

# Порівняльний аналіз характеристик точності вимірювань

І.П. Захаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Миросицька, 42, 61002, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, просп. Науки, 14, 61166, Харків, Україна  
newzip@ukr.net

## Анотація

Паралельне співіснування теорії похибок і концепції невизначеності в Україні протягом майже 30-річного періоду, викликаючи постійні дискусії, ставить питання їх аналізу та порівняння. Концепція невизначеності є продуктом процесу міжнародної стандартизації оцінювання точності вимірювання. Розвиток концепції невизначеності здійснювався на основі аналізу та узагальнення документів з оцінювання характеристик похибок, актуальних у різних країнах, тому багато елементів обох підходів збігаються. Однак існує ряд математичних, термінологічних і концептуальних відмінностей, які розглядаються у статті. Слід зазначити, що якщо розвиток теорії похибок припинився наприкінці 90-х років минулого століття, то концепція невизначеності з цього моменту успішно розвивається завдяки діяльності JCGM та ряду інших міжнародних організацій. Проте обидві концепції мають внутрішні протиріччя та недоліки, з якими погоджуються навіть самі їхні творці. Тому завдання метрологів-теоретиків полягає в тому, щоб побудувати єдину теорію оцінки точності вимірювань, усунувши недоліки обох підходів. Оскільки Україна прагне до ЄС та акредитує свої випробувальні та калібрувальні лабораторії за міжнародним стандартом ISO/IEC 17025, доцільно переформувувати навчальні програми за метрологічними спеціальностями, замінивши в них теорію похибок на концепцію невизначеності. Останнє потребує видання відповідних навчальних посібників та підручників.

**Ключові слова:** похибки вимірювання; невизначеність вимірювання; модельний підхід.

Отримано: 02.12.2022

Відредаговано: 26.12.2022

Схвалено до друку: 28.12.2022

## Вступ

Теорія похибок, що широко застосовується у сфері державного регулювання забезпечення єдності вимірювань, наразі законодавчо діє паралельно з концепцією невизначеності, яка використовується в лабораторіях, акредитованих на відповідність вимогам міжнародного стандарту ISO/IEC 17025 [1].

Незважаючи на тривалий період співіснування, у літературі та інтернеті досі не вщухає дискусія щодо доцільності широкого впровадження концепції невизначеності у вітчизняну метрологічну практику. Основною причиною цього є інертність метрологів-практиків. Крім того, живильне середовище для цих дискусій створює низка недосконалостей нормативних документів як теорії похибок, так і концепції невизначеності.

Теорія похибок розроблялася у 70-ті роки минулого століття у ВНДІМ ім. Менделєєва Маліковим М.Ф., Рабіновичем С.Г., Кудряшовою Ж.Ф., Фридманом А.Е., Долинським Є.Ф., Грановським В.А. [2, 3]. З того часу вона практично не змінилася. Концепцію невизначеності було сформовано у 90-х роках минулого століття з ініціативи

найвищого світового авторитету в метрології – МКМВ, і вона є продуктом процесу міжнародної стандартизації оцінювання точності вимірювань [4, 5]. Необхідність цього процесу було викликано відмінностями в оцінках показників похибок, які одержуються у різних країнах для тих самих вихідних даних.

Розробку концепції невизначеності було здійснено на основі аналізу та узагальнення діючих у різних країнах нормативних документів (НД) щодо оцінювання похибок, тому багато елементів обох підходів збігаються (загальна послідовність дій, формули для обчислення окремих характеристик, принципи підсумовування окремих складових, застосування методу лінеаризації при оцінюванні характеристик точності непрямих вимірювань при нелінійних залежностях). Проте є й ряд відмінностей, наприклад, обчислення інтервальних оцінок точності.

