

УДК 006.91 (083.131)

А.И. Бочарова, С.В. Водотыка, И.П. Захаров

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В СТАНДАРТЕ ISO 14253-2

Проанализирован алгоритм оценивания неопределенности измерений на основе модели прозрачного и черного ящиков, рассмотрены особенности оценивания неопределенности входных величин по типу А и В, составление бюджета неопределенности, вычисления суммарной стандартной и расширенной неопределенности для коррелированных и некоррелированных входных величин. Приведены реализации процедуры менеджмента неопределенности PUMA для заданного и проектируемого измерительных процессов.

**Ключевые слова:** неопределенность, ISO 14253-2, GUM, менеджмент неопределенности, черный ящик, прозрачный ящик.

### Введение

После издания Руководства по выражению неопределенности измерений (GUM) [1] появилась необходимость в создании аналогичных нормативных документов для различных видов измерений. Так, для калибровочных лабораторий было создано Руководство ЕА 4/02, в области аналитических измерений – QUAM-P1:2000 и т.д. Для GPS (geometrical product specification) измерений была разработана техническая спецификация ISO/TS 14253-2:1999 «Геометрические характеристики изделий – Контроль при измерении обрабатываемых деталей и средства измерения. Часть 2: Руководство по оценке неопределенности в GPS измерениях, при калибровке средства измерения и верификации продукции» [3] (далее – стандарт).

Следует отметить, что этот стандарт имеет ряд особенностей в оценивании неопределенности измерений по сравнению с GUM, включая процедуру менеджмента неопределенности (PUMA), которые можно эффективно применять не только для геометрических, но и для любых других видов измерений. К сожалению, стандарт до сих пор не переведен на украинский язык, несмотря на то, что ДСТУ ISO/TS 14253-2:2006 [3] является действующим в Украине с 01.10.2007.

**Целью статьи** является анализ особенностей оценивания и менеджмента неопределенности в стандарте.

### Алгоритм оценивания неопределенности в ISO 14253-2

Алгоритм оценивания неопределенности в стандарте включает следующие операции.

#### 1. Составление модельного уравнения

В стандарте рассматриваются два крайних вида модельного уравнения:

- прозрачный ящик

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_{p+r}), \quad (1)$$

где  $Y$  – измеряемая величина;  $f$  – модельная функция;  $X_i$  –  $i$ -я входная величина,  $i = 1, 2, \dots, p+r$  (эта модель соответствует модельному уравнению GUM);

- черный ящик

$$Y = X + \sum_{i=1}^{p+r} C_i, \quad (2)$$

где  $X$  – показание измерительного прибора;  $C_i$  –  $i$ -я аддитивная поправка на известную (неисключенную) систематическую погрешность (погрешность калибровки, температурная погрешность, погрешность из-за деформации и т.п.).

В выражениях (1), (2) символы  $p$  и  $r$  обозначают соответственно количество некоррелированных и коррелированных источников неопределенности.

#### 2. Оценивание неопределенностей входных величин

Осуществляется в стандарте двумя способами.

1. По типу А, на основе отклонений результатов многократных наблюдений  $x_i$  от их среднего арифметического  $\bar{x}$ :

$$u_A = u(\bar{x}) = h \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

где  $h$  – коэффициент надежности<sup>1</sup>, вводимый при малом числе наблюдений ( $n < 10$ ) (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициентов надежности

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

<sup>1</sup> Коэффициент надежности  $h$  рассчитан как частное от деления коэффициента Стьюдента для вероятности 0,9545 на принятый в стандарте коэффициент охвата  $k = 2$ .

2. По типу В: определяется через известные границы  $a$  неисключенной систематической погрешности (НСП) и коэффициент распределения  $b$ , характеризующий закон распределения погрешности внутри этих границ:  $u_B = a \cdot b$ .

