

В.П. КВАСНИКОВ, А.Л. ПЕРЕДЕРКО, Л.В. КУЗЬМИЧ

Національний авіаційний університет

В.Ю. КОТЕТУНОВ

Національний транспортний університет

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ПРИЛАДОВИМИ СИСТЕМАМИ (В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ)

Дана стаття присвячена вимірюванню механічних величин. Запропоновані методи спрямовані на механічні величини інтелектуальних приладів системи (в умовах невизначеності). Обґрунтовано підходи до обробки результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами, зокрема оцінювання точності вимірювань в умовах невизначеності.

**Ключові слова:** механічні величини, похибка, невизначеність вимірювання, середнє квадратичне відхилення.

V.P. KVASNIKOV, A.L. PEREDERKO, L.V. KUZMICH

National Aviation University, Kyiv

V. U. KOTETUNOV

National Transport University, Kyiv

## PROCESSING OF RESULTS OF MEASUREMENT OF MECHANICAL VALUES BY INTELLECTUAL EQUIPMENT SYSTEMS (UNDERSTANDING CONDITIONS)

This article is devoted to the measurement of mechanical quantities. The proposed methods are directed to the mechanical values of the intellectual devices of the system (in conditions of uncertainty). At the present stage of the development of intellectual systems, the issue of creating methods for rapid processing of the obtained results, determining the accuracy of their measurement in real time, in particular in solving management problems and making decisions under uncertainty, remains an issue. The result of the measurement of mechanical quantities, in particular the cost of thermal energy by intelligent instrumentation systems (IPS), is complete, provided that it is accompanied by an estimate of its accuracy [1]. The processing accuracy of the measurement results depends on the type of measurement, the number of experimental data, the accuracy requirements of the measurement, and so on. Only during direct one-time measurements the result of the study may be the result of the measurement (provided that the systematic errors of measurement are not corrected). In other measurements, processing can be done using standardized techniques (eg statistical methods), or require the creation of special algorithms. Each type of measurement has its own characteristics and therefore the specific content of these operations of processing the results of a particular type of measurement has certain differences. The approaches to processing the results of measurement of mechanical quantities by intelligent instrumental systems, in particular estimating the accuracy of measurements under uncertainty, are substantiated.

**Key words:** mechanical values, error, uncertainty of measurement, mean square deviation.

### Вступ

На сучасному етапі розвитку інтелектуальних систем актуальним залишається питання створення методів швидкої обробки отриманих результатів, визначення точності їх вимірювання в реальному часі, зокрема в ході розв'язування задач управління та прийняття рішень в умовах невизначеності.

Результат вимірювання механічних величин, зокрема витрат теплової енергії інтелектуальними приладовими системами (ІПС), є повноцінним за умови, що він супроводжується оцінюванням його точності [1].

Обсяг обробки результатів точності вимірювання залежить від різновиду вимірювання, кількості експериментальних даних, вимог щодо точності вимірювання тощо. Лише під час прямих разових вимірювань отриманий результат дослідження може бути результатом вимірювання (за умови, що систематичні похибки вимірювання не коригують). В інших вимірюваннях обробка може здійснюватися за стандартизованими методиками (наприклад статистичними методами), або вимагати створення спеціальних алгоритмів.

У загальному випадку обробка передбачає такі етапи [2, 3, 4]:

попередній аналіз результатів спостережень (первинних вимірювань), їх систематизація відкидання явно недостовірних результатів;

корекція впливу систематичних ефектів (вивчення умов вимірювань, розрахунок і внесення поправок);

аналіз впливу випадкових ефектів, перевірка гіпотез про їх розподіл, вибір найкращих оцінок шуканих величин;

оцінювання характеристик точності числового алгоритму, його стійкості;

виконання розрахунків згідно з вибраним алгоритмом;

аналіз отриманих результатів;

подання результатів вимірювань та характеристик їх точності за відповідною формою.

Кожен вид вимірювань має свої особливості і тому конкретний зміст зазначених операцій обробки результатів конкретного виду вимірювання має певні відмінності.

### Експериментальна частина

Практична корисність будь-якого вимірювання визначається зазначенням його похибки, тобто кількісної характеристики відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної механічної величини.

