

УДК 571

Т. М. Пирог, аспірант

**АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТУ НА  
КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МАШИНАХ**

Національний авіаційний університет, t.pyrog@web.de

*Одними із основних напрямків досліджень з метрології, неруйнівного контролю є розробка методів розрахунку і оцінки вимірювальної невизначеності на координатно-вимірювальних машинах (КВМ). В статті проаналізована загальна методика розрахунку невизначеності вимірювального результату КВМ. Проведений детальний аналіз вимірювальної системи, блоку збору інформації про бюджет невизначеності і врахуванні коефіцієнту розмаху, який може бути визначений на основі заданої точності. Для оцінки невизначеності використано статистичні методи аналізу.*

**Ключові слова:** невизначеність, статистичний аналіз, координатно-вимірювальна машина, оцінка точності

**Вступ.** Стрімкий розвиток машинобудівної, авіаційної, ракетно-космічної, автомобільної, фармацевтичної і інших галузей промисловості, вимагає підвищення вимог до надійності функціонування і високої точності інформаційно-вимірювальних систем. Це в свою чергу забезпечується широким впровадженням прецизійних КВМ, які дають можливість швидко і надійно проводити вимірювання складних геометричних поверхонь. Достовірні координатні вимірювання є одними з основних передумов для якісного високоточного промислового виробництва. Основна задача координатних вимірювань полягає в розрахунку фактичних значень набору параметрів вимірюваної поверхні по даним множини значень координат точок її вимірювань [1]. При виробництві КВМ однією з основних умов гарантування їх якості, є проведення метрологічної атестації (МА), але до цього часу не розроблено загальної методики МА. Одним з етапів розробки МА є коректний розрахунок похибок кожної ланки КВМ і як результат невизначеності вимірювального результату.

Одним з показників точності вимірювання є оцінка невизначеності, що характеризує вимірювальну величину розсіювання вимірювальної ознаки [5].

**Аналіз основних досліджень і результатів.** Коректне формулювання невизначеності стає все більш важливим для провідних компаній і науково-дослідних установ, які намагаються підтримувати зв'язок засобів вимірювання з міжнародними галузевими стандартами.

Загальні вказівки для характеризування точності граничних значень чи інших якісних критеріїв КВМ подані в специфікаціях [4, 5].

У відповідності до ISO/TS 21748, вимірювальна невизначеність (ВН) - це параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, і характеризує розсіювання значень, які обґрунтовано можуть бути приписані вимірювальній величині.

Типові методи для визначення набору складових ВН (бюджету) базуються на аналітичному моделюванні і розрахунку коефіцієнтів чутливості через часткове диференціювання [4]. Для простих вимірювальних завдань використання подібного типу рівнянь також для КВМ є можливим. Для більш складних завдань, додатково мусять бути враховані кореляція вхідних величин. Тому широкого використання набули експериментальні методи встановлення ВН [4,5], шляхом використання деякої еталонної деталі. В основі таких методів лежить використання однієї або декількох незалежно каліброваних деталей або плат, які містять в собі фактично схожі або однакові елементи з вимірювальним об'єктом по всіх технічних характеристиках (довжина, форма, матеріал тощо). На рис. 1 наведений приклад використання КВМ для контролю кузовних деталей автомобільної промисловості, а на рис. 2 один з прикладів зразкової деталі для МА.

Науковці М. Франке і Г. Швенке (Німеччина) в роботі [3] аналізують метод розрахунку ВН, який включає в себе типові складові ВН, наприклад, шорсткість вимірювальної поверхні, досяжність вимірювальної головки, зовнішні впливи і пропонують, відповідно до стандарту ISO/TS 14253-2:1999 §9.3.10, групувати в представляти такі дані в табличній формі - формувати бюджет похибок. Групування дестабілізуючих факторів залежно від їх типу, джерела надходження, природи (стохастичні, детерміновані) і т.д. і їх представлення таблицею дає можливість наглядно та зручно перевірити і порівняти теоретичні і експериментальні результати в лабораторних умовах. Проводять порівняльний аналіз існуючих методів розрахунку ВН і показано про необхідність врахування при розрахунку ВН не тільки детермінованих, а й ймовірнісних факторів, що не передбачені умовами експерименту. Тому науковці все більш уваги

приділяють актуальності використання методів математичної статистики для оцінки НВ.

