

УДК 519.688

И.П. Захаров, С.В. Водотыка

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Описано программное средство для расчета неопределенности в измерениях, реализующее как базовый алгоритм оценивания неопределенности, так и процедуру Монте-Карло.

неопределенность в измерениях, программное средство, метод Монте-Карло

Стандарт ISO/IEC 17025:2005 [1] определяет международное признание результатов испытаний и калибровок лабораториями, получившими аккредитацию от органов, которые заключили MRA [2] с аналогичными органами других стран. Он законодательно закрепил необходимость наличия процедур оценивания неопределенности измерений, проводимых в аккредитованных лабораториях

а) при выборе, разработке и оценивании пригодности методов и процедур, которые используются в деятельности лаборатории (п. 5.4.1);

б) при использовании стандартизованных и не стандартизованных и разработанных лабораторией методов и процедур калибровки или испытания (п. 5.4.6);

в) при оформлении свидетельств о калибровке и протоколов испытаний (п. 5.6.2.1.1, 5.10.4.1);

г) при создании программ и процедур калибровки своих собственных исходных эталонов, образцовых веществ и оборудования, для обеспечения прослеживаемости проводимых лабораторией калибровок и измерений до Международной системы единиц (SI) (п. 5.6).

Реализация перечисленных требований стандарта осуществляется на основе использования "Руководства по выражению неопределенности измерений" (GUM:1993) [3].

Следует отметить, что общий подход оценивания неопределенности измерений, описанный в [3] имеет ряд ограничений. Во-первых, в его основе лежит т.н. закон распространения неопределенности, базирующийся на разложении нелинейной модельной функции в ряд Тейлора первого порядка. Применение такого подхода при существенно нелинейной зависимости дает смещенную оценку результата измерений и недостоверную оценку сум-

марной стандартной неопределенности u_c . Во-вторых, при нахождении расширенной неопределенности предполагается, что закон распределения выходной величины в соответствии с центральной предельной теоремой – нормальный и коэффициент охвата хорошо аппроксимируется коэффициентом Стьюдента с числом степеней свободы, определяемым формулой Велча-Саттерсвейта. Первое предположение справедливо для случая линейного модельного уравнения, большого числа входных величин и их симметричных законов распределения. Кроме того, выражение коэффициента охвата через коэффициент Стьюдента не всегда оправдано. Так, легко заметить, что минимальное значение коэффициента Стьюдента для уровня доверия 0,95 составляет 1,96 при числе степеней свободы равном бесконечности. Однако в случае однократных измерений или когда вклады неопределенности типа *B* являются превалирующими, значение коэффициента охвата 1,96 является максимальным. Тогда минимальное значение коэффициента охвата может составлять 1,65 для равномерного закона распределения выходной величины и 1,41 для закона арксинуса. В этих случаях оценивание коэффициента охвата по методике GUM дает завышенные оценки расширенной неопределенности на 20 и 40 % соответственно [4]. Сложности применения формулы Велча-Саттерсвейта возникают даже в тех случаях, когда вклады неопределенности типа *B* отсутствуют [5]. Эта формула была получена приближенными аналитическими методами в 30-х – 40-х годах прошлого века [6,7] и ее справедливость не была проверена методами численного моделирования. Кроме того, формула Велча-Саттерсвейта принципиально не предназначена для работы с коррелированными входными величинами и ее применение в этом случае

может привести к существенной недостоверности оценивания расширенной неопределенности [8].

Устранить все перечисленные недостатки базового метода оценивания неопределенности измерений может применение численных методов. Наиболее универсальным численным методом является метод статистического моделирования (Монте-Карло), в основе которого лежит закон распространения распределений. Этот метод положен в основу Приложения 1 к GUM «Численные методы распространения законов распределений», разработанного Рабочей Группой 1 (WG1), созданной в рамках Объединенного комитета по руководству в метрологии, возглавляемого директором BIPM [9].

Следует отметить, что если расчеты неопределенности измерений по базовому алгоритму требуют специальных знаний в области математической статистики, то расчеты методом Монте-Карло требуют умения работы со статистическими пакетами. Как правило, эти оба требования не всегда соответствует уровню персонала испытательных лабораторий.

Выходом из создавшейся ситуации служит автоматизация расчетов, которая приводит не только к ускорению работы персонала лабораторий, но и к уменьшению срока его обучения оцениванию неопределенности.

Простейшей реализацией базового алгоритма оценивания неопределенности являются программы, разработанные в среде Excel [10]. Кроме того, разработано большое количество специализированных программ, например, программное средство, описанное в [11]. Их недостатками являются все перечисленные выше недостатки базового алгоритма. Для устранения этих недостатков при создании специализированного программного обеспечения логично воспользоваться методом Монте-Карло, тем более что для пользователя принцип работы программного средства значения не имеет.