Слід зазначити, що якщо розвиток теорії похибок (ТП) зупинився наприкінці 90-х років минулого століття, то концепція невизначеності саме з цього моменту успішно розвивається завдяки діяльності Об'єднаного комітету з настанов

Концептуальні основи оцінювання характеристик похибок та невизначеностей

| Класифікаційна ознака   | Теорія похибок  | Концепція невизначеності  |
|---|---|---|
| Визначення  | Похибка – відхил результату вимірювань від істинного (референтного) значення              | Невизначеність – характеристика розкиду вимірюваної величини              |
| Класифікація складових  | За характером мінливості: систематична та випадкова                                       | За способом оцінювання: стандартні невизначеності типу А та типу В        |
| Систематична похибка  | Виключається з результату вимірювань до початку розрахунку характеристик похибки          | Виключається з результату вимірювань до початку розрахунку невизначеності |
| Приписування закону розподілу розсіювання результату вимірювань | До виміряного значення  | До істинного значення   |
| Підходи до оцінювання характеристик точності                    | Різні підходи для прямих, непрямих, сумісних та сукупних вимірювань                       | Єдиний підхід до всіх видів вимірювань                                    |
| Рівень довіри   | 0,95 – при виконанні технічних вимірювань,<br>0,99 – при виконанні прецизійних вимірювань | 0,9545 – при виконанні всіх видів вимірювань                              |

у метрології (JCGM) та інших міжнародних організацій. Поряд із Настановою з подання невизначеності вимірювань (GUM) [5] з'явився варіант реалізації модельного підходу, заснований на методі Монте-Карло (закон поширення розподілів) [6], сформувався емпіричний підхід [7, 8], розпочалася ревізія GUM на основі байєсівського підходу [9].

Задля справедливості слід зазначити, що процедура оцінювання невизначеності вимірювань, викладена в GUM, теж не позбавлена недоліків, про які було багато сказано і з якими згодні навіть самі його творці. Саме тому нині відбувається ревізія цього документа та завданням метрологів-теоретиків є перехід від конструктивної критики концепції невизначеності (КН) до її розвитку.

Метою цієї роботи є проведення аналізу концептуальних, термінологічних та математичних аспектів двох підходів до оцінювання точності вимірювань як основи для вдосконалення концепції невизначеності.

### Концептуальні основи оцінювання характеристик похибок та невизначеностей

Концептуальні основи наявних підходів до оцінювання точності наведено у табл. 1.

Відмінності у двох підходах починаються з визначення цих характеристик точності. Поняття “похибка” визначено як відхил результату вимірювань від істинного значення вимірюваної величини [10], тобто характеризує їх взаємний зсув. Відповідно до основного постулату ТП, істинне значення визначити неможливо, тому неможливо визначити і похибку вимірювань відповідно

до її визначення. Саме з цієї “невизначеності” починається теорія похибок, для подолання якої запроваджується поняття дійсного (умовно істинного, опорного) значення. Тому в пізнішому документі [11] похибку визначено як різницю між виміряним значенням величини та її опорним значенням.

На цей час існує дві близькі за змістом дефініції невизначеності вимірювання. Згідно з [5], “невизначеність – це параметр, що пов'язаний з результатом вимірювань і характеризує розсіювання значень, які можна обґрунтовано приписати вимірюваній величині”. Згідно з [12], “невизначеність вимірювання – це невід'ємний параметр, що характеризує розсіювання значень величини, що приписується вимірюваній величині, на основі використаної інформації”.

Подальші концептуальні відмінності пов'язані з класифікацією складових. Основною класифікаційною ознакою в ТП є мінливість складових, відповідно до якої вони поділяються на систематичні та випадкові. Однак у нормативних документах (НД) щодо оцінювання похибок йдеться не про самі похибки, а про їхні характеристики. При цьому ні систематичні, ні випадкові похибки в цих НД не використовуються: перші мають бути виключені з результатів вимірювань перед оцінюванням характеристик похибок і замість них оперують із невиключеними систематичними похибками (НСП), яких немає у класифікації похибок, а замість обчислення та використання других – оперують із повторними результатами вимірювань тієї самої величини.