Список типових джерел помилок і невизначеностей в загальному випадку для КВМ наведені в ISO/TS 14253-2:1999 §7.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення точності КВМ на основі визначення та оцінки НВ, і включає поетапний аналіз розрахунку ВН на КВМ.

**Розв'язання задачі.** В загальному випадку на вимірювальний засіб поступає множина вхідних величин, які містять в собі як вимірювальні величини так і неінформативні складові для даного виду вимірювання. На рис. 3 представлений процес вимірювального перетворення вхідної величини з отриманням вихідного значення. Математична модель досліджуваного процесу будується на основі експериментального визначення вхідних впливів і відгуків.

**Методи розрахунку невизначеності вимірювання.** Відповідно до стандарту [7], виділяють наступні етапи для розрахунку ВН:

1. Аналіз вимірювальної системи, збір інформації про можливі похибки вимірювання
2. Оцінювання невизначеностей кожної із складових, їх класифікація по типам.
3. Розрахунок сумарної стандартної невизначеності  $u_c$ .
4. Визначення коефіцієнту розмаху  $k$ .
5. Розрахунок розширеної невизначеності  $U = k \cdot u_c$ .
6. Представлення результату вимірювання  $\mathcal{Y} \pm U$ .

**Аналіз роботи вимірювальної системи.** При аналізі роботи вимірювальної системи проводиться збір інформації про можливі похибки вимірювання, по суті визначення складових, які мають вплив на математичну модель вимірювання. Деякі з цих складових, згідно з ISO/TS 14253-2:1999 §8, відносяться до типу А, можуть бути оцінені за статистичними розподілами результатів серії вимірювань і охарактеризовані експериментальним стандартним відхиленням. Інші складові (тип Б), які також можуть бути охарактеризовані стандартним відхиленням, оцінюються на основі припущень про розподіл ймовірностей, заснованих на експериментальній чи іншій інформації.

Складові типу Б можуть бути отримані з авторитетних фахових видань, державних і міжнародних стандартів, паспорту калібрування, класу точності вимірювальної апаратури тощо.

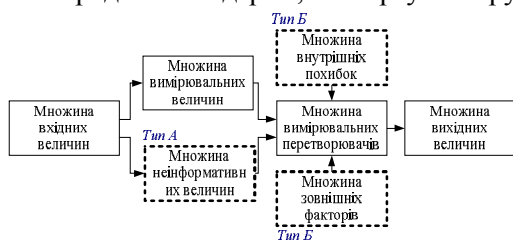


Рис. 3. Схематична модель процесу вимірювального перетворення

**Оцінювання невизначеності.** Вимірювальна величина  $Y$  визначається множиною  $N$  вхідних величин  $X_1, X_2, \dots, X_N$  через функцію перетворення  $f$  вимірювальним рівнянням:  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  (1)

Оцінку вимірювальної величини  $Y$  позначимо через  $y$ , отриману з рівняння (1), використавши оцінки  $x_1, x_2, \dots, x_N$  для множини вхідних параметрів  $X_1, X_2, \dots, X_N$  і подамо у вигляді  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ .

Розглянемо вхідну величину  $X_i$ , значення якої оцінене з  $n$  незалежних спостережень  $X_{i,k}$ , які отримані при деяких визначених умовах вимірювання. В цьому випадку оцінка вимірювальної величини визначається як середнє арифметичне вибірки значень:  $X_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{i,k}$

Розглянемо ідеальний варіант, коли випадкові впливи відсутні і необхідно дослідити вплив тільки одного фактору. Найкращою оцінкою для нього буде слугувати величина, аналогічна дисперсії,  $u(x_i)$  яка характеризує розсіяння вихідної величини навколо деякого середнього значення.

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_i)^2}$$

де  $\bar{X}_i$  - середнє значення вибірки вимірювальної величини,  $n$  - кількість незалежних спостережень  $X_{i,k}$ .



Рис. 1. Використання координатно-вимірювальних машин в автомобільній галузі промисловості

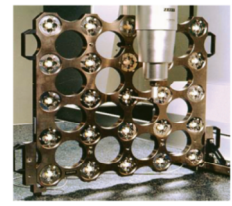


Рис. 2. Зразкова деталь фірми Zeiss для комплексної повірки координатно-вимірювальних машин

На практиці стаціонарність результатів вимірювання може порушуватись за рахунок впливу випадкових неврахованих факторів (температура в лабораторії, тиск, вологість тощо), що призведе до неправильного оцінювання результату вимірювання. Для виявлення і якісної оцінки таких неврахованих факторів доцільно використовувати дисперсійний аналіз [2], який полягає у виділенні і оцінці окремих факторів, що викликають зміну досліджуваної випадкової величини. Перевірка значимості оцінок дисперсії проводять по критерію Фішера. Коли розрахункове значення критерію Фішера виявиться меншим табличного, то вплив досліджуваного фактору немає підстав вважати значимим і навпаки.

