

УДК 621.3.089.5

Г.И. Манко, Н.С. Шевчук

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье рассмотрены актуальные вопросы оценивания неопределенности измерений. Выявлены недостатки в существующих методиках вычисления неопределенностей результата измерений. Предложен метод оценки неопределенности, основанный на использовании информационных характеристик.

Ключевые слова: неопределенность, закон распределения, информационные оценки, распределение вероятностей, дезинформация, полезная информация.

Введение

Постановка проблемы. В соответствии с Законом Украины о метрологии и метрологической деятельности [1] результат измерения физической величины может быть использован, если известны соответствующие характеристики точности: погрешностью измерения [2] или неопределенность измерения [3]. Поэтому оценивание точности измерений является одной из важнейших задач современной метрологии. В последнее время в метрологическую практику все шире внедряется концепция неопределенности. При этом, однако, возникает ряд проблем методологического характера.

Анализ последних исследований и публикаций. В соответствии с введенным в Украине государственным стандартом [4] результаты измерений должны включать характеристики неопределенности. Для их расчета используется Рекомендация INC-1 «Выражение экспериментальных неопределенностей» [5], определившая классификацию неопределенностей по типу А и В в зависимости от способа их оценки, выражение этих неопределенностей в виде дисперсий (стандартных отклонений) и ковариаций, способ их суммирования путем сложения дисперсий и ковариаций и интервальную оценку как произведение суммарной неопределенности на коэффициент охвата.

Таким образом стандартные неопределенности входных величин выражают в виде стандартных отклонений и находят статистическими и нестатистическими методами, получая, соответственно, стандартные неопределенности типа А (u_A) или стандартные неопределенности типа В (u_B). Стандартная неопределенность измерений типа А соответствует среднеквадратическому отклонению (СКО) результата измерения (от среднего арифметического) i -ой входной величины, оцененному по результатам многократных наблюдений. Стандартная неопределенность типа В i -ой входной величины рассчитывается аналитическим методом в зависимости от априорной информации о изменчивости входной величины.

Развитием положений [5] явилось «Руководство по выражению неопределенности измерений» [6]. В

документах [5, 6] в качестве основной формы выражения неопределенности нормируется суммарная стандартная неопределенность, а интервальная оценка (расширенная неопределенность) рассматривается как дополнительная, применение которой предполагается «в особых случаях».

Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации приняты рекомендации «Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» [3], в которых использованы такие термины как:

неопределенность (измерений) – параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине;

стандартная неопределенность (u) – неопределенность результата измерений, выраженная в виде СКО;

суммарная стандартная неопределенность (u_c) – стандартная неопределенность результата измерений, полученного через значения других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерений изменяется при изменении этих величин;

расширенная неопределенность (U) – величина, определяющая интервал вокруг результата измерений, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеряемой величине.

В [3] также различают два типа вычислений стандартной неопределенности:

- вычисления по типу А – путем статистического анализа результатов многократных измерений;
- вычисления по типу В – с использованием других способов.

В работе [7] отмечено, что стандартная неопределенность, если отбросить некоторые нюансы, совпадает с оцениванием среднеквадратического отклонения случайной погрешности и вычисляется по результатам многократных наблюдений.

Неопределенность типа В – это та часть неопределенности измерений, которая получена не в результате повторных измерений. Она определяется на основе научных суждений, которые основываются на всей доступной информации о возможной изменчивости каждой входной величины x_i , входящей в модель измерения $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. При вычислении неопределенности выходной (измеряемой) величины y , которая оценивается по типу В, геометрически суммируются стандартные отклонения u_i составляющих x_i независимо от закона распределения плотности их вероятности.

Существенным недостатком данного подхода к расчету неопределенности является то, что в соответствии с ним случайная величина полностью характеризуется дисперсией, которая в свою очередь является лишь одной из характеристик случайного процесса. Известно, что для полного описания случайной величины необходимо определить закон распределения вероятностей ее значений.

Более-менее полноценно характеризуют закон распределения четыре параметра.

