

# МЕТРОЛОГІЯ

УДК 681.2.088:389

## ВИКОРИСТАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ ПОДАННІ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАННЯ

© Владислав Ціделко, Ніна Яремчук, Марина Дворжисицька, 2001

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка", вул. Борщагівська, 128, 03056, Київ, Україна

*Розглянуто особливості впровадження поняття невизначеності, що використовується при поданні результату вимірювання відповідно до документа ISO «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement». Наведено форми подання результату вимірювання із застосуванням невизначеності. Розглянуто особливості підсумовування складових категорії B.*

*Rассмотрены особенности введения понятия неопределенности, которая используется при представлении результата измерения в соответствии с документом ISO «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement». Приведены формы представления результата измерения с использованием неопределенности. Рассмотрены особенности суммирования составляющих категории B.*

*Specifics of uncertainty definition input have been considered. According to ISO «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement», this uncertainty is being used for measurement result presentation. Attached are forms of measurement result presentation with use uncertainty. Specifics of summing up elements from category B have been considered.*

Документ ISO «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» (надалі Керівництво ISO) було розроблено і видано в 1993 році для забезпечення єдності в підході до подання та оцінювання похибок результату вимірювання на міжнародному рівні. Документ набув статусу неформального метрологічного стандарту і широко використовується в більшості країн світу.

Але вітчизняні нормативні документи практично не застосовують поняття «невизначеності вимірювання», що в майбутньому заважатиме інтеграції України в міжнародне співництво. Тому на кафедрі інформаційно-вимірювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» було прийнято рішення про вивчення документа ISO «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» та впровадження його в навчальний процес при виконанні лабораторних робіт і практичних завдань з дисципліни «Основи метрології та вимірювальної техніки». Для цього було виконано переклад документа з адаптацією для вивчення студентами. Досвід впровадження цього документа описано в цій роботі.

Серед питань, що виникають при впровадженні Керівництва ISO (якщо можна вважати це впровадження доцільним), можна виділити такі:

- збіжність та відмінність вітчизняних нормативних документів та Керівництва ISO;
- недоліки і позитивні моменти Керівництва ISO;
- розробка методик обробки результатів вимірювань, що відповідають Керівництву ISO і зберігають позитивний досвід вітчизняних нормативних документів.

Основні положення Керівництва ISO такі.

Терміни «істинне значення вимірюваної величини» і «похибка результату вимірювання» не використовуються при формуванні родової групи понять, пов'язаної з результатом вимірювання. Застосовуються поняття «оцінене значення вимірюваної величини» і «невизначеність». Тому поняття «невизначеність» викладається не так, як в ДСТУ 2681-94 [2], а відповідно до Керівництва ISO. Такий підхід використовувався в зарубіжній літературі вже давно. Якщо взяти, наприклад, книгу Дж. Тейлора [3], назва якої в оригіналі «An introduction to error analysis. The study of Uncertainties in Physical Measurements», то формування результату вимірювань описано в ній так.

Якщо експериментатор подає результат проведеного ним вимірювання, то він вказує найкращу оцінку вимірюваної величини та інтервал, в якому, як він впевнений, знаходиться більша частина значень вимірюваної величини. Наприклад, при вимірюванні часу

$$\left. \begin{aligned} \text{найкраща оцінка часу} &= 2,4 \text{ с;} \\ \text{ймовірний інтервал} &= 2,3 \div 2,5 \text{ с.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В цьому випадку найкраща оцінка  $2,4 \text{ с}$  лежить посередині інтервалу ймовірних значень. Таке положення дуже зручне і дає змогу виразити результат вимірювання в найкомпактнішому вигляді:

$$\text{виміряне значення часу} = (2,4 \pm 0,1) \text{ с.} \quad (2)$$

Вираз (2) еквівалентний двом у поданні (1) у цьому випадку  $2,4 \text{ с}$  – найкраща оцінка вимірюваної величини, а  $0,1 \text{ с}$  – невизначеність результату вимірювання. Такий підхід [3] не використовує поняття «істинного значення вимірюваної величини», а термін «невизначеність» виражає сумнів щодо отриманого значення вимірюваної величини.

В Керівництві ISO наведено таке визначення «невизначеності вимірювання».

