

УДК 528.06: 519.688

Т.В. Шушкевич

Оценка возможности моделирования процесса измерения при программном расчете неопределенности

Определены критерии сравнения программных продуктов для расчета неопределенности в области реализации модели измерений. Представлены результаты сравнительного анализа наиболее распространенных универсальных программных продуктов для расчета неопределенности измерений.

Ключевые слова: неопределенность, результат измерений, математическая модель измерения, программное обеспечение.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-96-100

Обработка любых результатов измерений, создание систем и устройств предполагают оценку точности. Введение в международную практику нормативов [1, 2], фактически ставших обязательными регламентами, а также принятие идентичных национальных стандартов [3, 4] регламентируют оценку точности измерительных экспериментов в виде расчета неопределенности результата измерений.

Поскольку нормативы [1, 2] содержат строгую последовательность действий, приводящую к численному выражению неопределенности результата измерений, этот алгоритм реализуется определенным классом компьютерных программ. Можно выделить четыре подхода к созданию программного обеспечения (ПО), предназначенного для расчета неопределенности [5]: в рамках средств автоматизации математических расчетов (Mathcad, MATLAB и т.д.), в рамках программных статистических пакетов (Statistica, пакет R и т.д.), создание утилит для расчета неопределенности определенной измеряемой величины по конкретной методике измерений и создание универсального ПО.

Программы последнего класса могут сильно отличаться друг от друга по функциональности, несмотря на единую нормативную базу. Обзор основных возможностей наиболее распространенного универсального ПО для расчета неопределенности приведен в [6].

Математическая модель

Согласно [1] для получения численного значения неопределенности измерения составляется математическая модель измерения, затем оцениваются все входные величины с указанием закона распределения или стандартной неопределенности каждой из них, анализируется наличие корреляции между входными величинами и осуществляется итоговый расчет неопределенности выходной величины.

То есть ключевым моментом расчета неопределенности является возможность реализовать требуемую модель измерений в выбранном ПО. Некоторые из программных пакетов (например, Uncertainty Analyzer или GUMsim) уже содержат готовые модели измерений для различных случаев, рекомендованные стандартами или другими нормативными документами. Однако в большинстве своем

пользователю самому приходится вводить модель измерения для расчетов неопределенности.

Согласно [1] математическая модель (уравнение измерения) может иметь одну выходную величину – собственно результат измерения и множество входных величин. Поскольку каждая входная величина требует своего описания, их количество, а также возможности в плане характеристики входных величин могут быть выбраны в качестве критериев для сравнения ПО.

Метод Монте-Карло согласно нормативу [2] также предполагает наличие одной выходной величины, однако метрологическая практика знает немало примеров, когда одна и та же совокупность данных используется для получения нескольких характеристик (например, регрессионный анализ или комплексные характеристики, используемые в электротехнике). При вычислении таких характеристик между выходными величинами появляется зависимость, и эту зависимость требуется оценить численно. Соответственно способность ПО реализовать несколько выходных параметров и оценить степень их зависимости также можно предложить в качестве критерия для сравнения.

Громоздкие уравнения измерения, включающие в себя множество источников неопределенности, для прозрачности анализа и классификации удобно представлять в виде иерархических моделей. В таких моделях входные величины сами оказываются зависимыми от входных величин предыдущего уровня детализации модели. Более того, уже оцененную величину зачастую нужно использовать в других расчетах неопределенности. Подобные источники неопределенности можно назвать «вложенными». Наличие функций работы с вложенными источниками, конечно, не является одной из определяющих функций программного обеспечения, но предоставляет определенное удобство при работе, например с калибровочными данными и характеристиками, и может использоваться как еще один критерий сравнения программ.

Еще одним критерием для сравнения может служить наличие блока обработки систематической погрешности измерений. В соответствии с тенденцией, которой подчиняется концепция оценки неоп-

ределенности, термин «погрешность» вообще не стоит употреблять без лишней необходимости, поскольку в большинстве случаев погрешность определить невозможно. Более того, в [1, подразд. 3.2.4] содержится замечание, согласно которому рассуждения об оценке неопределенности проводятся в предположении, что все систематические эффекты по возможности выявлены, и соответствующие поправки внесены в результаты измерений до их обработки для получения оценки неопределенности. Видимо, этот эффект – отсутствие явных указаний на то, как учитывать выявленную систематическую погрешность, – сказался на функциональности программного обеспечения. В явном виде блок обработки систематической погрешности содержится только в разработках компании Integrated Sciences Group в виде рабочего листа Parameter Bias Uncertainty Worksheet. Конечно, это не означает, что в других продуктах нельзя учесть систематическую погрешность, но наличие отдельного блока обработки не позволит упустить ее из виду.