Этот коэффициент приведен в стандарте для трех самых распространенных видов законов распределения:

- распределение Гаусса,  $b = 0,5$ ;
- равномерное распределение,  $b = 0,6$ ;
- $U$  – распределение (арксинусное),  $b = 0,7$ .

Если закон распределения НСП неизвестен, то следует выбрать  $U$  – распределение (с наибольшим  $b$ )<sup>2</sup>.

### 3. Учет корреляции

В стандарте рассматривается два случая<sup>3</sup>:

• составляющие некоррелированы, коэффициент корреляции  $\rho = 0$ ;

• составляющие строго коррелированы, тогда принимается  $\rho = 1, -1$ .

### 4. Вычисление суммарной стандартной неопределенности $u_c$

Суммирование некоррелированных ( $\rho = 0$ ) составляющих неопределенности осуществляется геометрически (корень квадратный из суммы квадратов), а сильно коррелированных составляющих – арифметически:

- для модели в виде прозрачного ящика (1):

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left( \frac{\partial Y}{\partial X_i} u(X_i) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^r \frac{\partial Y}{\partial X_i} u(X_i) \right)^2}, \quad (4)$$

где  $\frac{\partial Y}{\partial X_i}$  – коэффициент чувствительности;  $u(X_i)$  – стандартная неопределенность  $i$ -й входной величины;

- для модели в виде черного ящика (2):

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^p [u(C_i)]^2 + \left( \sum_{i=1}^r u(C_i) \right)^2}. \quad (5)$$

В модели черного ящика предполагается, что составляющие неопределенности аддитивные, поэтому, коэффициенты чувствительности индивидуальных составляющих неопределенности равны 1.

### 5. Составление бюджета неопределенности

В стандарте (в отличие от GUM) предусмотрено составление бюджета неопределенности, включающего в себя информацию для каждой входной

величины о типе оценки, типе распределения, количестве многократных наблюдений  $n$ , границах рассеивания  $a$  НСП, коэффициенте корреляции  $\rho$ , коэффициенте распределения  $b$ , вкладе в суммарную неопределенность, а также информацию о суммарной стандартной  $u_c$  и расширенной неопределенности.

### 6. Вычисление расширенной неопределенности

Осуществляется в стандарте для вероятности 0,95 по формуле<sup>4</sup>:

$$U = k \cdot u_c, \quad k = 2.$$

## Менеджмент неопределенности

Рассматриваемый стандарт представляет Процедуру для Менеджмента Неопределенности (the Procedure for Uncertainty Management – PUMA), которая является практической, итеративной процедурой оценивания неопределенности измерения, предназначенной для:

- единичных результатов измерения;
- сравнения результатов двух или более измерения;
- сравнения результатов измерения со спецификацией для подтверждения соответствия или несоответствия с ней.

При рассмотрении PUMA в стандарте введены следующие виды расширенной неопределенности:

$U_A$  – истинная, получаемая при идеальном оценивании;  $U_C$  – действительная (рассчитанная по GUM);  $U_{EN}$  – приблизительная, оцененная упрощенным итерационным методом с числом итераций  $N$ ;  $U_T$  – целевая, оптимальная для данной измерительной задачи;  $U_R$  – требуемая (заказчиком) для данной измерительной задачи.

Итеративный метод основан в основном на стратегии верхнего предела, т.е. на переоценке неопределенности на всех уровнях, но при итеративном контроле результата измерения. При помощи итеративного метода становится возможным найти компромисс между риском, усилием и стоимостью при оценке и составлении бюджета неопределенности. Предварительным и необходимым условием для разработки бюджета и управления неопределенностью является ясно установленная и определенная измерительная задача. В стандарте рассматривается менеджмент неопределенности для заданного и разрабатываемого измерительных процессов.

<sup>2</sup> В GUM при неизвестном законе распределения рекомендуют брать равномерный закон.

<sup>3</sup> При этом отпадает необходимость оценивания коэффициента корреляции, что при малых объемах выборки может привести к недостоверным оценкам неопределенности, а также упрощается суммирование коррелированных составляющих (см. п. 4).