Авторами статьи разработано программное средство, реализующее оба алгоритма. Базовый алгоритм оставлен для исследовательских целей (для выяснения возможности его использования в каждой конкретной ситуации).

При использовании программного средства изначально предполагается, что известны математическая модель измерения, количество входных величин и параметры параметров входных величин и их характер зависит от типа оценивания неопределенности: по типу *A* – это экспериментальные данные, которые подлежат статистической обработке, по типу *B* – это параметры априорного закона распределения вероятности. Алгоритм ввода исходных данных в программу изображен на рис. 1.

При вводе данных о каждой из входных величин в бюджет неопределенности заносится следующая информация: название составляющей, ее оценка, стандартная неопределенность, тип и закон распределения вероятности (рис.2).

Характеристики составляющей неопределенности, оцененных по типу *B* могут вводиться в виде

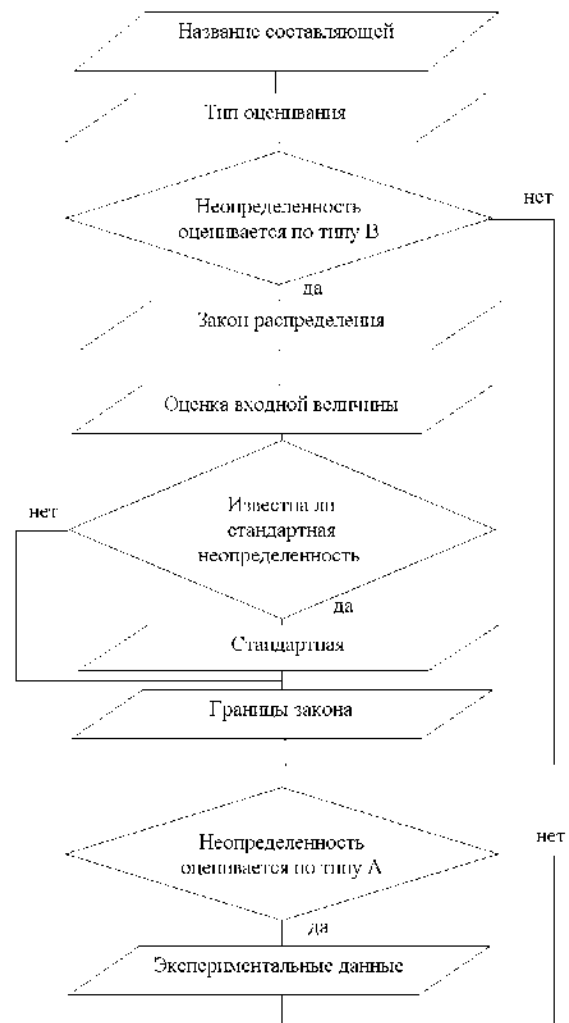


Рис. 1. Алгоритм ввода исходных данных

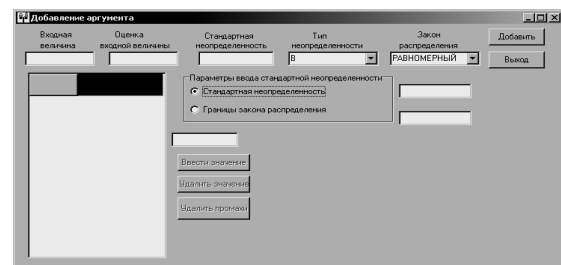


Рис. 2. Панель ввода информации о входной величине

границ и стандартной неопределенности. Если i -ая входная величина является неисключенной систематической погрешностью (НСП) с границей θ_i , то ее неопределенность вычисляется по формуле:

$$u_B(x_i) = \theta_i / \alpha_i, \quad (5)$$

где α_i – коэффициент, соответствующий принимаемому закону распределения внутри границ НСП.

Для равномерного (или неизвестного) закона распределения $\alpha_i = \sqrt{3}$; для нормального закона распределения $\alpha_i = 2$ (для вероятности 0,95); для треугольного закона распределения $\alpha_i = \sqrt{6}$; для закона арксинуса $\alpha_i = \sqrt{2}$ и т.д.

Если неопределенность входной величины оценивается по типу *A*, то стандартная неопреде-

ленность $u_A(\bar{x}_i)$ рассчитывается по вводимым экспериментальным данным x_{iq} как

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

где $\bar{x}_i = (1/n_i) \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$ – среднее арифметическое

результатов измерений i -й входной величины.