Сравнение особенностей моделирования процесса измерения представлено в табл. 1 для ПО следующих компаний: американская Integrated Sciences Group (Uncertainty Sidekick, Uncertainty Sidekick Pro, Uncertainty Analyzer), болгарская Qualisyst Ltd (QMsyst GUM Educational, QMsyst GUM Standard, QMsyst GUM Professional, QMsyst GUM Enterprise),

израильская Newton Metrology Ltd (Evaluator), немецкие Metrodata GmbH (GUM Workbench Educational, GUM Workbench Standard 1.3, GUM Workbench Professional 2.3, GUM Workbench Professional 2.4), QuoData Quality & Statistics (GUMsim), французские PFSOFT (Gumy + MC-Ed), Jean-Marie Biansan (GUM_MC), ПО «Неопределенность» (разработчик В.В. Новиков, Украина).

В табл. 1, 2 знаком «+» отражено наличие соответствующей особенности или возможности, обозначение «неогр.» указывает на неограничиваемое программно число входных или выходных величин.

Еще один немаловажный фактор – количество доступных для описания случайных величин законов распределения. В рекомендациях по стандартизации [7] отмечается, что при исследованиях надежности, контроле качества и в других задачах статистического анализа используется около ста моделей непрерывных законов распределений, а в прикладных исследованиях используют около тридцати законов и семейств распределений для характеристики наблюдаемых случайных величин.

Число распределений, упоминаемых в [1], намного меньше. Кроме того, методика корректно работает только при условии, что все распределения имеют нормальный закон, а уравнение измерения линейно относительно входных величин.

Таблица 1

Особенности моделирования процесса измерения

Возможности и особенности	Uncertainty Sidekick	Uncertainty Sidekick Pro	Uncertainty Analyzer 3.0	QMsyst GUM Educational	QMsyst GUM Standard	QMsyst GUM Professional	QMsyst GUM Enterprise	Evaluator	GUM Workbench Educational	GUM Workbench Standard 1.3	GUM Workbench Professional 2.3	GUM Workbench Professional 2.4	GUMsim	Gumy	GUM_MC	Неопределенность
Максимальное число входных величин	15	25	1000	10	Неогр.	Неогр.	Неогр.	50	512	512	512	512	Неогр.	>1000	Неогр.	Неогр.
Максимальное число выходных величин	1	1	1	1	Неогр.	Неогр.	Неогр.	1	1	1	Неогр.	Неогр.	1	1	1	1
Вложенные переменные (входные величины)		+	+		+	+	+				+	+	+			+
Число доступных распределений величин	5	5	9	12	12	12	12	7	7	7	7	7	11	5	6	5
Работа с асимметричными распределениями	+	+	+	+	+	+	+				+	+				
Работа с односторонними границами допусков параметров	+	+	+		+	+	+				+	+				
Матрица корреляции для входных величин	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Автоматическая проверка матрицы корреляции					+	+	+				+				+	
Автоматическое определение коэффициентов чувствительности		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
Учет систематической погрешности	+	+	+			+	+									
Корреляционный анализ выходных величин						+	+					+				

Оценка неопределенности входных величин

Возможности и особенности	Uncertainty Sidekick	Uncertainty Sidekick Pro	Uncertainty Analyzer 3.0	QMsys GUM Educational	QMsys GUM Standard	QMsys GUM Professional	QMsys GUM Enterprise	Evaluator	GUM Workbench Educational	GUM Workbench Standard 1.3	GUM Workbench Professional 2.3	GUM Workbench Professional 2.4	GUMsim	Gumy	GUM_MC	Неопределенность
Входные величины типа A																
Максимальное число наблюдений входной величины	200	200	2000	50	Неогр.	Неогр.	Неогр.	Неогр.	9999	9999	9999	9999	Неогр.	100	>500	Неогр.
Импорт данных через буфер обмена	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Импорт данных из стороннего ПО		+	+			+	+			+	+	+				
Корреляционный анализ по результатам наблюдений	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+
Вычисление дополнительных статистических характеристик			+				+					+		+		
Проверка нормальности распределения			+				+									
Исключение выбросов			+													
Входные величины типа B																
Ввод стандартной неопределенности для выбранного распределения	+	+	+	+	+	+	+	+					+	+	+	
Ввод расширенной неопределенности и коэффициента охвата для выбранного распределения	+	+	+	+	+	+	+	+					+			
Ввод расширенной неопределенности и вероятности охвата для выбранного распределения	+	+	+	+	+	+	+	+					+			
Расчет неопределенности по заданной предельной погрешности	+	+	+		+	+	+									+
Ввод заранее заданных характеристик распределения	+	+	+		+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
Число степеней свободы для конечных распределений	(G.3)	(G.3)	(G.3)	∞	∞	∞	∞	Ввод	∞	∞	∞	∞	∞ , ввод	∞	∞	Ввод