<sup>4</sup> В GUM, при наличии неопределенности типа А, коэффициент охвата рассчитывают как коэффициент Стьюдента для эффективного числа степеней свободы, определяемого по формуле Велча-Саттервейта. В стандарте эта процедура заменяется введением коэффициентов надежности.

### 1. Менеджмент неопределенности для заданного измерительного процесса

Менеджмент неопределенности измерения для данной измерительной задачи (блок 2) и существующего измерительного процесса (блок 1) показан на рис. 1.

Принцип измерения (блок 3), метод измерения

(блок 4), процедура измерения (блок 5) и условия измерения (блок 6) зафиксированы и не могут быть изменены. Единственной задачей является оценка существенности неопределенности измерения. Требуемая неопределенность  $U_R$  должна быть задана или принята (например, на базе предписанных допусков измеряемой величины).

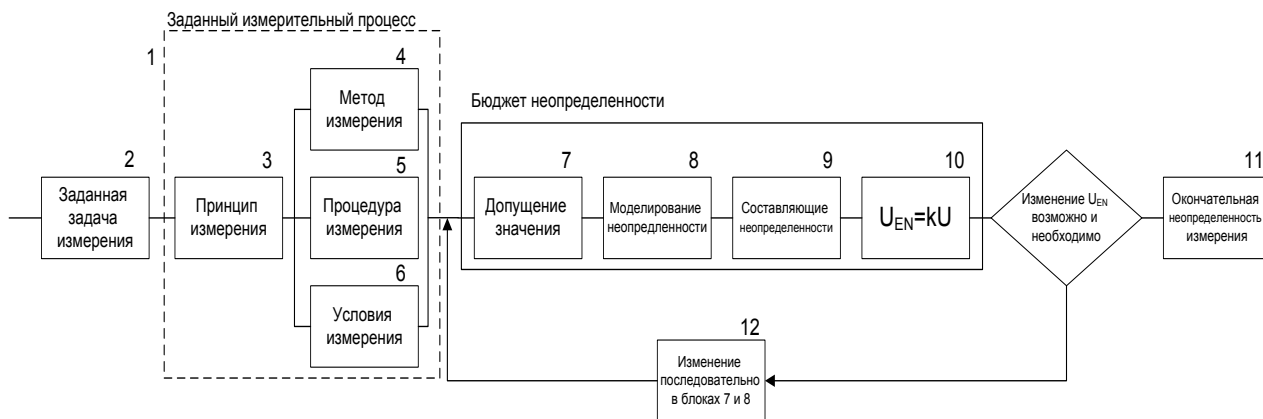


Рис. 1. Менеджмент неопределенности измерения для заданного измерительного процесса

Первая итерация проводится только для ориентации, и отыскания доминирующих источников неопределенности. Единственное, что следует сделать в процессе менеджмента в этом случае – это улучшить оценивание доминирующих источников неопределенности, чтобы подойти как можно ближе к истинной оценке составляющих неопределенности, избегая, таким образом, очень больших переоценок.

Процедура менеджмента состоит в выполнении следующих операций:

а) выполнение первой итерации, основанной преимущественно на модели черного ящика процесса оценивания неопределенности и составление предварительного бюджета неопределенности (блоки 7–9), стремясь к получению первой приближенной оценки расширенной неопределенности,  $U_{E1}$  (блок 10). Все оценки приближенной неопределенности  $U_{EN}$  выполняются как оценки верхних границ;

б) сравнение первой приближенной неопределенности  $U_{E1}$  с требуемой неопределенностью  $U_R$  (блок А) для заданной измерительной задачи:

1) если  $U_{E1}$  приемлема ( $U_{E1} \leq U_R$ ), данная измерительная процедура является адекватной для измерительной задачи (блок 11);

2) если  $U_{E1}$  не приемлема ( $U_{E1} > U_R$ ), или если нет требуемой неопределенности, но получение нижнего и более достоверного значения оценки неопределенности необходимо, итеративный процесс продолжается;

с) проведение анализа значений вкладов неопределенности и выявление доминирующих компонентов;

д) внесение изменений на допущения или уточнение составляющих неопределенности, для того, чтобы сделать более точной оценку верхней границы доминирующих составляющих неопределенности (блок 12). Изменение на более подробное модельное уравнение или повышение разрешения измерительного процесса (блок 12).

