

# Прикладні аспекти: вимірювання параметрів складних об'єктів

УДК 389.14

Т.М. Владимірова, С.И. Третьяков

ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет  
им. М.В. Ломоносова, Архангельск

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

*В статье приведен анализ процедуры оценки неопределенности, связанной с измерением характеристик объектов испытаний для контроля непрерывного производства. Такая неопределенность объединяет вклады в неопределенность процесса измерений и изменчивости производственного процесса. Оба типа вкладов включают в себя составляющие, зависящие от работы операторов, внешних условий и других воздействий. В целях разделения влияния процесса измерений и изменчивости, свойственной производственному процессу, измерения целесообразно проводить на выбранных образцах для получения данных о процессе измерений.*

**Ключевые слова:** неопределенность измерения, стандартная неопределенность, производственный процесс, выбранный образец.

### Введение

**Постановка проблемы.** Знание неопределенности, связанной с результатами измерений, является важным для интерпретации результатов. Без количественных оценок неопределенности невозможно решить, превышают ли наблюдаемые отклонения результатов экспериментальную изменчивость, соответствуют ли объекты испытаний установленным требованиям. Без информации о неопределенности существует риск неверного толкования результатов, а неправильные решения могут привести к ненужным расходам при производстве, неправильным судебным выводам, неблагоприятным последствиям для здоровья или неблагоприятным социальным последствиям [1]. Применение методологии, предложенной в руководстве по выражению неопределенности измерений (далее – GUM) [2], необходимо адаптировать к реальным условиям конкретных технологических процессов и производств, проводя сравнения в оценке неопределенности технологических параметров на основе данных совместных измерений.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В метрологической практике часто используют математическую статистику как теоретическую основу для оценки качества результатов измерений.

Абсолютное большинство практических руководств по метрологии, таких как ставшая уже классической монография М.Ф. Маликова [3] или исследования В.И. Дворкина на примере химического анализа [4] включают в себя целый раздел, посвя-

щенный обработке результатов измерений. В настоящее время, несмотря на дифференциацию мнений о необходимости ее введения отдельными учеными [5], особое место в работе метрологов занимают вопросы оценки неопределенности.

**Формулирование цели статьи.** Международной организацией по стандартизации разработано множество нормативных документов по неопределенности результатов измерений [2, 6 – 9], на основе которых подготовлен комплекс национальных стандартов РФ, применение которых в повседневной метрологической практике рассматривается как обязательное.

Отдельного внимания заслуживает вопрос оценки неопределенности технологических процессов и производств. Для обеспечения эффективности измерений в технологических процессах ВНИИМС разработаны рекомендации МИ 2233-2000 [10]. Для оценки неопределенности, связанной с измерением характеристик объектов испытаний ОАО «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (ОАО «НИЦ КД») на основе международных технических условий ИСО/ТУ 21749:2005 подготовлены рекомендации Р 50.1.062-2007 [11].

Практика применения положений данных нормативных документов при решении практических задач контроля качества готовой продукции, производственных процессов и их метрологического обеспечения имеет особенности, характерные для конкретной отрасли производства. Адаптация моде-

ли, предложенной стандартом необходима и в системах тестирования, предваряющего производственный цикл [12]. Поэтому необходимо выделить особенности оценки неопределенности непрерывных производственных процессов.

## Основной материал

### 1. Статистические методы оценки неопределенности

Согласно концепции неопределенности, целью измерения является достоверная оценка параметров распределения вероятности, характеризующих измеряемую величину. Под этими параметрами чаще всего подразумевают среднее значение и стандартное отклонение. Упрощенно, можно сказать, что неопределенность измерений – это неуверенность в точности результатов измерения. Задача специалистов метрологов численно оценить степень этой неуверенности (неопределенности). Численная оценка неопределенности включает в себя два основных аспекта: в каких пределах вокруг результата измерения может находиться истинное значение измеряемой величины и с какой вероятностью оно в эти пределы попадает.

GUM [2] рекомендует корректировать результат измерений относительно всех признанных значимыми систематических воздействий, так чтобы результат представлял собой наилучшую оценку измеряемой величины и возможно было бы построить полную модель измерительной системы. Модель устанавливает функциональную связь между набором входных величин, от которых зависит измеряемая величина, и измеряемой (выходной) величиной.

Цель оценки неопределенности состоит в нахождении интервала, который в среднем охватывает большую часть значений, приписываемых измеряемой величине. Поскольку смещение невозможно определить точно, если результат измерений скорректирован на смещение, корректировке также соответствует неопределенность.

