удовлетворения требований в некоторых областях промышленности и торговли, а также требований области здравоохранения и безопасности используют расширенную неопределенность U , получаемую умножением суммарной стандартной неопределенности u_c на коэффициент охвата k .

Целью использования U является показ интервала около результата измерения, в пределах которого, можно ожидать нахождение большей части распределения значений, которые могли быть с достаточным основанием приписаны измеряемой величине. 16 Примечание. Коэффициент охвата k всегда должен быть указан, чтобы можно было снова получить стандартную неопределенность измеряемой величины для использования ее при вычислении суммарной стандартной неопределенности других результатов измерений, которые могут зависеть от этой величины.

Если все величины, от которых зависит результат измерения, изменяются, их неопределенность можно оценить статистическими средствами. Однако, так как на практике это редко представляется возможным из-за ограниченного времени и ресурсов, неопределенность результата измерения обычно оценивают, используя математическую модель измерения и закон распространения неопределенности. Таким образом, подразумевается, что измерения можно моделировать математически до степени, определяемой требуемой точностью измерения.

Поскольку математическая модель может быть неполной, все упомянутые величины следует изменять до самой полной практической степени, чтобы оценивание неопределенности, на сколько это возможно могло быть основано на наблюдаемых данных. Всякий раз, когда это доступно, использование эмпирических моделей измерения, основанных на долговременных количественных данных, и использование эталонов сравнения, которые могут показать, находится ли измерения под статистическим контролем, должны составлять часть усилий, которые необходимо затратить для получения надежных оценок неопределенности. Математическая модель должна всегда пересматриваться, когда наблюдаемые данные, включая результаты независимых определений, той же самой измеряемой величины, показывают, что модель неполна. Хорошо спланированный эксперимент может значительно способствовать повышению надежности оценок неопределенности и является частью искусства

проведения измерения. Для того, чтобы решить, нормально ли функционирует измерительная система, экспериментально наблюдаемая изменчивость ее выходных величин, оцененная их наблюдаемыми стандартными отклонениями, часто сравнивают с предсказанным стандартным отклонением, полученным суммированием различных составляющих неопределенности, которые характеризуют измерение. В таких случаях следует рассматривать только те составляющие (независимо от того, получены ли они из оценивания по типу А или типу В), которые могут внести вклад в экспериментально наблюдаемую изменчивость этих выходных величин.

Такой анализ может быть облегчен сбором тех составляющих, которые вносят вклад в изменчивость, и тех, которые не вносят вклад, в две отдельные соответствующим образом помеченные группы.

В некоторых случаях нет необходимости включать неопределенность поправки на систематический эффект в оценивание неопределенности результата измерения. Хотя неопределенность уже оценена, ею можно пренебречь, если ее вклад в суммарную стандартную неопределенность результата измерения незначителен. Если значения самой поправки незначительно по сравнению с суммарной стандартной неопределенностью, то ею самой тоже можно пренебречь.

Как часто случается на практике, особенно в области законодательной метрологии, измерительный прибор поверяется сравнением с эталоном и неопределенности, связанные с эталоном и процедурой сравнения, пренебрежительно малы по сравнению с требуемой точностью поверки. Примером может служить использование набора хорошо откалиброванных эталонов массы для поверки шкалы коммерческого прибора. В таких случаях, поскольку составляющая неопределенности достаточно малы, чтобы ими можно было пренебречь, измерение может рассматриваться как определение погрешности поверяемого устройства.

Оценка значения измеряемой величины, полученная в результате измерения, иногда выражается в единицах, принятых для эталона, а не в единицах, международной системе единиц физических величин (СИ). В таких случаях значение неопределенности, приписываемое результату измерения, может быть значительно меньше, чем когда результат выражается в соответствующих единицах СИ (в действительности, измеряемая величина была переопределена как отношение значения измеряемой величины к принятой величине эталона).

Грубые ошибки при регистрации или анализе данных могут вносить значительную неизвестную погрешность в результат измерения. Большие грубые ошибки можно распознать путем проверки данных; Небольшие – могут быть замаскированы или даже проявиться в виде случайных изменений. Меры неопределенности не предназначены дать объяснения таким ошибкам.

Описываемая методика дает схему определения неопределенности, но она не может заменить критические размышления, интеллектуальную честность и профессиональное мастерство. Оценка неопределенности не является ни рутинной работой, ни чисто математической; она зависит от детального знания природы, измеряемой величины, и измерения. Поэтому качество и ценность упомянутой неопределенности результата измерения, в конечном счете, зависит от понимания, критического анализа и честности тех, кто участвует в приписывании ее значения.

Для каждой величины, входящей в уравнение модели (1) необходимо определить оценку и стандартную неопределенность. Оценка измеряемой величины Y получается из уравнения (1) путем замены входных величин X_i их оценками x_i . При этом предполагается, что они являются лучшими оценками входных величин, в том смысле что были откорректированы (были внесены поправки) на явления и эффекты, значимые для данной модели. Если это не так, то необходимые поправки должны вводиться в модель в качестве отдельных входных величин. Каждую оценку входной величины x_i и связанную с ней стандартную неопределенность $u(x_i)$ получают из распределения вероятностей входной величины X_i . Неопределенность в результате измерения обычно состоит из нескольких составляющих, которые можно сгруппировать в две категории в соответствии со способом оценки их численного значения: Тип А – составляющие, которые оцениваются путем применения статистических методов; Тип В – составляющие, которые оцениваются другим методом. Стандартная неопределенность, связанная с оценкой измеряемой величины, имеет такую же размерность, как и само значение оценки, т. е. выражается в тех же единицах измерений. В некоторых случаях рационально применять относительную стандартную неопределенность. Она является стандартной неопределенностью, связанной с оценкой, разделенной на модуль (абсолютное значение) оценки, и поэтому является безразмерной. Ее применение становится невозможным, когда значение оценки равно нулю.