е) выполнение второй итерации бюджета неопределенности (блоки 7–9), стремясь ко второй, меньшей и более точной оценке верхней границы неопределенности измерения,  $U_{E2}$  (блок 10);

ф) сравнение второй оценки неопределенности  $U_{E2}$  (блок А) с требуемой неопределенностью  $U_R$  для реальной задачи измерения:

1) если  $U_{E2}$  приемлема (например, если  $U_{E2} \leq U_R$ ), тогда бюджет неопределенности второй итерации доказал, что данная процедура измерения соответствует задаче измерения (блок 11);

2) если  $U_{E2}$  не приемлема ( $U_{E2} > U_R$ ), или требуемая неопределенность отсутствует, но получение меньшего и более достоверного значения оценки неопределенности необходимо, то производится третья (и, возможно, большая) итерация. Следует повторить анализ составляющих неопределенности (произвести дополнительные изменения допущений, уточнение знаний, изменение в модели, и т.д. (блок 12)) и сконцентрироваться на текущих доминирующих составляющих неопределенности;

г) если использованы все возможности для установления более точной оценки верхней границы неопределенности измерения без достижения приемлемой неопределенности измерения  $U_{EN} \leq U_R$ ,

можно считать доказанным невозможность достижения требуемой неопределенности  $U_R$ .

**2. Менеджмент неопределенности при проектировании и разработке измерительного процесса**

Целью менеджмента является построение измерительной процедуры, адекватной соответствующим измеряемым характеристикам (характеристикам объекта измерения или метрологическим харак-

теристикам средств измерения). Менеджмент основывается на поставленной задаче измерения (блок 1 на рис. 2) и соответствующей ей целевой неопределенности,  $U_T$  (блок 2 на рис. 2) и включает в себя следующие операции (рис. 2):

а) выбор принципа измерения (блок 3) на основе опыта и возможных средств измерений, имеющих в наличии в компании;