Невизначеність (вимірювання) – параметр, об'єднаний з результатом вимірювання, що характеризує розсіювання значень вимірюваної величини.

Відомо, що параметром, який характеризує розсіювання, є середнє квадратичне відхилення (СКВ) чи половина ширини інтервалу розсіювання з встановленим рівнем довіри. Це видно з наведеного вище прикладу.

$$\text{невизначеність} = (2,5 - 2,3) / 2 = 0,1 \text{ с.} \quad (3)$$

Похибка вимірювання має дві складові: систематичну та випадкову. В Керівництві ISO припускають, що результат вимірювання може бути від-

коректований для всіх розпізнаних систематичних ефектів. Тобто систематичної похибки результату вимірювання не існує, а тоді і немає необхідності в розподілі похибки вимірювання на систематичну та випадкову складові.

Отже, підхід до формування невизначеності вимагає корекції результату. Після корекції систематичних похибок результат вимірювання характеризується невизначеністю, що виникає внаслідок випадкових похибок і недосконалості корекції систематичних похибок. Тоді нерозпізнані систематичні похибки, похибки, пов'язані з корекцією і опорними еталоном, входять в розсіювання.

Згідно з Керівництвом ISO при поданні результату вимірювання використовуються такі форми невизначеності: стандартна невизначеність, комбінована стандартна невизначеність, розширена невизначеність (рис. 1).

*Стандартна невизначеність* (standard uncertainty) – невизначеність результату вимірювання, що виражена у вигляді СКВ. Її позначення в Керівництві ISO – *u*.

*Комбінована стандартна невизначеність* (combined standard uncertainty) – стандартна невизначеність результату вимірювання, яку використовують, якщо результат вимірювання отриманий при вимірюванні інших величин; комбінована стандартна невизначеність дорівнює додатному кореню із суми складових (дисперсій чи коваріацій вимірюваних величин), зважених відповідно до впливу, який справляють вимірювані величини на результат вимірювання.

Треба відзначити, що в російських публікаціях, що стосуються впровадження невизначеності, цю форму невизначеності названо «суммарной неопределенностью». На захист прийнятої нами назви «комбінована стандартна невизначеність» можна сказати таке.



Рис. 1. Форми подання невизначеності результату вимірювання

Стандартна невизначеність (перша форма) може також бути сумарною у випадку прямого вимірювання з декількома джерелами похибок.

Термін «комбінована стандартна невизначеність» стосується опосередкованого вимірювання, коли складові невизначеності мають певні вагові коефіцієнти.

Тобто у нашому розумінні «стандартна невизначеність» – невизначеність прямого вимірювання (незалежно від кількості складових), а «комбінована стандартна невизначеність» – невизначеність опосередкованого вимірювання.

Якщо прийняти термін «стандартна невизначеність» і «сумарна невизначеність» – то перший термін відповідає вимірюванню з одним джерелом похибки, а другий – вимірюванню з декількома джерелами похибки.

Але ми сподіваємось, що остаточно ці термінологічні питання будуть вирішені при впровадженні Керівництва ISO у вітчизняну метрологічну практику.

Позначення комбінованої стандартної невизначеності в Керівництві ISO –  $u_c$ .

*Розширена невизначеність* (expanded uncertainty) – невизначеність у вигляді інтервалу біля результату вимірювання, в який потрапляє більша частина розподілу значень вимірюваної величини.

Розширену невизначеність  $U$  обчислюють за формулами

$$\left. \begin{aligned} U &= k \cdot u, \\ U &= k \cdot u_c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

з використанням стандартної невизначеності  $u$  чи комбінованої стандартної невизначеності  $u_c$  і фактора (коефіцієнта) покриття  $k$  (coverage factor). В російських публікаціях для  $k$  прийнятий термін «коэффициент охвата».

Невизначеність результату вимірювання звичайно складається з декількох компонентів, які можуть бути згруповані в дві категорії відповідно до способу їх оцінювання (рис. 2):

- компоненти категорії А – ті, які оцінюють статистичними методами;
- компоненти категорії В – ті, які оцінюють по-іншому (за допомогою правил оцінки «зверху», за допомогою апріорної інформації, за допомогою експертних знань тощо).