Термінологічні аналоги характеристик похибок та невизначеностей

| Теорія похибок  | Концепція невизначеності  |
|---|---|
| СКВ середнього арифметичного багаторазових вимірювань $i$ -го аргументу $s(\bar{x}_i)$                              | Стандартна невизначеність типу А $i$ -ї вхідної величини $u_A(x_i)$ |
| СКВ НСП $i$ -го аргументу $s(\theta_j)$   | Стандартна невизначеність типу В $i$ -ї вхідної величини $u_B(x_j)$ |
| Сумарне СКВ оцінки вимірюваної величини $s_x$   | Сумарна стандартна невизначеність $u_c(y)$                          |
| Довірча ймовірність $P$   | Рівень довіри (імовірність охоплення) $p$                           |
| Коефіцієнт $K_p$ , що залежить від співвідношення довірчих границь сумарної НСП та СКВ випадкової складової похибки | Коефіцієнт охоплення $k$  |
| Довірчі границі похибки результату вимірювань $\Delta(P)$   | Розширена невизначеність вимірюваної величини $U(y)$                |

У КН класифікація невизначеностей проводиться у спосіб їх оцінювання (статистичним методом – за типом А і нестатистичним – за типом В), що полегшує розуміння проведених із нею процедур. Оцінювання невизначеностей також проводять після виявлення та компенсації відомих систематичних похибок.

В основі ТП лежить поняття істинного значення вимірюваної величини. КН спирається на результат вимірювання. У цьому сенсі різниця між похибкою і невизначеністю вимірювань, як справедливо помічено в [13], зводиться до відмінності систем координат, щодо яких розглядають істинне значення  $y_0$  вимірюваної величини та її вимірне значення  $y$ .

Надалі ТП будується з урахуванням визнання єдиного непізнаного істинного значення, проте похибки вимірювань приписуються числовому значенню результату вимірювань. У КН виходять із відсутності мінливості числового значення результату вимірювань. Невизначеним є наше знання про істинне значення вимірюваної величини, якому обґрунтовано приписується розсіювання значень, що характеризується невизначеністю. При розгляді похибки вимірювань систему координат прив'язують до істинного значення вимірюваної величини, спостерігаючи розсіяння результату вимірювань. У цьому випадку  $y = y_0 + \Delta$ , причому  $\text{var}(y_0) = 0$ , тому дисперсія результату вимірювань дорівнює дисперсії похибки:

$$\begin{aligned} \text{var}(y) &= \text{var}(y_0 + \Delta) = \\ &= \text{var}(y_0) + \text{var}(\Delta) + 2 \text{cov}(y_0, \Delta) = \text{var}(\Delta). \end{aligned}$$

При розгляді невизначеності вимірювань систему координат прив'язують до вимірюваного значення (яке вважається не випадковим), що

і створює ефект розсіювання істинного значення вимірюваної величини. У цьому випадку  $y_0 = y - \Delta$ , причому  $\text{var}(y) = 0$ , тому:

$$\begin{aligned} \text{var}(y_0) &= \text{var}(y - \Delta) = \text{var}(y) + \text{var}(-\Delta) + \\ &+ 2 \text{cov}(y - \Delta) = \text{var}(-\Delta) = \text{var}(\Delta). \end{aligned}$$

Таким чином, невизначеність вимірювань може бути оцінена як стандартне відхилення величини, що збігається по модулю з похибкою вимірювань, але протилежною їй за знаком. Закон розподілу ймовірностей цієї величини  $g(y_0)$  є дзеркальним відображенням закону розподілу ймовірностей похибки вимірювань  $g(\Delta)$  [13]. Математичне очікування та СКВ таких законів збігатимуться, але їх імовірнісно-симетричні границі поміняються місцями.

Слід зазначити також відмінність ТП і КН щодо рівня довіри при обчисленні інтервальних оцінок точності. У КН використовується один рівень довіри: 0,9545, а в ТП ймовірність 0,99 використовується при виконанні прецизійних вимірювань і 0,95 – для технічних, для яких оцінки довірчих меж сумарної похибки результату вимірювання відрізняються як мінімум в 1,3 рази.