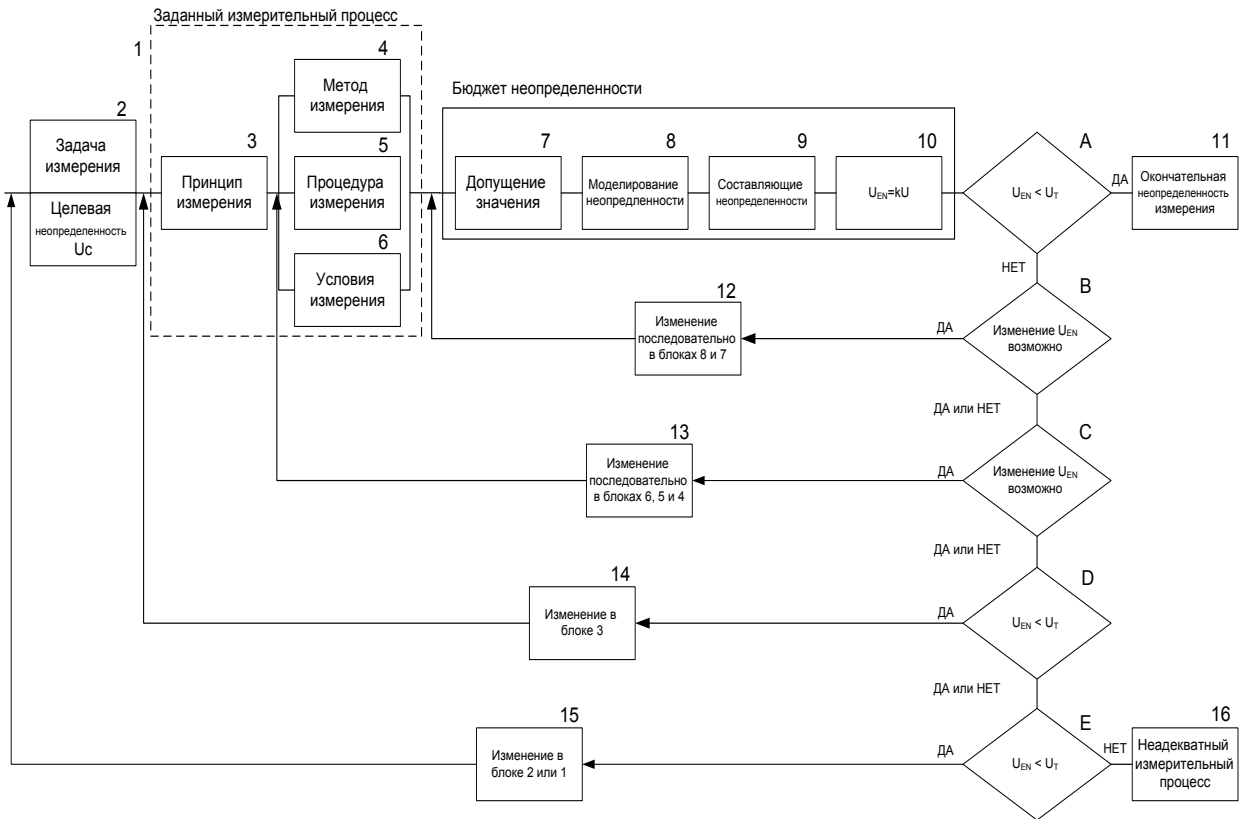


Рис. 2. Менеджмент неопределенностью измерения для разрабатываемого измерительного процесса

б) установление и документирование предварительного метода измерения (блок 4), процедуры измерения (блок 5) и условий измерения (блок 6) на основе опыта и известных возможностей в компании;

в) выполнение первой итерации, основанной преимущественно на модели черного ящика процесса оценивания неопределенности и составление предварительного бюджета неопределенности (блоки 7–9), стремясь к получению первой грубой оценки расширенной неопределенности,  $U_{E1}$  (блок 10).

г) сравнение первой оцененной неопределенности,  $U_{E1}$ , с целевой неопределенностью  $U_T$  (блок А);

1) если  $U_{E1}$  приемлема ( $U_{E1} \leq U_T$ ), то данная измерительная процедура является соответствующей для измерительной задачи (блок 11);

2) если  $U_{E1} \ll U_T$ , тогда процедура измерения технически приемлема, но может существовать возможность для изменения метода и/или процедуры

(блок 13) для получения более эффективного процесс измерения по стоимости при возрастающей неопределенности. Затем необходима новая итерация для оценки результирующей неопределенности измерения,  $U_{E2}$  (блок 10);

3) Если  $U_{E1}$  не приемлема ( $U_{E1} > U_T$ ), итерационный процесс продолжается, или делается заключение о том, что реальная процедура измерения невозможна.

е) перед новой итерацией следует произвести анализ значений вкладов неопределенности.

ф) если  $U_{E1} > U_T$ , тогда необходимо изменить допущения, модельное уравнение или улучшить знания о составляющих неопределенности (блок 12), чтобы сделать более точным оценивание верхней границы наибольших (доминирующих) составляющих неопределенности;

г) выполнение второй итерации бюджета неопределенности (блоки 7–9), для получения второй, меньшей и более точной оценки верхней границы

неопределенности измерения,  $U_{E2}$  (блок 10);

h) сравнение второй оцененной неопределенности  $U_{E2}$  с целевой неопределенностью  $U_T$  (блок А);