**Сумарна невизначеність складових  $u_c$ .** Сумарна стандартна невизначеність НВ  $u_c$ , отримана через значення декількох інших величин, представлена як  $u_c(y)$  і визначається як квадратний корінь суми членів, які представляють собою дисперсії цих інших величин.

**Визначення коефіцієнту розмаху  $k$ .** Коефіцієнт розмаху  $k$ , який в загальному випадку обирається на основі обраного рівня статистичної значимості і перемножується зі сумарною стандартною невизначеністю вимірювального результату. Зазвичай  $k$  приймає значення 2 або 3. Коли стандартна невизначеність підпорядковується нормальному закону розподілу, і при заданому довірчому інтервалу 95%,  $k = 2$ , а при 99,7% коефіцієнт розмаху  $k = 3$ . Чим більше коефіцієнт розмаху, тим більше рівень довіри до істинного значення вимірювальної величини і розширена НВ попадає в довірчий інтервалі

**Розрахунок розширеної невизначеності  $U$**  проводиться за наступною формулою  $U = k \cdot u_c(y)$ , де  $k$  - коефіцієнт розмаху,  $u_c(y)$  - сумарна стандартна НВ. В таблиці 1 наведені експериментальні дані, отримані вимірюванням довжини діагоналі зразкової деталі, в лабораторних умовах. Для оцінки впливу температури на НВ, вимірювальний експеримент проводився в 3 етапи при різних температурах в лабораторії:  $17^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  і  $23^\circ\text{C}$ . В таблиці 2 представлені отримані результати розрахунку НВ і поданий результат вимірювання у вигляді  $\bar{x} \pm U$ .

Таблиця 1  
Експериментальні дані при температурах  
 $17^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $23^\circ\text{C}$

№	Рівень фактору А (Температура)		
	$17^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C}$	$23^\circ\text{C}$
1	640	640,1	640,05
2	640,1	640,1	640,2
3	640	640,1	640
4	639,8	640,1	640,1
5	640,2	639	640,2

Таблиця 2  
Результати розрахунку невизначеності  
вимірювання діагоналі зразкової деталі

Параметри	Значення
Середнє арифметичне, мм	640,0033
Сумарна НВ, мм	0,05
Коефіцієнт розмаху при 95%	2
Загальна НВ, мм	0,1
Результат вимірювання, мм	$640 \pm 0,1$

Розрахункове значення критерію Фішера  $F_r = 0,59$  виявиться меншим табличного  $F_t = 3,89$  (таблиця 1), то вплив досліджуваного фактору, в даному випадку температури, немає підстав вважати значимим.

**Висновки.** В статті проаналізована загальна методика розрахунку невизначеності вимірювального результату КВМ. Проведений детальний аналіз вимірювальної системи, блоку збору інформації про бюджет невизначеності і врахуванні коефіцієнту розмаху, який може бути визначений на основі заданої точності.

#### Список літературних джерел

1. Координатно-измерительные машины и их применение / [Гапшис В.-А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. Б. и др.]. — М. : Машиностроение, 1988. — 328 с.
2. Володарский Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Володарский Е. Т., Малиновский Б. Н., Туз Ю.М. — К.: Вища школа, 1987. — 280 с.
3. Schwenke H., Franke M. Bestimmung der Unsicherheit von Messungen mit KMG — Status und Ausblick// PTB-Mitteilungen 117, Heft 4, 2007 — s. 364-371
4. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmepfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) : DIN EN ISO 10360-2:2000. — [Чинний від 06-2010]. — D.: DIN: Deutsches Institut Fur Normung E.V., 2009. — 15 с. — (Міжнародний стандарт).
5. Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen : DIN ISO/TS 15530-3 — [Чинний від 07-2009]. — D. : DIN: Deutsches Institut Fur Normung E.V., 2008. — 23 с. — (Міжнародний стандарт).
6. Руководство по использованию оценок повторяемости, воспроизводимости и правильности при оценке неопределённости измерений (перевод с англ.): ИСО/ТУ 21748:2004— [Чинний від 19-11-2006]. — М. : Стандартинформ, 2004. — 72 с.