**Термінологічні особливості наявних підходів до оцінювання точності**

При формуванні КН на основі наявних ТП було проведено заміну терміну “error” на термін “uncertainty” в назві концепції, здійснену в першу чергу для усунення можливої плутанини при практичному використанні характеристик точності, які одержуються на основі різних підходів.

Аналіз нормативних документів ТП та КН дає змогу виявити термінологічні аналоги характеристик точності в обох підходах (табл. 2).

## Вирази для довірчих границь НСП

| Вид вимірювань             | Вираз для $\theta(P)$   | Нормативний документ                          |
|----------------------------|---|---|
| Прямі одноразові, непрямі* | $\theta(P) = \begin{cases} \pm\theta, & \text{при } N = 1; \\ \pm k_p \sqrt{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}, & \text{при } N \geq 2. \end{cases} \quad (1)$                      | МИ 1552-86,<br>Р 50.2.038-2004,<br>МИ 2083-90 |
| Прямі багаторазові         | $\theta(P) = \begin{cases} \pm \sum_{i=1}^N  \theta_i , & \text{при } N \leq 2; \\ \pm k_p \sqrt{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}, & \text{при } N \geq 3. \end{cases} \quad (2)$ | ГОСТ 8.207-76,<br>ГОСТ Р 8.736-2011           |
| Прецизійні                 | $\theta(P) = \begin{cases} \pm \sum_{i=1}^N  \theta_i , & \text{при } N \leq 3; \\ \pm k_p \sqrt{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}, & \text{при } N \geq 4. \end{cases} \quad (3)$ | ГОСТ 8.381-2009                               |

\* При непрямих вимірюваннях границі  $\theta_i$  є границями НСП часткових похибок і є добуток границь НСП аргументів на їхні коефіцієнти впливу.

Так, СКВ середнього арифметичного багаторазових вимірювань відповідає стандартній невизначеності типу А (у документі [14] стандартній невизначеності типу А відповідає СКО, що характеризує випадкову похибку, що не зовсім коректно). Крім того, СКВ НСП відповідає за змістом стандартній невизначеності типу В, а сумарне СКВ оцінки вимірюваної величини відповідає за змістом сумарній стандартній невизначеності; коефіцієнт  $K_p$ , що залежить від співвідношення довірчих границь сумарної НСП та СКВ випадкової складової похибки (довірчий коефіцієнт), відповідає за змістом коефіцієнту охоплення. Термін “довірча ймовірність”, що застосовується в ТП, відповідає за змістом терміну “рівень довіри” (“ймовірність охоплення”), що застосовується в КП. Однак у КП вважається неприйнятним застосування терміну “довірча ймовірність” до вимірюваної величини, лише до довірчих границь випадкової похибки.

Слід зазначити, що в ТП через особливості підсумовування складових використовуються терміни, яким немає аналогів у КП: довірчі границі випадкової похибки, довірчі границі сумарної НСП.

#### Математичні аспекти наявних підходів до оцінювання точності

Кількісні відмінності оцінок точності в КП і ПН пов'язані зі способами вираження та підсумовування складових, а також отримання інтервальних оцінок точності. Слід зазначити, що процедуру оцінювання похибок вимірювань викладено у кількох документах: окремо для

прямих одноразових вимірювань, окремо для прямих багаторазових вимірювань, окремо для непрямих вимірювань, окремо для еталонів (табл. 3). При цьому підходи до оцінювання тих самих характеристик похибок у різних документах відрізняються. І це при тому, що ці документи розроблені в одній організації!

Так, наприклад, при знаходженні довірчих границь сумарної НСП прямих одноразових і непрямих вимірювань границі окремих складових НСП підсумовуються геометрично при числі складових  $N \geq 2$ ; для прямих багаторазових – при  $N \geq 3$ ; для еталонів – при  $N \geq 4$ .