1. Математическое ожидание – первый момент случайной величины, который определяется как среднее арифметическое значение всех возможных реализаций случайной величины, которые могут появиться в ходе случайного эксперимента.

2. Дисперсия дискретной случайной величины X – второй момент случайной величины. Смысл дисперсии заключается в том, что она характеризует средний квадратичный разброс случайной величины вокруг своего математического ожидания.

3. Третий момент случайной величины X – асимметрия – величина, характеризующая отклонение распределения данной случайной величины относительно математического ожидания. Коэффициент асимметрии положителен, если правый хвост распределения длиннее левого, и отрицателен в противном случае. Если распределение симметрично относительно математического ожидания, то его коэффициент асимметрии равен нулю.

4. Четвертый момент случайной величины – эксцесс – мера остроты пика распределения случайной величины. Коэффициент эксцесса нормального распределения равен нулю. Он положителен, если пик распределения около математического ожидания острый, и отрицателен, если пик сглаженный.

Таким образом, дисперсия однозначно может охарактеризовать только нормальный закон распределения вероятностей. Для некоторых других законов распределения вероятностей в [3, 7] предлагается вводить поправочные коэффициенты. Аналитические методы расчета характеристик неопределенности измерений, которые регламентируются отечественными и международными нормативными документами, ориентированы в основном на линейные функции. Как поступать в общем же случае – неизвестно. Для нелинейных модельных функций в [7] предлагается использовать числовые методы расчета неопределенности, такие как метод числового

дифференцирования и метод имитационного моделирования – метод Монте–Карло.

В силу этих и ряда других причин оценки неопределенности методами, изложенными в [3] и [6] оказываются завышенными. Это может быть полезно потребителю, однако ущемляет интересы производителей средств измерений, поскольку приводит к снижению, часто необоснованному, заявленных характеристик точности.

Формулировка цели статьи. Целью статьи является показать целесообразность использования для оценки неопределенности измерений информационного критерия, который полностью учитывает законы распределения случайных величин.

Изложение основного материала

В соответствии с [8] для оценки неопределенности систем используются понятия неупорядоченности и неорганизованности.

Неупорядоченностью \bar{V} в [8] называется мера различия какого-либо выбранного элемента x_j в отношении эталона порядка $x_{эт}$, которая стремится к нулю при $x_j \rightarrow x_{эт}$. Неорганизованность \bar{O} есть обобщенная характеристика неупорядоченности. В символическом виде:

$$\bar{O} = \bigcup_b^l \bigcup_{s_i}^d \bigcup_{p_j}^m f(\bar{Y}), \quad (1)$$

где \bigcup – символ обобщения характеристики неупорядоченности соответственно за m ситуаций, d элементов и l интервалов времени; f – функция, посредством которой производится взвешивание неорганизованности по фактору существования её проявления в отношении определённого показателя функционирования системы; p_j, s_i, α_β – веса соответственно j -й ситуации, i -го элемента и β -го интервала времени. В частных случаях неорганизованность принимает вид энтропии Шеннона и неопределенности Бонгарда.

Как известно, характеристикой неопределенности случайной величины с распределением вероятностей $\{p_j\}$ является энтропия [9]:

$$\bar{O} = H = - \sum_j p_j \log p_j. \quad (2)$$

Для наблюдателя, исходящего из гипотезы, что некоторая задача характеризуется распределением вероятностей ответа $\{q_j\}$, в то время как реальным является распределение $\{p_j\}$, М.М. Бонгард предложил свою меру неопределенности [10]:

$$\bar{O} = N(p/q) = - \sum_j p_j \log q_j. \quad (3)$$

Согласно Бонгарду, эксперимент несет наблюдателю полезную информацию в количестве

$$I_{II} = H - N(p/q) = \sum_j p_j \log(q_j/p_j). \quad (4)$$

Формулой (2) оценивается неопределенность события с распределением вероятностей исходов $P = (p_{ij})$, в (3) и (4) – то же для наблюдателя, исходящего из гипотезы, что распределение вероятностей исходов $Q = (q_{ij})$.