1) если  $U_{E2}$  приемлема ( $U_{E2} \leq U_T$ ), то данная процедура измерения соответствует задаче измерения (блок 11);

2) если  $U_{E2}$  не приемлема ( $U_{E2} > U_T$ ), то необходимо проведение третьей (и, возможно, большей) итерации. Повторение анализа источников неопределенности (дополнительные изменения допущений, модельного уравнения и повышения знаний о составляющих неопределенности (блок 12)), концентрирование на текущих больших источниках неопределенности;

і) если все возможности для установления более точной (меньшей) оценки верхней границы неопределенностей измерения использованы без подхода к приемлемой неопределенности измерения  $U_{EN} \leq U_T$ , то необходимо изменение метода, процедуры или условий измерения (блок 13) для (возможного) снижения значения оцененной неопределенности,  $U_{EN}$ . Процедура итерации начинается снова с первой итерации.

ј) если изменения в методе, процедуре или условиях (блок 13) не приводят к приемлемой неопределенности измерения, последней возможностью является изменение принципа измерения (блок 14) и повторение вышеописанной процедуры снова;

к) если изменение принципа измерения и соответствующих итераций, описанных выше, не приводит к приемлемой неопределенности измерения, окончательной возможностью является изменение задачи измерения и/или целевой неопределенности (блок 15) и повторение вышеописанной процедуры снова;

л) если изменение задачи измерения или заданной неопределенности невозможно, то считается доказанным отсутствие реальной процедуры измерения (блок 16).

## Выводы

1. Анализ процедуры оценивания неопределенности в GUM и стандарте ISO 14253-2 выявил отличия при составлении модельного уравнения, оценивании неопределенности по типу А, выборе закона распределения при оценивании неопределенности по типу В, учете корреляций, выборе коэффициента охвата.

2. Рассмотрены процедуры оценивания неопределенности для заданного и разрабатываемого измерительного процесса, которыми можно воспользоваться при создании процедур оценивания неопределенности измерений для существующих и разрабатываемых методик выполнения измерений.

## Список литературы

1. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO (GUM:1995).*
2. *ISO 14253-2:1999 Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification*
3. *ДСТУ ISO/TS 14253-2:2006 Вимоги до геометричних розмірів виробів. Перевірка вимірюванням робочих зразків та засобів вимірювальної техніки. Частина 2. Рекомендації з оцінювання невизначеності вимірювань геометричних розмірів виробів, калібрування засобів вимірювальної техніки та контролю виробів (ISO/TS 14253-2:1999, IDT).*
3. *ISO 14253-1:1998, Geometric Product Specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for proving conformance or nonconformance with specifications.*

Поступила в редколлегию 8.04.2010

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

## ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ У СТАНДАРТІ ISO 14253-2

О.І. Бочарова, С.В. Водотика, І.П. Захаров

*Проаналізовано алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань на основі моделі прозорого та чорного ящиків, розглянуто особливості оцінювання невизначеності вхідних величин за типом А і В, складання бюджету невизначеності, обчислення сумарної стандартної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих вхідних величин. Наведена реалізація процедури менеджменту невизначеності PUMA для існуючого та проектуемого вимірювальних процесів.*

**Ключові слова:** невизначеність, ISO 14253-2, GUM, менеджмент невизначеності, чорний ящик, прозорий ящик.

## FEATURES OF MEASUREMENTS UNCERTAINTY EVALUATION IN ISO 14253-2

A.I. Bocharova, S.V. Vodotyka, I.P. Zakharov

*The algorithm of measurements uncertainty evaluation on the basis of models of a transparent and black boxes is analysed, features of uncertainty evaluation of input quantity values on type A and B, drawing up of the uncertainty budget, calculation of the total standard and expanded uncertainty for correlated and uncorrelated input quantity are considered. Realization of procedure of management of uncertainty PUMA from the given and projected measuring processes are resulted.*

**Keywords:** uncertainty, ISO 14253-2, GUM, management of uncertainty, black box, transparent box.