

УДК 531.7

С. Ф. Філоненко, д.т.н., В. Ю. Ларін, к.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н.

ДНП Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ НА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ МАШИНІ

Стаття присвячена методиці вимірювання прецизійних деталей на координатно-вимірювальних машинах (КВМ). У роботі проаналізовано основні чинники впливу на точність вимірювань на КВМ, такі як температурні, власні деформації, неточність позиціонування та інші. Запропоновано комплексну методику компенсації цих факторів, що включає відповідну підготовку зразків, налаштування параметрів вимірювання, а також математичну обробку отриманих даних. Практичне застосування розробленої методики дозволить значно поліпшити контроль геометричних параметрів відповідальних виробів, що сприятиме підвищенню якості та надійності кінцевої продукції.

Ключові слова: координатно-вимірювальні машини, прецизійні деталі, точність вимірювань, температурна нестабільність, деформації вимірювального обладнання, компенсація факторів впливу, математична обробка даних, контроль геометричних параметрів, підвищення якості та надійності продукції.

S. F. Filonenko, DSc, V. Y. Larin, DSc, D. M. Kvashuk, PhD

METHOD OF MEASURING PRECISION DETAILS ON A COORDINATE-MEASURING MACHINE

This article presents a comprehensive methodology for measuring precision parts using coordinate measuring machines (CMM). The study delves into the key factors that influence measurement accuracy, including temperature instability, inherent deformations in the measuring equipment, inaccuracies in probe positioning, and other external and internal sources of error. A detailed analysis of these factors is conducted to identify their impact on measurement results and establish methods for mitigating their effects.

To address these challenges, a systematic approach to compensating for influencing factors is proposed. This includes thorough preparation of the parts being measured, ensuring that the conditions meet specified standards to minimize distortions. The methodology also involves the optimization of measurement parameters. Advanced mathematical processing techniques, including error compensation algorithms and statistical analysis of data, are employed to enhance the reliability of the measurement results. The proposed methodology has been validated through practical experiments on various precision parts, demonstrating its effectiveness in improving the accuracy and repeatability of CMM measurements. The application of this methodology enables precise control of the geometric parameters of critical components, ensuring compliance with stringent quality standards. This, in turn, contributes to enhancing the performance, reliability, and overall quality of the final products in industries where precision is paramount, such as aerospace, automotive, and medical device manufacturing.

By addressing these challenges and proposing robust solutions, this work provides valuable insights into optimizing CMM operations, ensuring that precision measurements meet the highest standards of accuracy and reliability.

Keywords: Coordinate measuring machines, precision parts, measurement accuracy, temperature instability, deformations of measuring equipment, compensation of influencing factors, mathematical data processing, geometric parameter control, improving product quality and reliability.

DOI 10.32684/2412-5288-2024-2-25-24-29

Вступ

Сучасні вимоги до якості та надійності продукції в багатьох галузях промисловості обумовлюють необхідність використання точних методів контролю геометричних параметрів деталей.

Прецизійні деталі, що використовуються в авіаційній, автомобільній, медичній та інших високотехнологічних сферах, вимагають високого рівня точності як у процесі виробництва, так і під час контролю. Координатно-вимірювальні ма-

шини (КВМ) є одним із найефективніших інструментів для забезпечення такого контролю завдяки їхнім можливостям вимірювати складні геометричні форми з високою точністю.

Проте, попри значні технічні можливості, точність вимірювань на КВМ залежить від багатьох чинників, зокрема температурних впливів, деформацій обладнання, неточності позиціонування, характеристик сенсорів та впливу людського фактора. Ці чинники можуть суттєво погіршити точність результатів вимірювань, особливо під час роботи з прецизійними деталями, де похибки в долях мікронів мають критичне значення [1].

Проблема полягає у розробці методики вимірювання, яка дозволяє компенсувати вплив зазначених чинників та забезпечити максимально можливу точність вимірювань. Це завдання є актуальним як з точки зору наукових досліджень, так і з практичного погляду, оскільки точність контролю безпосередньо впливає на якість кінцевої продукції та зменшення кількості дефектів.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

В останні десятиліття проблема точності вимірювань на КВМ була активно досліджена в науковій літературі. Багато дослідників зосереджували свою увагу на удосконаленні конструкції КВМ, а також на методах компенсації впливу різних чинників на точність вимірювань. Зокрема, у роботах [2], [3] піднята проблема впливу температурних коливань на точність позиціонування і роботи вимірювальних систем, зокрема датчиків, що використовуються в КВМ. Різні підходи до компенсації температурних змін пропонуються в роботах [4], де детально розглянуті методи математичного моделювання температурних змін і адаптації до них параметрів вимірювального обладнання.