У вітчизняних нормативних документах для оцінювання точності вимірювань зберігається традиційний підхід, що ґрунтується на понятті "похибка вимірювань" [5]. Традиційний аналітичний підхід до визначення похибок полягає в поділі їх на складові, кожна з яких зумовлена певними факторами. Це дозволяє досліджувати джерела складових похибки, проводити необхідні експерименти, в тому числі допоміжні вимірювання, і, як наслідок, визначити властивості похибки та з необхідною точністю оцінити її складові. Знаючи властивості й оцінки складових, можна правильно врахувати їх при оцінці повної похибки, а також при необхідності ввести поправку в результат вимірювання або організувати вимірювальний експеримент так, щоб звести окремі складові, а з ними й повну похибку, до допустимого значення. Так, зокрема, при вимірюванні витрат теплової енергії інтелектуальними приладовими системами похибка вимірювання має не перевищувати  $\pm 5\%$ .

Для підвищення об'єктивності оцінки похибок вимірювань механічних величин і визначення шляхів їхнього зменшення, з метою покращання якості вимірювань, необхідно дослідити можливі причини виникнення різних складових повної похибки вимірювань і закономірності їх змінювання.

Новий підхід рекомендується МКМВ, МОЗМ, Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК) та іншими міжнародними організаціями, що ґрунтується на оцінюванні точності вимірювань за допомогою поняття «невизначеність вимірювань» [5–7].

Уперше концепція невизначеності з'явилась у відповідь на появу нових, нетрадиційних об'єктів вимірювання сфер вимірювання (аналітичної хімії, психології, соціології, педагогіки, медицини тощо); прагнення усунути слабкі місця концепції похибки результату вимірювання; вплив нових наукових напрямів (кібернетики, теорії інформації, теорії прийняття рішень, теорії нечітких множин); розробка математичної моделі вимірювання, що відповідає сучасним тенденціям розвитку теорії вимірювань. У роботі L. Finkelstein «Theory and Philosophy of Measurement» запропоновано концепцію невизначеності як один із напрямів розвитку теорії вимірювань [8].

Розроблена вченими світу теорія невизначеності зумовила появу документа Міжнародної організації стандартизації ISO «Guide to Expression of Uncertainty in Measurement», виданого 1993 р. [9].

Головні відмінності концепції невизначеності від концепції похибки результату вимірювання наступні: відхід від поняття істинне значення вимірюваної величини як такого, що не піддається пізнанню; у зв'язку з останнім поняття похибки вимірювання як відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини втрачає сенс; невизначеність результату вимірювання характеризуються чи середнім квадратичним відхиленням (СКВ), чи симетричними границями, тому всі систематичні похибки підлягають корекції, а їх невилучені залишки входять до розсіювання результату вимірювання; у зв'язку з останнім недоцільним є сенс розподіл похибок результату вимірювання на систематичні і випадкові; залишається тільки розподіл компонентів невизначеності на компоненти категорії А і компоненти категорії В за способом їх оцінювання.

Між двома концепціями (невизначеності результату вимірювання і похибки результату вимірювання) є суттєві відмінності, які треба враховувати, складаючи методики обробки даних вимірювань і подаючи кінцевий результат. Але відкидати чи не помічати концепцію невизначеності недоцільно. Це унеможливить гармонізацію вітчизняних і зарубіжних нормативно-технічних документів та уповільнить роботу в нетрадиційних сферах вимірювань.

Метою даної праці є формування методу обробки результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами із застосуванням нового підходу, що базується на теорії невизначеності, для обробки даних і подання результату вимірювання.

**Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** В літературних джерелах з метрології та в міжнародних документах нема досить переконливих обґрунтувань щодо відмови від терміну «похибка» і заміни його новим терміном «невизначеність». Більш того, рекомендовані методи оцінки для відображення кількісних характеристик невизначеності мають або той самий, або дещо модифікований вигляд, як і для похибок, зберігаючи, в основному, фізичний зміст. Тому заміна вказаних термінів обумовлена не принципово якісними, фундаментальними обґрунтуваннями, а асоціативністю їх розуміння. Так, термін «похибка» асоціюється з визначеною величиною, а термін «невизначеність» – з сумнівом, невпевненістю, що нібито більше відображає фізичний зміст результату вимірювання [9–11].

Термін «невизначеність» означає сумнів, він розширює смисл невизначеності вимірювання в бік сумніву відносно результату вимірювання.

Терміни «істинне значення вимірюваної величини» і «похибка результату вимірювання» не використовують у формуванні групи понять, пов'язаної з результатом вимірювання. Використовують поняття «оцінене значення вимірюваної величини» і «невизначеність».

Невизначеність, за ДСТУ 2681-94, – це оцінка, що характеризує діапазон значень, у якому є істинне значення вимірюваної величини. У керівному документі ISO наведено таке визначення: невизначеність вимірювання – параметр, об'єднаний з результатом вимірювання, що характеризує розсіювання значень

вимірюваної величини.