Общий подход к оценке неопределенности [11], начиная с процесса моделирования, включает в себя:

- разработку математической модели (функции) процесса измерений или измерительной системы, которая связывает входные величины, включая воздействующие величины, с выходной (измеряемой) величиной. Эту модель можно описать формулой, которую используют для вычисления результата измерений с учетом случайных воздействий, воздействий внешних условий и других, таких как корректировка смещения, которая может повлиять на результат измерений;

- определение наилучшей оценки и соответствующей стандартной неопределенности для функции, описывающей модель измерительной системы;

- оценка вклада каждой входной величины в стандартную неопределенность результата измерений. Эти вклады должны учитывать неопределенность, соответствующую случайным и систематическим воздействиям входных величин, и могут предусматривать более детальные оценки неопределенности;

- объединение стандартных неопределенностей для получения суммарной стандартной неопределенности результата измерений. Эту оценку неопределенности выполняют в соответствии с GUM [2], используя закон распространения неопределенности или общие аналитические или численные методы, если условия для закона распространения неопределенности не выполняются или отсутствует необходимая информация;

- вычисление расширенной неопределенности, получая интервал, который покрывает значения измеряемой величины с заданным уровнем доверия.

В соответствии с GUM [2] оценку стандартной неопределенности можно вычислять любыми методами. Существует различие между оценкой неопределенности типа A, полученной на основе повторных наблюдений, и оценкой неопределенности типа B, полученной любыми другими способами. В оценке суммарной стандартной неопределенности оба типа оценок должны быть представлены дисперсиями и использованы одинаковым образом. Все детали этой процедуры и дополнительные предположения, на которых она основана, приведены в GUM.

Цель данной работы состоит в описании процедуры оценки неопределенности статистическими методами в производственных условиях, при повторении измерений входных величин измерительной системы или всей процедуры измерений.

### 2. Этапы оценки неопределенности

Для организации процедуры оценки неопределенности производственного процесса необходимо выбрать оптимальную систему объектов – выбранных образцов. Выбранный образец, в соответствии с [11] должен обладать рядом свойств: быть доступным для проведения периодических измерений, однородным по материалу и свойствам с объектом, стабильным.

Первым этапом оценки неопределенности является определение измеряемой величины, результат измерений которой необходимо фиксировать при испытаниях объекта. Следует обеспечить однозначное определение измеряемой величины, поскольку от этого зависит оценка неопределенности. Для этого необходимо установить, что является объектом измерений:

- величина в конкретный момент времени в конкретной точке пространства;

– величина в конкретный момент времени, усредненная по заданной пространственной области;

– величина в конкретной точке пространства, усредненная по периоду времени.

Если значение производственного параметра может быть измерено непосредственно, оценка стандартной неопределенности зависит от количества повторных измерений, внешних условий и эксплуатационных режимов, в которых проведены измерения. Она также зависит от других источников неопределенности, которые невозможно наблюдать в условиях повторения измерений. С другой стороны, если значение измеряемой величины не может быть измерено непосредственно, а должно быть вычислено по результатам измерений косвенных величин, должна быть определена модель (или функция), связывающая эти величины. Для оценки стандартной неопределенности измеряемой величины необходимо определить стандартную неопределенность, соответствующую наилучшим оценкам косвенных величин.

Согласно [11] выделяют следующие этапы оценки неопределенности:

а) для оценки типа А:

1) если выходная величина представлена  $Y$ , а измерения  $Y$  могут быть повторены, используют модель ANOVA (Analysis of variance) для оценки составляющих дисперсий, соответствующих случайным воздействиям на  $Y$ :

– результатов повторений измерений на объекте испытаний;

– результатов измерений на выбранном образце;

– результатов измерений, выполненных в соответствии с планом эксперимента;

2) если измерения  $Y$  не могут быть непосредственно повторены и модель  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  известна, а измерения входных величин  $X_i$  могут быть повторены, оценивают неопределенности, соответствующие наилучшим оценкам  $x_i$  для  $X_i$ , а затем применяют закон распространения неопределенности;

3) если измерения  $Y$  или  $X_i$  не могут быть повторены, применяют оценки типа В:

б) Для оценки типа В оценивают стандартную неопределенность, соответствующую наилучшей оценке каждой входной величины.

с) Объединяют стандартные неопределенности типов А и В для получения стандартной неопределенности результатов измерений.

д) Вычисляют расширенную неопределенность.

### 3. Распространение неопределенности

Изложенный в рекомендациях [11] подход к оценке неопределенности называют нисходящим, так как составляющие неопределенности оценивают на основе повторных измерений. Для установления

отличия от закона распространения неопределенности воспользуемся парой распространенных производственных параметров – давление ( $p$ ) и температура ( $t$ ). При характеристике технологических процессов справедлива зависимость:  $p = f(t)$ .

Парная оценка взаимозависимых технологических параметров имеет ряд преимуществ, например:

– возможность обработки ковариаций между параметрами;

– возможность обработки источников неопределенности, которые можно выявить, если охватить все производственные режимы и длительный промежуток времени.

Если учесть все возможные возмущающие воздействия на технологические параметры невозможно, то используют рекомендации GUM [2], вычисляя результат измерения, стандартную неопределенность обоих параметров и объединяя их в стандартную неопределенность, соответствующую результату измерений.

Различия между найденным и реальным значением могут быть обусловлены наличием неизвестных ковариаций, плохой организацией работ, ошибками округления.