Это довольно редкий случай в практической метрологии, но такой подход позволяет унифицировать процедуру расчета неопределенности результата измерений. Если же закон распределения входной величины известен и отличается от нормального, имеет смысл отказаться от процедуры, изложенной в [1], и воспользоваться методом Монте-Карло. При этом число доступных распределений становится ключевым моментом при выборе программного обеспечения. Кроме того, следует принять во внимание возможность работы с асимметричными распределениями и односторонними допусками параметров.

Согласно концепции неопределенности, предложенной в [1], входные величины уравнения измерения могут быть двух типов: тип *A*, оцениваемый статистическими методами, и тип *B*, оцениваемый любыми другими математическими методами или с использованием априорной информации о входной величине.

Следует отметить, что в большинстве программ по умолчанию предполагается, что входные величины типа *A* имеют нормальное распределение (или распределение Стюдента), а остальные, как правило, используются для характеристики входных величин типа *B*.

Отдельно стоит упомянуть программу Evaluator. Практически все, приведенное в качестве критериев сравнения в табл. 1, можно в этой программе реализовать. Однако сделать это можно не с помощью стандартных окон, вкладок или рабочих листов, а создавая необходимые конструкции на встроенном в программу языке. Поскольку целью обзора является предоставление информации о программах «как есть» и, принимая во внимание, что конечные пользователи продукта – не программисты, а инженеры-метрологи или инженеры других специальностей, которым нужно оценить точность измерений, разработанной методики или системы, в таблице эти возможности показаны как отсутствующие. Программа имеет достаточно подробную справку, при необходимости все можно реализовать, однако программа распространяется на коммерческой основе, и вопрос «Стоит ли самому дописывать все, что необходимо для полноценного использования, если в других коммерческих продуктах все функции уже реализованы?» каждый пользователь решает самостоятельно с учетом собственных предпочтений.

Входные величины

В табл. 2 приведены критерии и данные, характеризующие возможности работы программного обеспечения с входными данными типа *A*. Обозначением «неогр.» отмечены программы, не имеющие ограничений максимального числа наблюдений входной величины.

Важным критерием обработки результатов многократных наблюдений является возможность импорта данных. При числе измерений более 30 ручной перенос данных из одной программы в другую

становится неудобен, занимает много времени и не гарантирует отсутствие ошибок, внесенных оператором. Частично эту проблему может решить перенос данных с помощью буфера обмена, который поддерживают все программные продукты. Однако удобнее переносить данные выборками, включающими в себя все результаты наблюдений входной величины. Как правило, под «сторонним ПО» понимаются электронные таблицы MS Excel, с ним работают все отмеченные программы, но возможна работа с базами данных различных форматов (Uncertainty Analyzer).

Как уже отмечалось, корректная работа алгоритма, изложенного в [1], возможна, только если входные величины распределены по нормальному закону, поэтому наличие проверки гипотезы о нормальности распределения можно выбрать в качестве критерия для сравнения программ. Из всего перечня рассмотренных программ лишь две осуществляют такую проверку: программа Uncertainty Analyzer располагает окном Sample Statistics Screen, которое может быть использовано для вычисления статистических характеристик подмножества выборки, проверки и исключения выбросов и проверки нормальности распределения, и программа QMsys GUM Enterprise, в ней нет полноценной проверки статистических гипотез, но при обработке входных данных типа *A* (расчете среднего значения, среднеквадратического отклонения и т.д.) автоматически проверяется нормальность распределения с доверительной вероятностью 0,99 (результат – флажок «да/нет» в соответствующем поле).