У зв'язку з цим кожна методика оцінки невизначеності повинна містити звіт із переліком компонентів і способами їх оцінки.

Компоненти категорії А характеризуються дисперсією  $S_i^2$  (чи СКВ  $S_i$ ) і кількістю ступенів свободи  $\nu_i$ ,

яка залежить від кількості вимірювань; якщо необхідно, наводять коваріацію.

Компоненти категорії В характеризуються величинами  $u_j^2$ , що можуть розглядатись з наближенням, як ті, що відповідають дисперсіям, величини  $u_j$  розглядаються подібно до СКВ.

Отже, невизначеність вимірювання об'єднує багато компонентів. Деякі з них можуть бути охарактеризовані статистичним розподілом результатів ряду вимірювань і відповідним до цього розподілу значенням СКВ. Це компоненти категорії А. Інші компоненти також можуть бути охарактеризовані СКВ, але отриманим за допомогою прийнятого (від себе) розподілу ймовірності з використанням досвіду експериментатора чи іншої інформації. Ці компоненти належать до категорії В.

Термін «довірчий інтервал» (confidence interval) чи «довірча ймовірність» (confidence probability) – специфічні визначення статистики і використовуються тільки тоді, коли і розширена невизначеність, і компоненти  $S_i$  отримані оцінюванням категорії А. Отже, у загальному випадку означення «довірчий» не належать до інтервалу. З урахуванням оцінювання типу В розширена невизначеність – це інтервал, а  $P_j$  – ймовірність покриття чи рівень довіри (confidence level) до цього інтервалу.

Перехід від стандартної до розширеної невизначеності при оцінювання компонентів категорії В виконують за допомогою фактора (коефіцієнта) покриття  $k$ , який вибирають на основі рівня довіри для інтервалу від  $x - U$  до  $x + U$ . Звичайно  $k$  знаходиться в межах від 2 до 3. На практиці вибирають фактор покриття  $k$ , який забезпечує інтервал  $x \pm U = x \pm k \cdot u$ , що відповідає рівням довіри 95% та 99%. Приблизні рекомендації Керівництва ISO  $k = 2$  для 95% і  $k = 3$  для 99%.

Треба відзначити, що подання результату в документі ISO більш уніфіковане і просте, що важливо для користувачів результатів вимірювання, з яких не всі є спеціалістами в галузі метрології. Але спрощення деяких положень, наприклад, процедури обчислення розширеної невизначеності, призводить до багатьох непорозумінь при практичних розрахунках. Як приклад можна навести таке.

При прямих вимірюваннях виникають дві похибки з границями  $\pm \Delta_1 = \pm \Delta_2 = \pm \Delta$ . Якщо знайти розширену невизначеність з рівнем довіри 1 на основі підсумовування границь (керуючись здоровим глуздом), то отримаємо