Невизначеність характеризує розсіювання значень вимірюваної величини. Параметром розсіювання є середнє квадратичне відхилення чи половина ширини інтервалу розсіювання з установленим рівнем довіри. Рівень довіри в цьому випадку дорівнює одиниці [11].

Невизначеність результату вимірювання (НВ) включає багато компонентів. Деякі з них можна охарактеризувати СКВ, отриманим на основі статистичного розподілу результату вимірювань. Решту компонентів можна також охарактеризувати СКВ, але отриманим на основі суб'єктивно визначеного розподілу ймовірностей чи за допомогою іншої інформації [10].

Очевидно, що результат вимірювання є найкращою оцінкою значення вимірюваної величини коли всі складові невизначеності, що виникають у результаті систематичних ефектів, вилучено, наприклад, за допомогою корекції, введення поправки і використання еталонів; невилучені залишки входять до розсіювання результатів вимірювання, і тобто до невизначеності.

Отже, невизначеність вимірювань означає сумнів відносно вірогідності результатів вимірювань.

Для кількісного представлення пропонується три її види: стандартна невизначеність (типи А і В), сумарна стандартна невизначеність і розширена невизначеність.

Компоненти типу А - компоненти НВ, які оцінюють за допомогою статистичного аналізу ряду вимірювань.

Компоненти типу В — компоненти НВ, які оцінюють за допомогою інших операцій.

Стандартна невизначеність ( $u$ ) – це невизначеність результату прямих вимірювань, що виражена через СКВ.

За способом обчислення і представлення розрізняють два типи стандартної невизначеності: тип А і тип В.

Стандартна невизначеність типу А ( $u_A$ ) – це невизначеність, яка обчислюється статистичними методами обробки результатів багаторазових вимірювань.

Оцінювання стандартної невизначеності типу А відбувається наступним чином:

1. Якщо кількість дослідів  $n < 10$ ,  $u_A$  не оцінюють. Для  $10 \leq n < 20$  – якщо закон розподілу ймовірностей невідомий, для оцінювання  $u_A$  приймають рівномірний закон. Якщо  $n \geq 20$  – закон розподілу ймовірностей визначають апроксимацією експериментальних даних.

2. Для прямого вимірювання результат визначають як середнє арифметичне отриманих значень, тоді невизначеність за типом А обчислюють за формулою:

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

де  $x_i$  – отриманий результат вимірювання;

$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$  – середнє арифметичне результатів вимірювання;

$n$  – кількість проведених вимірювань.

3. Для опосередкованого вимірювання результат визначають за оцінками декількох величин, тоді невизначеність за типом А обчислюють для кожної вихідної величини:

- якщо значення величини розподілені за рівномірним законом, за формулою:

$$u_A = \frac{b}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

де  $b$  – півширина інтервалу (для несиметричного закону розподілу  $b = ((b+) + (-b))/2$ );

- якщо значення величини розподілені за нормальним законом, невизначеність обчислюють як СКВ за формулою:

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

У випадку, коли дисперсія результатів врахована у невизначеності, то додатково похибку ПС враховувати непотрібно, оскільки вона відображена у дисперсії.

Стандартна невизначеність типу В ( $u_B$ ) - це невизначеність, яка обчислюється за деякою апріорною інформацією: даними попередніх вимірювань величин, що входять в рівняння; даними вимірювань, що ґрунтуються на досвіді експериментатора або загальних знаннях про поведінку відповідних об'єктів і засобів вимірювальної техніки, даними їх повірки, атестування і калібрування; невизначеності констант і довідкових даних тощо. Невизначеність усіх цих даних звичайно відображають границями відхилення результату вимірювання фізичної величини від оцінки її істинного значення. Тому невизначеність вимірювань типу В залежить від закону розподілу можливих значень вимірюваної величини.

Оцінювання стандартної невизначеності типу В відбувається наступним чином:

1. Ґрунтуючись на рівнянні залежності вимірюваної величини від вихідних величин складають переліки: вимірюваних вихідних величин; не вимірюваних впливових вихідних величин; введених поправок на відомі систематичні похибки; коефіцієнтів і констант; додаткових похибок тощо.

2. Невизначеності усіх вхідних величин оцінюють інтервалами і перетворюють їх у середньоквадратичне відхилення, при цьому закон розподілу їхніх ймовірностей, якщо він невідомий, приймають рівномірним. Формула перерахування інтервальної оцінки у середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = b/t, \quad (4)$$

де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення (СКВ);  $b$  – на півширина інтервалу;  $t$  – значення функції Лапласа для нормального закону розподілу ймовірностей (або аналог значення функції Лапласа для іншого закону).

