

УДК 531.7

DOI: 10.18372/2073-4751.76.18247

Чалий О.В.,

orcid.org/0009-0003-5429-8869

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КАЛІБРУВАННЯМ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ

Національний авіаційний університет

7769225@stud.nau.edu.ua

Вступ

Зростаючі вимоги до якості деталей авіаційної техніки призвели до постійного вдосконалення та ускладнення методів їх проектування, технологій виготовлення, засобів та методів контролю. Аналіз сучасних тенденцій розвитку авіаційних конструкцій показує, що без гнучких систем автоматичного контролю неможливо забезпечити якість продукції на виробництві [1].

Сучасною тенденцією для виробництва авіаційних деталей і авіабудуванні в цілому є впровадження у виробничий процес координатно-вимірвальних машин (КВМ) [2,7].

Ці заходи контролю характеризуються високим ступенем універсальності та низькими значеннями похибки. Дані про похибки, зазначені виробником можна віднести лише до невеликої кількості простих вимірвальних геометричних параметрів [3]. Тому можливо лише з деякою ймовірністю оцінити, в якому інтервалі знаходиться справжнє значення. У разі використання КВМ необхідно дотримуватися валідованої процедури калібрування з вираженою невизначеністю. Процедура калібрування повинна загалом визначати обладнання та допоміжні засоби для калібрування. Також необхідно вказати, за яких умов буде проводитися калібрування. Також рекомендується включити в процедуру зразок прикладу для розрахунку невизначеності вимірювання та окреслити правила, пов'язані з даним калібруванням.

Калібрування КВМ виконується шляхом сканування точок вимірювання на поверхні вимірюваного об'єкта. Координати (полярні або прямокутні) окремих вимірних точок передаються в комп'ютерну

програму, яка їх обробляє. На виході програмного забезпечення для користувача є перелік характеристик, які підлягають калібруванню [5]. Як правило, періодичні систематичні похибки виникають через дефекти кульково-гвинтового механізму тощо. Однак не всі періодичні похибки можна врахувати, особливо пов'язані з ковзанням і гістерезисом. Ці періодичні та невідтворювані похибки враховуються незначеністю.

Мета

Метою статті є розроблення вимірвальної системи в КВМ для оцінки результатів вимірювань на основі невизначеності, оцінка здійсненності практичних вимірювань, а також ідентифікація та кількісна оцінка джерел невизначеності вимірювань. Кількісне визначення похибки вимірювання.

Основна частина

Розглянемо види стандартних невизначеностей та метод їх оцінки. Джерела невизначеності можна визначити як усі явища, які можуть певним чином вплинути на визначення результату вимірювання і тим самим віддалити вимірне значення від фактичного значення. Дотримуючись загальної процедури розрахунку загальної невизначеності вимірювань, після визначення всіх знайдених джерел невизначеності, спричинених мінливістю вимірвальної системи, потрібен їх статистичний опис, використовуючи так звані стандартні невизначеності [6]. Для визначення їх розміру доступні два способи:

- статистична обробка вимірюваних даних (метод типу А);
- крім статистичної обробки вимірних даних (метод типу В).

Іноді невизначеності, отримані за допомогою методу А, також коротко називають невизначеностями типу А, подібним чином невизначеності, отримані методом В, є невизначеностями типу В. З цих основних типів невизначеностей потім визначають результуючу комбіновану невизначеність і, нарешті, розширену невизначеність.

Розрахунок стандартної невизначеності типу А базується на статистичному аналізі вимірюваних даних. У разі повторних вимірювань - це звичайна статистична обробка значень вимірюваної величини, отриманих шляхом повторних прямих вимірювань, яких повинно бути не менше десяти. Передбачається, що вимірювання є взаємно незалежними і проводяться в однакових умовах [8].