$$U = 2 \cdot \Delta \quad (\text{з рівнем довіри } 1).$$

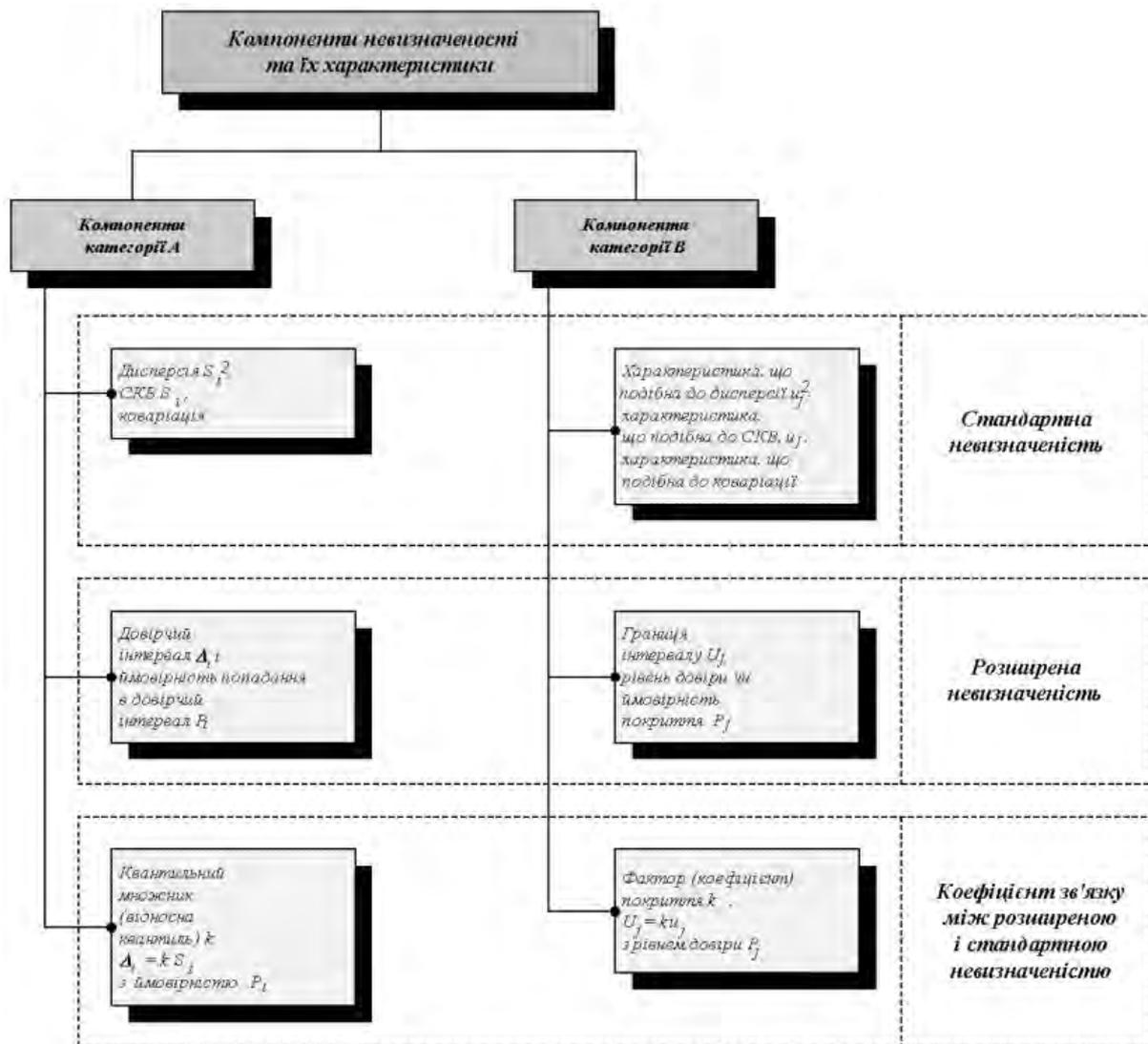


Рис. 2. Класифікація компонентів невизначеності залежно від способу їх оцінки

Але, якщо знайти СКВ з використанням оцінки «зверху» для рівномірного розподілу, то одержимо стандартну невизначеність  $u$ , що дорівнює

$$u = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = 0,817 \cdot \Delta.$$

Якщо далі, керуючись документом ISO, прийняти для рівня довіри  $P = 0,99$  коефіцієнт покриття  $k = 3$ , то отримаємо розширену невизначеність  $U$ , що дорівнює

$$U = 3 \cdot 0,817 \cdot \Delta = 2,45 \cdot \Delta.$$

Одержане значення набагато перевищує максимально можливе значення.

Цей приклад є свідченням того, що процедура підсумовування похибок і обчислення розширеної невизначеності повинна бути детальніше розглянута, ніж це зроблено в Керівництві ISO. Нічого нового в цій ситуації

створювати не треба, такий матеріал вже є у відповідних вітчизняних нормативно-технічних документах.

**Висновок.** Керівництво ISO повинно вивчатись і використовуватись у відповідних документах, але не можна відкидати вітчизняних нормативних документів, особливо в частині розрахунку факторів (коефіцієнтів) покриття при поданні результатів з розширеною невизначеністю. Тому після узгодження основних термінів і визначень необхідно переходити до розробки окремих методик обробки і подання результатів вимірювання, залишаючи все позитивне з накопиченого роками досвіду вітчизняної метрології.

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition. – ISO, Switzerland, 1993. 2. ДСТУ 2681-94. ДСВ. Метрологія. Терміни та визначення. 3. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. – М., 1985.