Если измеряемая величина X имеет распределение вероятностей P , а результаты измерений Y имеют распределение Q , то можно говорить, что измерительная система вносит следующее количество дезинформации:

$$D = N(p/q) - H = \sum_j p_j \log[p_j / q_j]. \quad (5)$$

Для получения относительной оценки неопределенности надо сравнить дезинформацию, вносимую средством измерений, с максимально возможной дезинформацией, которая имеет место при $H = N(p/p) = 0$:

$$D_{\max} = N(p/q) = -\sum_j p_j \log q_j. \quad (6)$$

Относительная неопределенность

$$v = \frac{D}{D_{\max}} = 1 - \frac{\sum_j p_j \log p_j}{\sum_j p_j \log q_j}. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что относительная неопределенность изменяется в интервале $[0; 1]$. Если $v = 0$, то неопределенности нет, средство измерений является идеальным. Относительную неопределенность удобно выражать в процентах, для чего следует (7) умножить на 100.

Для непрерывно изменяющейся измеряемой величины следует идти классическим путем: разбить диапазон ее изменения на небольшие участки Δx , определить вероятность попадания на участок как произведение плотности вероятности на ширину участка и выполнить предельный переход для выражения (7) при $\Delta x \rightarrow 0$:

$$v = 1 - \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log q(x) dx}, \quad (8)$$

где $p(x)$ и $q(x)$ – плотности вероятности измеряемой величины и результата измерения.

Очевидно, что информационные критерии (5), (7) и (8) полностью учитывают законы распределения измеряемой величины и результатов измерения, и потому их использование для оценки неопределенности измерений является более предпочтительным, чем СКО. Относительную неопределенность в виде (7) или (8) удобно использовать для оценки точности средств измерений.

Вывод

Для оценки неопределенности измерений целесообразно использовать информационные критерии, основанные на понятии полезной информации Бонгарда. Они применимы для произвольного закона распределения, не требуют введения поправочных коэффициентов, что значительно уменьшает произвол в оценке неопределенности, обеспечивает более точную её оценку.

Список литературы

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 15 червня 2004 року № 1765-IV.
2. МИ 1317-86. ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их качества.
3. РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации, ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
4. ДСТУ ISO/IEC 17025 - 2001. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – К.: Держстандарт України, 2001.
5. Giacomo P. The Expression of Experimental Uncertainties (Recommendation INC-1), BIPM // Metrologia. – 1981. – № 11. – P. 73.
6. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – Geneva: ISO, 1993. – 101 p.
7. Чалий В. Сучасні тенденції в метрології // Метрологія та прилади. – 2006. – № 1. – С. 9-16.
8. Горский Ю.М. Информационные аспекты управления и моделирования. – М.: Наука, 1978. – 223 с.
9. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Иностранная литература, 1963. – 829 с.
10. Бонгард М.М. Проблемы узнавания. – М.: Наука, 1967. – 320 с.
11. Бородин А.Н. Элементарный курс теории вероятностей и математической статистики. – С.-Пб.: Издательство «Лань», 1998. – 224 с.
12. Кожневиков Ю.В. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2002. – 416 с.

Поступила в редколлегию 21.08.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРІВ

Г.І. Манко, Н.С. Шевчук

У статті розглянуті актуальні питання оцінювання невизначеності вимірювань. Виявлені недоліки в існуючих методиках обчислень невизначеностей результату вимірювань. Запропонований метод оцінки невизначеності, заснований на використанні інформаційних характеристик.

Ключові слова: невизначеність, закон розподілу, інформаційні оцінки, розподіл вірогідності, дезинформація, корисна інформація.

THE USE OF INFORMATIONAL CHARACTERISTICS FOR THE MEASURING UNCERTAINTY ESTIMATION

G. I. Manko, N. S. Shevchuk

The actual questions of evaluation of vagueness of measurements are considered in the article. Failings are exposed in the existent methods of calculations of vagueness result of measurements. The method of estimation of vagueness, based on the use of informative descriptions, is offered.

Keywords: vagueness, distributing law, informative estimations, distribution of probabilities, misinformation, useful information.