Отже, доступно n вимірюваних даних $x_1, \dots, x_2, \dots, x_n$, які є результатом реалізації n незалежних та однаково точних вимірювань величини. Прикладом може бути, багаторазове вимірювання довжини компонента в тому самому місці, з тим самим калібром і тим самим оператором за незмінних умов навколишнього середовища. Тоді основний результат вимірювання (оцінка значення вимірюваної величини) представляється середнім арифметичним:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1)$$

Стандартна невизначеність типу А цього результату, що позначається $U_A(x)$, дорівнює стандартному відхиленню середнього арифметичного $U_{\bar{x}}$, тобто:

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

Співвідношення (2) можна використати для обчислення невизначеності, лише якщо виконано достатню кількість вимірювань $n \geq 10$. Якщо неможливо виконати цю умову, необхідно зробити додаткову поправку, щоб врахувати невелику кількість повторних вимірювань, заданих співвідношенням (3), або оцінити невизначеність за допомогою методу типу В.

$$u_A(x) = k_s S_{\bar{x}}, \quad (3)$$

де k_s – коефіцієнт, значення якого залежить від кількості вимірювань n , як показано в табл. 1. Ці коефіцієнти застосовуються при використанні коефіцієнта $k=2$ (під час розрахунку розширеної невизначеності вимірювання).

Таблиця 1. Значення поправочних коефіцієнтів для меншої кількості повторень

n	9	8	7	5	4	3	2
k_s	1,2	1,2	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

Оцінка стандартної невизначеності вхідної величини методом типу В базується на нестатистичних підходах до аналізу серії спостережень. Невизначеності, виявлені за допомогою методу В, пов'язані з відомими, ідентифікованими та кількісно визначеними джерелами. Розрахунок базується на кваліфікованому судженні на основі всієї доступної інформації про вимірювану величину x та його можливі зміни. Джерелами інформації для визначення невизначеності типу В можуть бути:

- досвід попередніх вимірювань та їх результати;
- досвід і загальні знання про поведінку об'єкта вимірювання, методи вимірювання, засоби вимірювання та умови вимірювання;
- відомості про засоби вимірювальної техніки та умови їх використання, отримані від виробників;
- дані з сертифікатів, калібрувальних листів, листів перевірки тощо;
- невизначеності довідкових даних, взятих з різних джерел.

Ступінь, до якого ця інформація буде оцінена та використана, залежить від досвіду оператора, глибини загальних знань, а також від рутини та практики експериментатора, оскільки природа проблеми не дозволяє визначити єдину процедуру в деталі. При визначенні невизначеності за допомогою методу типу В вона базується на часткових невизначеностях окремих джерел U_{Bzj} . Якщо відоме максимальне відхилення j -го джерела невизначеності Z_{jmax} , визначається невизначеність U_{Bzj} може

бути відповідно до наступного співвідношення:

$$U_{Bzj} = \frac{Z_{jmax}}{k} \quad (4)$$

де k є коефіцієнтом, що базується на законі розподілу, що керує відповідним джерелом невизначеності. Так, наприклад, для нормального розподілу $k=2$ або 3 . Якщо стандартна невизначеність через відповідне джерело безпосередньо невідома, можуть виникнути різні ситуації, деякі з яких перелічені нижче. Відома розширена невизначеність і коефіцієнт розширення. Однак у деяких випадках значення стандартної невизначеності можна дізнатися безпосередньо наприклад, з калібрувального листа лічильника. У цьому випадку в основі лежить співвідношення:

$$U_{Bzj} = \frac{U}{k}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, заснований на законі розподілу, а U є значенням стандартної розширеної невизначеності, зчитаної з документації.

Якщо відомий діапазон, в якому може перебувати більшість вимірних значень (наприклад, 95%, 99% або 99,73%), і розумно припустити, що при визначенні цього інтервалу розглядався нормальний розподіл, стандартна невизначеність може бути завдяки даному джерелу Z_j визначити із співвідношення:

$$U_{Bzj} = \frac{U}{K_p}, \quad (6)$$

де K_p – коефіцієнт розкидання, що дорівнює квантилю стандартизованого нормального розподілу для ймовірності P . Іншими ситуаціями можуть бути, наприклад відомі межі впливу джерела, похибка при використанні цифрового вимірювального пристрою тощо.