Сумарна стандартна невизначеність – це стандартна невизначеність результату непрямих вимірювань. Вона має фізичний зміст дисперсії результату непрямих вимірювань і обчислюється через дисперсії (квадрати стандартних невизначеностей) інших фізичних величин (аргументів), через які визначається шукана фізична величина.

Якщо величини, що входять у рівняння, мають різні одиниці вимірювання, то безпосередньо сумувати інтервальні оцінки невизначеності не можна, їх необхідно звести до безрозмірних величин – середньоквадратичних відхилень згідно із формулою (4), за однакових рівнів довіри  $P(\delta)$ .

Якщо закон розподілу невідомий, то під час перерахунку інтервальної оцінки в середньоквадратичне відхилення, приймають рівномірний закон, а під час перерахунку СКВ в інтервальну оцінку – нормальний закон. Тобто значення функції Лапласа  $t$  або його аналогу обирають таким, щоб забезпечити «запас» невизначеності. Якщо закон розподілу відомий, то коефіцієнт для перерахунку приймають згідно з цим законом.

Оцінювання сумарної стандартної невизначеності відбувається наступним чином:

1. Під час вимірювання показників якості текстильних матеріалів сумарну стандартну невизначеність типу  $A$  визначають за формулою для некорельованих величин:

$$u_{CA} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u_B^2(x_i)}, \quad (5)$$

де  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – залежність вимірюваної величини від вхідних величин (рівняння вимірювання);  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  – коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт), який визначають як часткову похідну рівняння залежності

вимірюваної величини за однією з вхідних величин. Коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт) відображає зміну впливу даної вхідної величини на результат вимірювання;  $u_A(x_i)$  – стандартна невизначеність за типом  $A$  вихідної величини.

2. Сумарну стандартну невизначеність типу  $B$  визначають за формулою:

$$u_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u_B^2(x_i) + u_B^2(x_i)}, \quad (6)$$

де  $u_B(x_i)$  – стандартна невизначеність за типом  $B$  величин, що входять у рівняння залежності вимірюваної величини;  $u_B(z_i)$  – стандартна невизначеність за типом  $B$  величин, що не входять у рівняння залежності вимірюваної величини.

Якщо впливовий фактор не входить у рівняння залежності вимірюваної величини, його враховують у невизначеності, але без урахування коефіцієнту впливу (вагового коефіцієнту).

3. Тоді, сумарна стандартна невизначеність:

$$u_C = \sqrt{u_{CA}^2 + u_{CB}^2} \quad (7)$$

Розширена невизначеність – це величина, що визначає інтервал, у границях якого знаходиться більша частина результатів непрямих вимірювань, які з достатньою підставою можуть бути приписані вимірюваній величині. Розширена невизначеність вимірювань обчислюється через сумарну стандартну невизначеність.

Розширену невизначеність визначають за наступною формулою:

$$U = k \cdot u_C \quad (8)$$

де  $k$  – коефіцієнт охоплення, який залежить від заданого рівня довіри  $P(\delta)$  і ефективного числа ступенів волі. Для рівня довіри  $P(\delta) = 0,95$  за нормального закону розподілу ймовірностей коефіцієнт охоплення  $k = 1,96$ , за рівномірного закону розподілу –  $k = 1,65$  [11].

### Висновки

1. Основою статистичних досліджень є результати вимірювань, тобто метрологічні дослідження. В останні роки в теоретичній та практичній метрології виникають зміни, які пов'язані з введенням, в першу чергу, поняття «невизначеність» для оцінювання достовірності результатів вимірювань та засобів вимірювання. Поряд з цим при проведенні деяких метрологічних робіт зберігається використання поняття «похибка». Така подвійність оцінки результатів вимірювань зумовлює досить повільне впровадження невизначеності в метрологічну практику України. Об'єктами дослідження є метрологічні характеристики та методи їх визначення.

2. Термін «невизначеність вимірювання» можна трактувати як параметр, який характеризує розсіювання значень, що включає в себе складові, що викликані систематичними впливами.

3. Невизначеність визначення вимірюваної величини є мінімальною невизначеністю вимірювання. Цей інтервал, який називається вимірюваним значенням величини, може бути представлений одним з його значень.