При вводе экспериментальных данных, программа по требованию пользователя может удалить грубые погрешности и промахи по критерию Граббса.

После определения всех составляющих неопределенности измерения находится их суммарная неопределенность $u_c(y)$ в соответствии с законом распространения неопределенности [3].

Далее рассчитывается расширенная неопределенность результата измерения как $U = ku(y)$, где k – коэффициент охвата, определяемый как коэффициент Стьюдент для эффективного числа степеней свободы $v_{\text{эф}}$, вычисляемого по формуле Велча-Саттерсвейта:

$$v_{\text{эф}} = u_c^4(Y) / \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} u(X_i) \right)^4 / v_i \right].$$

Значение степеней свободы v_i принимается равным ∞ , если $u(X_i)$ определяется по типу В и равным $n-1$, если $u(X_i)$ определяется по типу А, где n – число многократных измерений, производимых при получении оценки $u(X_i)$.

Алгоритм оценивания неопределенности по методу Монте-Карло, реализованный в программном средстве описан в [12]. Для каждой входной величины, стандартная неопределенность которой оценена по типу В, программа генерирует выборку с заданными оценкой входной величины, стандартной неопределенностью и вероятностными характеристиками. Для входных величин, оцениваемых по типу А генерируется выборка значений, распределенных по закону Стьюдента. Далее формируется выборка выходной величины: для каждого отдельного сгенерированного наблюдения вычисляется выходная величина в соответствии с математической моделью измерения. Таким образом, мы получаем композицию законов распределения, по результатам которой вычисляем суммарную и расширенную неопределенности. В программе применяется алгоритм вычисления минимальной расширенной неопределенности, описанный в [9].

При проведении вычислений пользователь может визуально наблюдать законы распределения входных и выходной величины (рис. 3). После проведения вычислений можно изменить одну или несколько входных величин, при этом, не вводя все остальные величины заново. В программе есть возможность сохранить бюджет неопределенности в

виде таблицы в текстовом файле и сохранить распределение выходной или входных величин, что облегчает дальнейший анализ полученных результатов.

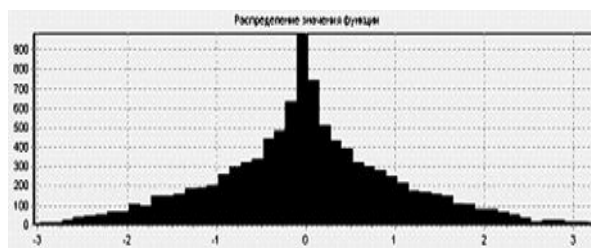


Рис. 3. Гистограмма распределения выходной величины

Список литературы

1. ISO/IEC 17025:2005 General requirement for the competence of testing and calibrating laboratories.
2. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, International Committee for Weights and Measures, 1999, available from <http://www.bipm.org>.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO, Geneva, First Edition. – 1995 – 101 p. Пер. с англ. – С.-Пб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 126 с.
4. Захаров И.П. Расчет коэффициента охвата для нормально и равномерно распределенных составляющих неопределенности // Системы обработки информации. – Х.: XV ВС, 2005. – Вып. 6. – С. 52-57.
5. Захаров И.П. Композиция законов распределения Стьюдента // Системы обработки информации. – Х.: XV ВС, 2005. – Вып. 8. – С. 28-35.
6. Welch B. L. The significance of the differences between two means when the population variances are unequal // Biometrika. – 1938. – V. 29. – P. 350-362.
7. Satterthwaite F.E. An approximate distribution of estimates of variance components // Biometrics Bulletin 2: 1946. 110–114.
8. Захаров И.П. Учет корреляции при оценивании неопределенности результатов многократных измерений // Системы обработки информации. – Х.: XV ВС, 2005. – Вып. 9. – С. 43-45.
9. Кокс М., Харрис П., Зиберт Б.Р.-Л. Оценивание неопределенности измерений на основе трансформирования распределений с использованием моделирования по методу Монте-Карло // Измерительная техника. – 2003. – № 9. – С. 9-14.
10. EURACHEM. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Second Edition. - LGC, 2000. Пер. с англ. – С.-Пб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2002. – 149 с.
11. Новиков В.В., Коцюба А.Н. Автоматизация процесса вычисления оценок неопределенности измерений // Системы обработки информации. – Х.: XV ВС, 2006. – Вып. 7. – С. 59-61.
12. Захаров И.П. Исползование на метода Монте-Карло за оценяване на неопределеноста на измеренията // Стандартизация, метрология, сертификация (България). – 2006. – № 12. – С. 2-6.

Поступила в редколлегию 3.05.2007

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