Крім того, відрізняються вирази для знаходження довірчих границь сумарної похибки результату вимірювання: у документах [15–17] їх знаходять через суму довірчих границь НСП та випадкової похибки; у стандартах [18–20] – через СКВ сумарної похибки (табл. 4).

Так, для прямих багаторазових [19] та прецизійних [20] вимірювань довірчі границі оцінки вимірюваної величини визначаються за формулою (5), аналогічною за змістом розширеної невизначеності.

У формулі (5) сумарне СКВ оцінки вимірюваної величини обчислюється як сумарна стандартна невизначеність, а довірчий коефіцієнт визначається за емпіричною формулою [19]:

$$K_p = \frac{\varepsilon(P) + \theta(P)}{s + s_0}.$$

Для одноразових [15, 16] і непрямих вимірювань [17] рекомендують як довірчі границі похибки вимірювань  $\Delta(P)$  використовувати ви-

Порівняння виразів для довірчих границь НСП та розширеної невизначеності

| Вид вимірювань                 | Вираз для $\Delta(P)$  | Вираз для $U(y)$   |
|--------------------------------|--|--|
| Прямі одноразові, непрямі      | $\Delta(P) = K [\theta(P) + \varepsilon(P)]$ (4)   | $U(y) = t_{0,95}(v_{eff}) \cdot u(y)$ (6)                        |
| Прямі багаторазові, прецизійні | $\Delta(P) = K_p s_{\Sigma}$ ,<br>$K_p = \frac{\varepsilon(P) + \theta(P)}{s + s_{\theta}}$ , $s_{\Sigma} = \sqrt{s^2 + s_{\theta}^2}$ (5) |  |
|                                |  | $v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$ (7) |

раз (4), в якому  $\theta(P)$ ,  $\varepsilon(P)$  – довірчі границі відповідно до НСП і випадкової похибки;  $K$  – коефіцієнт, що залежить від співвідношення випадкової складової похибки та НСП.

У стандарті [18] наведено залежність  $K$  від співвідношення  $\theta(P)/s$  як таблиці для ймовірностей 0,95 і 0,99. Однак з виразів (4) та (5) видно, що  $K$  визначається співвідношенням

$$K = \frac{\sqrt{s^2 + s_{\theta}^2}}{s + s_{\theta}} = \frac{\sqrt{1 + (s_{\theta}/s)^2}}{1 + s_{\theta}/s}$$

і не залежить від довірчої ймовірності.

Залежність  $K(s_{\theta}/s)$  показано на рис. 1.

При поданні похибок первинних еталонів [20] довірчі границі сумарної похибки взагалі не виражають.

При поданні похибок вторинних еталонів [20] вказують сумарну похибку, яка або включає, або не включає НСП. У останньому разі довірчі границі сумарної похибки оцінюють як для прямих багаторазових вимірювань [19], незалежно від того, який метод (прямих чи непрямих вимірювань) покладено в основу роботи еталона.

У КН рекомендовано єдиний спосіб підсумовування всіх складових – спосіб підсумовування дисперсій і коваріацій незалежно від різновиду вимірювань.