Результуюча невизначеність визначається методом В для p джерел $Z_1, \dots, Z_2, \dots, Z_f, \dots, Z_p$ наступним чином:

$$Z_f = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 U_{Bzj}^2}, \quad (7)$$

де U_{Bzj} може бути невизначеності окремих джерел A_j – їх коефіцієнти чутливості, які відомі, або визначається розрахунковим шляхом.

Таким чином, невизначеність, оцінена за методом В, перетворюється на абсолютно нову форму, і порівняно з попередніми ідеями навіть ці невизначеності набувають характеру стандартного відхилення. Як з таким, або у квадратах, як і з дисперсією, з ними продовжують працювати.

Розрахунок комбінованої стандартної невизначеності

Необхідно виразити невизначеності типу А одним числом (позначається U_A) та невизначеності типу В (U_B). Для цього використовується повна невизначеність, яку зазвичай називають комбінованою невизначеністю і позначають U_C . Розрахунок визначається так званім законом коваріації для розповсюдження невизначеностей. Закон розповсюдження невизначеності: для випадку простого прямого вимірювання однієї величини Y (вихідна кількість), яка є функцією m величин (вхідних величин), модель вимірювання може бути описана співвідношенням:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m), \quad (8)$$

де f є відомою функцією. Оцінка у значення вихідної змінної Y можна визначити із співвідношення:

$$y = f(x, x_2, \dots, x_q, \dots, x_m), \quad (9)$$

де $x, x_2, \dots, x_q, \dots, x_m$ – оцінка вхідних величин $X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m$. Невизначеність оцінки у величини Y визначається співвідношенням:

$$u_y^2(x) = \sum_{j=1}^m A_j^2 u_{xj}^2 + \sum_{j=1; k < j}^m A_j A_k u_{xj} r_{xjk}, \quad (10)$$

де $A_j A_k$ коефіцієнти чутливості (коефіцієнти пропускання) і визначаються як:

$$A_j = \frac{\partial f(x)}{\partial x_j}; A_k = \frac{\partial f(x)}{\partial x_k}, \quad (11)$$

де X_{jk} коефіцієнт кореляції, який вказує на статистичну залежність (кореляцію) між двома величинами X_j і X_k .

Якщо вхідні величини є некорельованими, тобто вхідні змінні величини не залежать одна від одної (коефіцієнт кореляції близький до нуля), тоді рівняння можна скорегувати відповідно до закону Гауса для поширення невизначеностей:

$$u_y^2(x) = \sum_{j=1}^m A_j^2 u_{xj}^2. \quad (12)$$

Оскільки розглядається лише пряме вимірювання (вимірювання, де немає взаємозалежностей між вхідними величинами, або ними можна знехтувати через їхні розміри), останнє співвідношення може бути достатнім. Тоді співвідношення для обчислення комбінованої стандартної невизначеності буде таким:

$$u_c(x) = \sqrt{u_a^2(x) + u_b^2(x)}. \quad (13)$$

Стандартна комбінована невизначеність, визначена за співвідношенням (13), визначається з імовірністю приблизно 68%. Для іншої ймовірності невизначеність вимірювання коригується множенням на коефіцієнт розширення відповідного розподілу.

Розрахунок розширеної невизначеності

Результат вимірювання у формі $y = \pm u_c$ фактичне значення вимірюваної величини з відносно малою ймовірністю. Ця ймовірність зазвичай недостатня, тому зусилля полягають у тому, щоб встановити інтервал, у якому значення знаходиться з імовірністю, близькою до 100%. Тому в практику вводиться так звана розширена невизначеність. Він визначається співвідношенням:

$$U = k_t u_c, \quad (14)$$

де k_t коефіцієнт розширення. Значення k_t залежить від типу розподілу ймовірностей результату вимірювання. На практиці використовуються різні значення коефіцієнтів розширення в залежності від типу розподілу і необхідного значення ймовірності. Дуже поширеним випадком є ймовірність 95%, що справжнє значення знаходиться в інтервалі $y \pm U$. Виходячи з теорії математичної статистики, дуже часто можна припустити нормальний розподіл.