В общем случае закон распространения неопределенности использует модель в виде функции одной или нескольких переменных  $X, Z, \dots$

$$Y = f(X, Z, \dots)$$

Эта модель позволяет определить оценки стандартного отклонения  $Y$  в следующем виде:

$$S_Y^2 \approx \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 S_X^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2 S_Z^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right) S_{XZ}^2 + \dots,$$

где  $S_X$  – стандартная неопределенность, соответствующая  $X$ ;

$S_Z$  – стандартная неопределенность, соответствующая  $Z$ ;

$S_{XZ}$  – ковариация  $X$  и  $Z$ ;

$\partial f/\partial X$  – частная производная функции  $f(X, Z, \dots)$  по  $X$  в точке  $(X, Z, \dots)$  наилучших оценок  $X, Z, \dots$  и т.д.

Если выполняются не совместные измерения, то определение ковариации может быть довольно трудным. В любом случае члены с ковариациями должны быть включены в расчеты только если они были оценены по достаточному количеству данных или имеется другая информация, допускающая их определение.

### Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что оценки составляющих неопределенности могут быть получены на основе статистического анализа повторных измерений с помощью средств измерений, объектов испытаний, технологического оборудования или выбран-

ных образцов.

Производственные лаборатории контроля качества готовой продукции должны представлять результаты измерений с соответствующей неопределенностью. Оценка неопределенности – непрерывный процесс, требующий затрат времени и средств. Неопределенность производственного процесса включает в себя неопределенность процесса измерений и изменчивости производственного процесса. Оба типа таких вкладов содержат составляющие, зависящие от работы операторов, внешних условий и других возмущающих воздействий.

Для снижения взаимного влияния измерений технологических параметров и изменчивости производственного процесса, необходимо проводить оценку неопределенности таких измерений на основе моделирования производственных объектов.

Одним из наиболее перспективных методов является проведение измерений на выбранных образцах. Такие измерения идентичны выполненным на объекте испытаний, их можно использовать для идентификации переменных во времени параметров, а так же для контроля стабильности технологических процессов.

### Список литературы

1. Р 50.1.060-2006 Руководство по использованию оценок повторяемости, воспроизводимости и правильности при оценке неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2007. – 80 с.
2. ISO/IEC Guide 98:1995. Руководство по выражению неопределенности измерений: пер. с англ. – С-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999 Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). – 102 с.
3. Маликов М.Ф. Основы метрологии / М.Ф. Маликов. – М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949. – 479 с.

4. Дворкин В.И. Метрология и обеспечение качества количественного химического анализа / В.И. Дворкин. – М.: Химия, 2001. – 262 с.

5. Левин С.Ф. Легенда о неопределенности / С.Ф. Левин // Партнеры и конкуренты. – 2001. – №1. – С. 13-25.

6. РМГ 91 – 2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы. – Введ. 01-02-2010. – М.: Стандартинформ, 2009 – 80 с.

7. ИСО 5725-1-1994. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – Введ. 01-11-2002. – М.: Стандартинформ, 2002 – 26 с.

8. Руководство Еврочим/CITAC. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях. – 2-е изд. – СПб: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2002 ((EURACHEM/CITAC Guide): Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (Second Edition). – 86 с.

9. РМГ 91 – 2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы. – Введ. 01-02-2010. – М.: Стандартинформ, 2009 – 80 с.

10. МИ 2233-2000. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Основные положения. Рекомендации.

11. Р 50.1.062 – 2007. Статистические методы. Неопределенность при повторных измерениях и иерархических экспериментах. – М. Стандартинформ, 2008. – 36 с.

Поступила в редколлегию 6.02.2013

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Н.И. Богданович, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова.

### ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ВИРОБНИЦТВ

Т.М. Владимірова, С.І. Третяков

В статті наведено аналіз процедури оцінювання невизначеності вимірювань, яка пов'язана з вимірюванням характеристик об'єктів для контролю неперервного виробництва. Така невизначеність об'єднує внески в невизначеність процесу вимірювань та мінливість виробничого процесу. Обидва типи вкладів включають до себе складові, які залежать від роботи оператора, зовнішніх умов та інших впливів. З метою розділення впливу процесу вимірювань та мінливості, яка властива виробничому процесу, вимірювання доцільно проводити на обраних зразках для отримання даних щодо процесу вимірювань.

**Ключові слова:** невизначеність вимірювань, стандартна невизначеність, виробничий процес, обраний зразок.

### THE EVALUATION OF MEASUREMENTS UNCERTAINTY TECHNOLOGICAL PROCESS AND PRODUCTIONS PARAMETERS

T.M. Vladimirova, S.I. Tretyakov

The article outlines the analysis of uncertainty evaluation procedures associated with changing in the characteristics of the test objects for the control of continuous production. This uncertainty combines the measurement process uncertainty with the technological process variation. Both components depend on operators' work, external conditions and another influences. One solution is the measurement from sampling.

**Keywords:** measurement uncertainty, standard uncertainty, technology process, sampling, selection models.