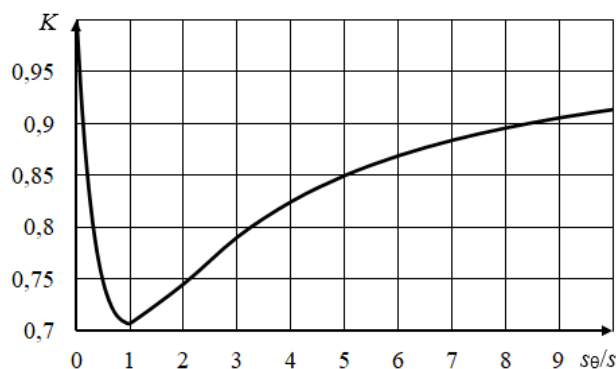


Рис. 1. Залежність  $K(s_{\theta}/s)$

Розширена невизначеність обчислюється за формулами (6)–(7). За відсутності внесків невизначеності типу А формула (7) дає нескінченність, тому коефіцієнт покриття має бути  $k = t_{0,95}(\infty) = 2$ . Однак це значення коефіцієнта охоплення відповідає випадку, коли нормальна PDF приписується вимірюваній величині. Це припущення матиме місце у 2 випадках: якщо всі внески невизначеності розподіляються згідно з нормальним законом або є 3 чи більше порівнянних внесків, які розподілені відповідно до будь-якої іншої PDF. Якщо серед внесків є домінуючий (який відрізняється від інших принаймні в 3 рази), то приписана йому PDF також відноситься до вимірюваної величини. Для двох домінуючих функції PDF вимірюваної величини є композицією їх законів розподілу. Для ймовірності 0,9545 значення коефіцієнтів покриття для різних складів PDF наведені в [21].

**Висновки**

1. Паралельне співіснування двох підходів до оцінювання точності вимірювань, що спостерігається протягом останньої чверті століття в країнах СНД, завершується поступовим переходом від теорії похибки до концепції невизначеності при вирішенні питання міжнародної стандартизації оцінювання точності вимірювань.

2. Аналіз двох підходів показує наявність концептуальних, термінологічних та кількісних відмінностей під час оцінювання точності вимірювань. Останні зумовлені різними способами вираження та підсумовування складових, а також отримання інтервальних оцінок точності.

3. Розвиток теорії похибок зупинився наприкінці 90-х років минулого століття. Їй притаманні ряд недоліків, які нині не усуваються. Концепція невизначеності успішно розвивається завдяки діяльності JCGM та низки інших міжнародних організацій. Поряд із GUM з'явився варіант реалізації модельного підходу, заснований

на методі Монте-Карло, сформувався емпіричний підхід. Процедура оцінювання невизначеності вимірювань, викладена в GUM, теж не позбавлена недоліків. Саме тому нині відбувається ревізія цього документа.

4. Завданням метрологів-теоретиків є перехід від конструктивної критики концепції невизначеності до її розвитку. На жаль, реалізацію цього завдання на законодавчому рівні ускладнює консервативна політика JCGM, який по суті

монополізував право на формування нормативної бази концепції невизначеності.

5. Оскільки Україна прагне до ЄС та акредитує свої випробувальні та калібрувальні лабораторії за міжнародним стандартом ISO/IEC 17025, доцільно переформувувати навчальні програми за метрологічними спеціальностями, замінивши в них теорію похибок на концепцію невизначеності. Останнє потребує видання відповідних навчальних посібників та підручників.

## Comparative analysis of measurement accuracy characteristics

I. Zakharov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine  
newzip@ukr.net

### Abstract

The parallel coexistence of the error theory and the concept of uncertainty in Ukraine for almost 30 years has brought about constant discussions and raised the issue of their analysis and comparison.

The concept of uncertainty is the product of an international standardization process for the evaluation of measurement accuracy. The development of the concept was based on analysing and generalizing the documents on error evaluation, relevant in different countries, therefore many elements of both approaches coincide. Nevertheless, there are a number of mathematical, terminological, and conceptual differences that are considered in this paper.

It should be noted that while the development of the error theory stopped at the end of the 90s of the last century, the concept of uncertainty has been successfully developing since then thanks to the activities of the JCGM and a number of other international organizations. Along with the GUM, a variant of implementing the model approach has been introduced based on the Monte Carlo method, an empirical approach has been developed, and the revision of the GUM has been initiated based on the Bayesian inference.

Nevertheless, both concepts have internal contradictions and shortcomings, with which even their creators themselves agree.

Therefore, the task of theoretical metrologists is to develop a unified theory for evaluating the accuracy of measurements, eliminating the shortcomings of both approaches.

Quantitative differences of accuracy estimates in the theory of errors and the concept of uncertainty are considered, which are related to the ways of expressing and summing the components, as well as obtaining interval accuracy estimates.