Внесок невизначеності розраховується відповідно до співвідношення (2). Якщо під час вимірювання буде проведено меншу кількість вимірювань (з будь-якої причини), кількісно повний набір даних не буде отримано. Необхідно визначити ступінь свободи та визначити коефіцієнт (квантиль), на який буде розкладено отримане значення з таблиці №1 для розподілу Стьюдента.

Вплив використовуваного стандарту (U_e). Кожен еталон повинен мати свій власний калібрувальний аркуш, у якому вказана його розширена невизначеність U одночасно з коефіцієнтом розширення k . Невизначеність U визначається:

$$U = a + bl, \quad (15)$$

де a , b — експериментально визначені коефіцієнти, l — виміряна довжина. Внесок невизначеності розраховується відповідно до (5). Тут передбачається нормальний розподіл. Це використовується, коли ймовірність малих відхилень є значною, тоді як ймовірність великих відхилень, що дорівнюють обмеженням, дуже мала або незначна.

Вплив роздільної здатності (U_p).

Вимірювальні прилади, методи вимірювання та оператор вимірювальних пристроїв мають обмежену здатність диференціювати. Для величини внеску за рахунок роздільної здатності прийнято рівномірний (прямокутний) розподіл із типовим для даного типу розподілу коефіцієнтом $k = \sqrt{3}$, а співвідношення для визначення стандартної невизначеності різниці температур має такий вигляд:

$$U_p = \frac{R}{\sqrt{3}}, \quad (16)$$

де R — роздільна здатність.

Рівномірний розподіл використовується, коли існує однакова ймовірність появи будь-якого відхилення на всьому заданому інтервалі.

Вплив різниці температур ($u_{\Delta 20}$). Контроль температури є основною передумовою для високоякісних і точних вимірювань, тому необхідно звернути увагу на відповідний і достатній метод вимірю-

вання температури матеріалу та навколишнього середовища. Під час вимірювання зазвичай відзначається певне відхилення від заданої температури, наприклад $\Delta t_{20} = \pm 1^\circ\text{C}$. Для цього значення передбачається рівномірний розподіл із коефіцієнтом типу для даного типу розподілу $k = \sqrt{3}$.

Співвідношення для визначення стандартної невизначеності різниці температур має вигляд:

$$u_{\Delta 20} = \alpha \frac{\Delta t_{20}}{k} L, \quad (17)$$

де α коефіцієнт поздовжнього розширення даного вимірюваного матеріалу, а L довжина, що вимірюється. В реальних умовах вимірювання не завжди можна гарантувати ідеальний стан і хід температурних характеристик. З цієї причини доцільно врахувати вплив різниці температур стандарту та вимірювальної машини на загальну (комбіновану) невизначеність вимірювання під час калібрування. Координатна машина і вимірюваний об'єкт мають різні температури t_1 і t_2 . Крім того, вони мають різні коефіцієнти теплового розширення α_1 і α_2 . Середнє значення коефіцієнта становитиме:

$$\alpha_A = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}, \quad (18)$$

де α_1 коефіцієнт теплового розширення машини α_2 коефіцієнт теплового розширення об'єкта вимірювання. Різниця довжини внаслідок теплового розширення визначається як:

$$\Delta L = L \alpha_A (t_1 - t_2), \quad (19)$$

де t_1 – температура координатної машини t_2 температура вимірюваного об'єкта. Внесок невизначеності розраховується відповідно до співвідношення:

$$u_{\Delta T} = \frac{L \alpha_A (t_1 - t_2)}{\sqrt{3}}, \quad (20)$$

де L – виміряна довжина, α – середнє значення коефіцієнта розширення, t_1, t_2 – максимальний значення різниці температур координатної машини та вимірюваного об'єкта а $\sqrt{3}$ коефіцієнт, що впливає з припущення рівномірного розподілу ймовірностей.

Висновки

Вимірювання методом контактних координат є найбільш точним і найчастіше використовується в сучасному авіаційному виробництві. Розроблена методика охоплює більшу частину діапазону вимірювань КВМ, що дозволить отримати об'єктивну оцінку. Оцінювання невизначеностей вимірювання спрямоване на виконання таких умов:

- проста робота користувача;
- можливість коригування відповідно до поточних вимог;
- універсальність використання;
- можливість передачі вимірюваних даних з вимірювального програмного забезпечення;
- можливість перенесення результатів невизначеності в протоколи калібрування.