## Література

1. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – Київ, 2016. – № 2. – С. 180–184.
2. Про метрологію та метрологічну діяльність : закон України № 113/98-ВР від 11.02.1998 (зі змінами, внесеними згідно із Законом № 762-IV від 15.05.2003, в редакції Закону № 1765-IV від 15.06.2004). [Електронний ресурс]. – Режим доступу : zakon.rada.gov.ua/laws/show/113/98-вр.
3. Захаров І.П. Обработка результатов измерений : уч. пособие / Захаров І.П. – Харків : Изд-во Нац. ун-та внутренних дел, 2002. – 125 с.
4. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / Грановский В.А., Сирая Т.Н. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Чалый В.П. Неопределенность и погрешность, их сходство, различие и употребление в разных метрологических процедурах / В.П. Чалый // Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. – Вип. 7(56). Невизначеність вимірювання: наукові, нормативні та прикладні аспекти. – 2006. – С. 82–86.
6. Захаров І.П. Теория неопределенности в измерениях : [учеб. пособие] / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харків : Консум, 2002. – 256 с.
7. Мерзиевська В.В. Оцінювання невизначеності вимірювання параметрів автомобільних двигунів під час стендового випробовування / В.В. Мерзиевська // Системи обробки інформації. – Харків, 2008.
8. Паракуда В.В. Еволюція вимог до метрології / В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалий // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 3. – С. 56–60.
9. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.
10. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, IDT).
11. Настанова з оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних випробувань : технічний звіт EUROLAB / переклад з англ. та науково-технічне редагування: А.В. Абрамов; А.М. Коцюба, В.М. Новіков. – Київ : Євролаб-Україна, 2008. – 2006. – № 1. – 51 с.

## References

1. Kuzmych L.V. Suchasni tendentsii stvorennia pryladovykh system vymiryuvannia mekhanichnykh velychyn / L.V. Kuzmych // Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy. – Kyiv, 2016. – № 2. – S. 180–184.
2. Pro metrolohiyu ta metrolohichnu diialnist : zakon Ukrainy № 113/98-VR vid 11.02.1998 (zi zminamy, vneseny my zghidno iz Zakonom № 762-IV vid 15.05.2003, v redaktsii Zakonu № 1765-IV vid 15.06.2004). [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : zakon.rada.gov.ua/laws/show/113/98-вр.
3. Zaharov I.P. Obrabotka rezultatov izmerenij : uch. posobie / Zaharov I.P. – Harkov : Izd-vo Nac. un-ta vnutrennih del, 2002. – 125 s.
4. Granovskij V.A. Metody obrabotki eksperimentalnyhdannyh pri izmereniyah / Granovskij V.A., Siraya T.N. – M. : Energoatomizdat, 1990. – 320 s.
5. Chalyj V.P. Neopredelennost i pogreshnost, ih shodstvo, razlichie i upotreblenie v raznykh metrologicheskikh procedurah / V.P. Chalyj // Zbirnik naukovih prac. Sistemi obrobki informaciyi. – Vip. 7(56). Neviznachenist vimiryuvannya: naukovy, normativni ta prikladni aspekti. – 2006. – S. 82–86.
6. Zaharov I.P. Teoriya neopredelennosti v izmereniyah : [ucheb. posobie] / I.P. Zaharov, V.D. Kukush. – Harkov : Konsum, 2002. – 256 s.
7. Merzhyievska V.V. Otsiniuvannia nevyznachenosti vymiryuvannia parametriv avtomobilnykh dvyhuniv pid chas stendovoho vyprobuvuvannia / V.V. Merzhyievska // Systemy obrobky informatsii. – Kharkiv, 2008.
8. Parakuda V.V. Evoliutsiia vymoh do metrolohii / V.V. Parakuda, B.D. Kolpak, V.P. Chalyi // Ukrainskyi metrolohichniy zhurnal. – 2005. – № 3. – S. 56–60.
9. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.
10. DSTU-N RMH 43:2006. Metrolohiia. Zastosuvannia «Rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti yzmereniy» (RMH 43:2001, IDT).
11. Nastanova z otsiniuvannia nevyznachenosti vymiryuvannia rezultativ kilkisnykh vyprobuvan : tekhnichniy zvit EUROLAB / pereklad z anh. ta naukovo-tekhnichne redahuvannia: A.V. Abramov; A.M. Kotsiuba, V.M. Novikov. – Kyiv : Yevrolab-Ukraina, 2008. – 2006. – № 1. – 51 s.

Рецензія/Peer review : 15.6.2019 р.

Надрукована/Printed : 18.7.2019 р.

Стаття рецензована редакційною колегією