Оценка стандартной неопределенности по типу А

Оценивание стандартной неопределенности по типу А может основываться на любых обоснованных методах статистической обработки данных, таких как:

- расчет стандартного отклонения и среднего значения на основании серии наблюдений;
- использование метода наименьших квадратов для подбора кривой к данным и для получения соответствующих оценок параметров аппроксимации и их стандартных отклонений;

- проведение дисперсионного анализа для идентификации и определения значений отдельных случайных эффектов в измерениях, чтобы эти эффекты могли быть правильно приняты во внимание при оценивании неопределенности. В качестве примера оценивания по типу А можно рассмотреть величину X , для которой были получены p независимых наблюдений в одинаковых условиях измерения. В этом случае оценкой величины X будет среднее арифметическое значение или среднее $\bar{x}$ из p наблюдений x_i ($i = 1, 2, \dots, p$):

Стандартная неопределенность, связанная с оценкой $\bar{x}$, является экспериментальным стандартным отклонением среднего значения и равна положительному квадратному корню из экспериментальной дисперсии среднего значения:

$$u_A = [\sum (x_i - \bar{x})^2 / p \cdot (p - 1)]^{1/2} \quad (3)$$

Оценка стандартной неопределенности по типу В. Оценивание (стандартной неопределенности) по типу В основывается на базе научного суждения, основанного на всей доступной информации о возможной изменчивости X_i . Фонд информации может включать: • данные предварительных измерений; • данные, полученные в результате опыта, или общие знания о поведении и свойствах соответствующих материалов и приборов; • спецификация изготовителя; • данные, которые приводятся в свидетельствах о калибровке и в других сертификатах; • неопределенности, приписываемые справочным данным, взятым из справочников. Имеющуюся информацию о величинах X_i необходимо правильно описать с помощью функции распределения вероятностей, чтобы затем определить оценки величин и их стандартные отклонения. При этом используются следующие основные распределения:

- 1) прямоугольное (равномерное);
- 2) треугольное;
- 3) трапецеидальное;
- 4) U - образное (арксинуса);
- 5) нормальное (Гаусса).

Основные этапы оценивания неопределенности включают в себя формулировку измерительной задачи и вычисления. Последнее включает в себя трансформирование распределений вероятностей и получение окончательного результата.

Этап формулировки измерительной задачи (см. раздел 6) включает в себя:

- a) задание выходной величины Y (измеряемой величины);
- b) выявление входных величин, от которых зависит Y ;

с) составление модели измерения, определяющей соотношение U с входными величинами;

д) приписывание распределений вероятностей (нормального, прямоугольного и т. д.) входным величинам (или совместного распределения вероятностей входным величинам, не являющимся независимыми) на основе имеющейся информации.

Этап вычислений (см. раздел 7) состоит из трансформирования поданной модели измерения распределений вероятностей для входных величин в распределение вероятностей для выходной величины U и использования этого распределения для получения:

а) математического ожидания U , принимаемого как значение оценки u величины U ;

б) стандартного отклонения величины U , принимаемого как стандартная неопределенность $u(y)$, ассоциированная с u [см. JCGM 100 (E.3.2)];

с) интервала охвата, содержащего U с заданной вероятностью охвата.

Этап вычислений включает в себя процедуру, известную как трансформирование распределений [см. JCGM 101, (5.2)], которая может быть реализована следующими способами:

а) в виде используемого в GUM закона трансформирования неопределенностей с описанием случайной величины, ассоциированной с выходной величиной U , распределением Гаусса или f -распределением (см. 7.2);

б) в виде аналитического вывода формы распределения вероятностей для U методами математического анализа (см. 7.3);

с) с помощью метода Монте-Карло, в котором приближенную функцию распределения для U получают численным моделированием, генерируя случайные значения из распределений вероятностей для входных величин и преобразуя их в значения измеряемой величины посредством модели измерений

Для конкретной задачи оценивания неопределенности измерений может быть использован любой из способов, перечисленных в 7.1.1 (или какой-нибудь иной метод), причем способ

а) является в большинстве случаев приближенным, способ б) — точным, а способ с) дает решение с числовой точностью, которую можно контролировать.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Что такое вероятность охвата и как она используется в оценке неопределенности?

2. Чем стандартная неопределенность отличается от расширенной?
3. Как рассчитывается коэффициент охвата?
4. Перечислите основные этапы оценивания неопределенности.
5. Что включает этап формулирования измерительной задачи?
6. Как осуществляется преобразование распределений входных величин?
7. Что понимается под вычислением оценок результата измерений?

Рекомендуемый список литературных источников:

1. ISO/IEC Guide 98-3:2008 (GUM). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.
2. JCGM 101:2008. *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the GUM: Propagation of distributions using a Monte Carlo method*.
3. ISO/IEC 17025:2017. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.
4. Алексеев С. В. *Основы метрологии и измерений*. – СПб.: Питер, 2021.
5. Левин В. И. *Неопределенность измерений и методы её оценки*. – М.: Логос, 2019.
6. Метрология, стандартизация и сертификация / под ред. В. В. Овчинникова. – М.: Академия, 2020.