В табл. 2 приведены критерии и данные, характеризующие возможности работы программного обеспечения с входными данными типа *B*. В качестве критериев выбраны возможность описания входной величины несколькими альтернативными характеристиками: стандартной неопределенностью, расширенной неопределенностью и коэффициентом охвата или расширенной неопределенностью и вероятностью охвата при заранее выбранном законе распределения. Кроме того, наиболее часто входные величины типа *B* задаются не стандартной неопределенностью, а границами допуска на параметр или величиной допускаемой погрешности, которые являются исходными данными для расчета.

В случае если какая-либо граница (верхняя или нижняя) не важна для контроля, допуск может быть односторонним (возможность работы программы с односторонними допусками см. в табл. 1).

Наиболее простым путем пошли создатели линейки программного обеспечения GUM Workbench – в этих программных продуктах нет альтернативного ввода параметров, величину можно характеризовать только заранее заданными разработчиками параметрами стандартных распределений (табл. 3).

Для программы «Неопределенность» параметры распределения могут вводиться двумя способами. Первый способ – ввод верхней и нижней границ допуска на параметр и числа степеней свободы. При

этом предполагается, что распределение симметрично относительно указанных границ. Вторым способом – ввод центра распределения, его полуширины и числа степеней свободы. Для нормального закона к этим параметрам в обоих случаях добавляется вероятность охвата.

Т а б л и ц а 3

**Параметры стандартных распределений
ПО GUM Workbench**

Наименование распределения	Вводимые параметры	Число степеней свободы
Нормальное распределение	Оценка входной величины. Расширенная неопределенность. Коэффициент охвата	Предполагается более 100
Распределение Стьюдента	Оценка входной величины. Стандартная неопределенность	Ручной ввод
Равномерное, треугольное и U-распределение (арксинусное)	Математическое ожидание (оценка входной величины), полуширина распределения	Предполагается равным бесконечности
Трапецеидальное распределение	Математическое ожидание (оценка входной величины), полуширина распределения, коэффициент формы	Предполагается равным бесконечности

Последний критерий – число степеней свободы для конечных распределений. Имеются в виду распределения с явно выраженными границами функции плотности вероятностей случайной величины – равномерное, треугольное, трапецеидальное и т.д. В большинстве случаев при расчете предполагается, что число степеней свободы соответствует ∞ , хотя в [1] приведена формула G.3, по которой можно определить число степеней свободы для входных величин типа *B*, на которую приводятся ссылки в табл. 2. Некоторые программы не рассчитывают число степеней свободы для конечных распределений, а предполагают его ручной ввод (обозначение «ввод» в табл. 2).

В программах, оперирующих с вложенными переменными, может встречаться и другой тип входной величины – вычисляемый. Имеется в виду, что входная величина основного уравнения измерения также представляет собой функцию каких-либо переменных и ей невозможно приписать тип *A* или тип *B* заранее.

Литература

1. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf, свободный (дата обращения: 10.12.2016).
2. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Propagation of distributions using a Monte Carlo method [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf, свободный (дата обращения: 10.12.2016).
3. ГОСТ Р 54500.3–2011. Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200088855>, свободный (дата обращения: 10.12.2016).
4. ГОСТ Р 54500.3.1–2011. Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200088856>, свободный (дата обращения: 10.12.2016).
5. Гулова О.А. Выражение неопределенности результатов измерений / О.А. Гулова, Т.В. Шушкевич // Инновационная наука. – 2016. – №6, ч. 2. – С. 58–60.
6. Шушкевич Т.В. Программный расчет неопределенности результатов измерений // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806>, свободный (дата обращения: 20.12.2016).
7. Р 50.1.033–2001. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – Ч. 1. Критерии типа хи-квадрат. – М.: Госстандарт России, 2001. – 91 с.

Шушкевич Татьяна Викторовна

Канд. техн. наук, доцент каф. информационных измерительных технологий и систем (ИИТиС) инженерно-технологической академии (ИТА) Южного федерального университета (ЮФУ)
Тел.: +7 (863-4) 37-16-38
Эл. почта: tvshushkevich@sfsu.ru

Shushkevich T.V.

Evaluated feasibility of modeling the measurement process in case of software uncertainty calculation

Criteria to compare software for evaluation of uncertainty in the field of implementation of the measurements model are defined. The results of comparative analysis of commonly used software to calculate measurement uncertainty are presented.

Keywords: uncertainty, measurement result, mathematical model of the measurement, software.