Іншим важливим фактором є метрологічне підтвердження, що складається в основному з належного калібрування, регулярного налаштування та обслуговування. Навколишнє середовище, є основним джерелом мінливості, вплив якого теоретично описаний на вимірювану величину. Іншими джерелами мінливості є розмір і форма поверхні, яка контактує з датчиком. Для максимально обмежити дії похибки, необхідно дотримуватись властивостей вимірюваного об'єкта, враховувати такі, як внутрішня напруга, деформація, провідність, вага, магнетизм тощо. Не останнім джерелом змінності в системі є калібр, а саме його метрологічні властивості та конструкція. До них належать стабільність вимірювача, роздільна здатність вимірювача, точність, чутливість. Розроблена методика дозволяє враховувати, систему чутливості, теплове розширення, паралакс, геометричні неточності та інші. На основі отриманих результатів визначається оцінка невизначеності вимірювань, що підвищує точність і надійність координатних вимірювань конкретних розмірів, відхилень форми і положення поверхонь контрольованих деталей і інструментів, що в основному досягається за рахунок забезпечення якомога нижчої похибки.

Література

1. Bosch J.A. Coordinate Measuring Machines and Systems. Boca Raton : CRC Press, 1995. P. 496.
2. Los A., Mayer J.R.R. Application of the adaptive Monte Carlo method in a five-axis machine tool calibration uncertainty estimation including the thermal behavior. *Precision Engineering*. 2018. V. 53. P. 17–25.
3. ŠRÁMEK, Jan. Nejistoty měření při kalibraci 1 a 2 osých měřicích přístrojů. Metrologie. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, roč. 2011, č. 4, s. 5.
4. Phillips S.D., et al. The calculation of CMM measurement uncertainty via the method of simulation by constraints. *Proceedings of American Society for Precision Engineering* / Norfolk, USA, 1997.
5. Sladek J., Gaška A. Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method. *Measurement*. 2012. V. 45(6). P. 1564–1575.
6. Sladek J.A. Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements. Berlin : Springer, 2016. 471 p.
7. Mantel M.R. Coordinate Measuring Machines: Modern Inspection Tool in Manufacturing: thesis submitted in partial fulfillment of requirements for degree master of science in manufacturing systems engineering / MR Mantel. Newark : New Jersey Institute of Technology, 1993. 102 p.
8. Kolomiets L.V., Leschenko Y.P. Measuring systems of coordinate moving of measuring robots. *Safety in Aviation and Space Technologies: proceedings V world congress – Aviation in the XXI-st century* / NAU. Kyiv, Ukraine, 2012. P. 1.9.22–1.9.25.

Чалий О.В.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КАЛІБРУВАННЯМ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ

У науковій статті вирішено важливі науково-технологічні проблеми підвищення ефективності використання координатно-вимірювальних машин та забезпечення точності вимірювання. В ході роботи було представлено математичну модель системи, яка дозволяє оцінити точність контактних вимірювань складних криволінійних поверхонь координатно-вимірювальними машинами та визначити оцінки результатів вимірювань на основі невизначеності. Було показано, що фактична похибка вимірювання може бути значно більшою, ніж сертифікована похибка вимірювання за рахунок невизначимостей.

Ключові слова: координатно-вимірювальні машини, похибка системи, невизначеність, невизначеність калібрування.

Chalyi O.V.

SYSTEM OF CONTROLLING THE CALIBRATION OF THE COORDINATE MEASURING MACHINE

The scientific article solves important scientific and technological problems of increasing the efficiency of the use of coordinate measuring machines and ensuring measurement accuracy. In the course of the work, a mathematical model of the system was presented, which makes it possible to assess the accuracy of contact measurements of complex curved surfaces by coordinate measuring machines and to determine evaluations of measurement results based on uncertainty. It has been shown that the actual measurement error can be much larger than the certified measurement error due to uncertainties.

Keywords: coordinate measuring machines, system error, uncertainty, calibration uncertainty.