In view of the imperfection of normative documents on the error theory, as well as the widespread use of the ISO/IEC 17025 standard in Ukraine, it is advisable to reformulate the curricula for metrological specialties replacing the theory of errors with the concept of uncertainty.

**Keywords:** characteristic of errors; measurement uncertainty; model approach.

### Список літератури

1. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT).
2. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Ленинград: Энергия, 1978. 262 с.
3. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
4. Giacomo P. The Expression of Experimental Uncertainties (Recommendation INC-1), BIPM. *Metrologia*, 1981, no. 11, p. 73.
5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva, ISO, 1993. 101 p.
6. 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. 82 p.

7. EURACHEM/CITAC Guide CG 4. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Third Edition. QUAM:2012.P1. 135 p.
8. ISO 21748:2017. Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation. 38 p.
9. Bich W., Cox M., Michotte C. Towards a new GUM – an update. *Metrologia*, 2016, no. 53, pp. S149–S159.
10. RMG 29-99. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions.
11. RMG 29-2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions.
12. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3<sup>rd</sup> edition. 92 p.
13. MI 1317-2004. State system for ensuring uniformity of measurements. Results and characteristics of the measurement error. Forms of representation. Ways to use during testing of product samples and control over the parameters of product samples and control of their parameters.
14. RMG 43-2001. State system for ensuring uniformity of measurements. Using. Application of the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”.
15. MI 1552-86. State system for ensuring uniformity of measurements. Single straight measurements. Evaluation of measurement errors.
16. R 50.2.038-2004. State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct single measurements. Estimation of errors and uncertainty of measurements result (in Russian).
17. MI 2083-90. Determination of the measurement results and the estimation of their errors.
18. GOST 8.207-76. State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct measurements with multiple observations. Methods of processing the results of observations (in Russian).
19. GOST R 8.736-2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main principles (in Russian).
20. GOST 8.381-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Standards. Ways for expressing the accuracy (in Russian).
21. M3003:2012. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. Edition 3. 82 p.
4. Giacomo P. The Expression of Experimental Uncertainties (Recommendation INC-1), BIPM. *Metrologia*, 1981, no. 11, p. 73.
5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva, ISO, 1993. 101 p.
6. 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. 82 p.
7. EURACHEM/CITAC Guide CG 4. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Third Edition. QUAM:2012.P1. 135 p.
8. ISO 21748:2017. Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation. 38 p.
9. Bich W., Cox M., Michotte C. Towards a new GUM – an update. *Metrologia*, 2016, no. 53, pp. S149–S159.
10. RMG 29-99. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions.
11. RMG 29-2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions.
12. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3<sup>rd</sup> edition. 92 p.
13. MI 1317-2004. State system for ensuring uniformity of measurements. Results and characteristics of the measurement error. Forms of representation. Ways to use during testing of product samples and control over the parameters of product samples and control of their parameters.
14. RMG 43-2001. State system for ensuring uniformity of measurements. Using. Application of the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”.
15. MI 1552-86. State system for ensuring uniformity of measurements. Single straight measurements. Evaluation of measurement errors.
16. R 50.2.038-2004. State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct single measurements. Estimation of errors and uncertainty of measurements result (in Russian).
17. MI 2083-90. Determination of the measurement results and the estimation of their errors.
18. GOST 8.207-76. State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct measurements with multiple observations. Methods of processing the results of observations (in Russian).
19. GOST R 8.736-2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main principles (in Russian).
20. GOST 8.381-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Standards. Ways for expressing the accuracy (in Russian).
21. M3003:2012. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. Edition 3. 82 p.

#### References

1. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. 30 p.
2. Rabinovich S.G. Pogreshnosti izmereniy [Measurement errors]. Leningrad, Energy Publ., 1978. 262 p. (in Russian).
3. Granovsky V.A., Siraya T.N. Metody obrabotki eksperimentalnykh dannykh pri izmereniyakh [Methods for experimental data processing during measurements]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (in Russian).