Окрему увагу також приділено вивченню впливу механічних деформацій КВМ на точність вимірювання, що детально описано в [5]. В цій роботі були запропоновані методи корекції за допомогою спеціальних алгоритмів, що дозволяють значно знижувати похибки, спричинені деформацією конструкцій машини. Однак, незважаючи на значні досягнення в цьому напрямку, проблема створення комплексної методики компенсації всіх можливих факторів, що впливають на точність вимірювань, залишається актуальною та потребує подальших досліджень.

Значну роль у розвитку методик вимірювань на КВМ відіграють також роботи, які стосуються використання математичних методів для обробки даних вимірювань. У статтях [6], [7] досліджуються підходи до статистичного аналізу вимірювальних даних та оцінки їх точності, а також питання застосування методів машинного навчання

для автоматичної корекції вимірювальних результатів.

Таким чином, наукові дослідження в області точності вимірювань на КВМ прецизійних деталей активно розвиваються, але багато з них зосереджені на окремих аспектах проблеми, в той час як комплексна методика компенсації впливу різних чинників потребує подальшого вивчення.

Формулювання мети статті (постановка завдання)

Метою статті є розробка та представлення комплексної методики вимірювання прецизійних деталей на КВМ, яка враховує різноманітні фактори, що впливають на точність вимірювань. Завдання статті включають:

- аналіз основних чинників, що впливають на точність вимірювань на КВМ, зокрема температурних, механічних деформацій, неточності позиціонування і характеристик сенсорів;
- розробка методики компенсації цих впливів, яка включає етапи підготовки зразків, налаштування параметрів вимірювань та обробки даних;
- оцінка ефективності запропонованої методики за допомогою теоретичних досліджень.

Виклад основного матеріалу

1. Аналіз впливу ключових чинників на точність вимірювань.

Для точного вимірювання прецизійних деталей необхідно враховувати основні джерела похибок:

1.1 Температурні деформації: Температурні зміни впливають на точність КВМ як через деформації елементів самої машини, так і через зміну розмірів вимірюваних деталей. Особливо критичними є температурні градієнти, які створюють нерівномірні деформації [8]. Для аналізу температурних впливів використовується наступна модель (1):

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T, \quad (1)$$

- де ΔL – зміна довжини;
- α – коефіцієнт температурного розширення (для сталі $\alpha \approx 11.7 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$);
- L – номінальна довжина;
- ΔT – зміна температури.

Важливим джерелом похибок є також температура довкілля, яка впливає на оптичні і механічні компоненти КВМ. Для мінімізації цього впливу зазвичай використовують кліматичні камери або температурну компенсацію [9].

1.2 Механічні деформації. Вони виникають через навантаження на конструктивні елементи КВМ [10]. Ці деформації оцінюються за законом Гука (2):

$$\varepsilon = \frac{E}{\sigma}, \quad \Delta L_{\text{щуп}} = \frac{F}{k}, \quad (2) \quad (6)$$

де ε – відносна деформація;

σ – напруження;

E – модуль пружності матеріалу.

де F – сила контакту;

k – жорсткість матеріалу щупа.

– система підвіски: Деформації підвісу вимірювального механізму можуть бути враховані через параметри його динамічного відгуку.

1.3 Механічні деформації конструкцій КВМ. Вони викликані статичними та динамічними навантаженнями. При статичних навантаженнях (власна вага, маса деталі) основну роль відіграють прогини елементів рами і направляючих. Ці прогини моделюються за допомогою рівняння балки [11]:

$$y(x) = \frac{F \cdot x \cdot (L - x)}{2 \cdot E \cdot I}, \quad (3)$$

де $y(x)$ – прогин у точці x ;

F – прикладене навантаження;

L – довжина балки;

E – модуль Юнга матеріалу;

I – момент інерції поперечного перерізу балки.

1.7 Систематичні та випадкові похибки

Загальний вираз для похибок вимірювань можна подати як суму (7):

$$\Delta_{\text{заг}} = \Delta_{\text{темп}} + \Delta_{\text{кінем}} + \Delta_{\text{поз}} + \Delta_{\text{щуп}} + \epsilon, \quad (7)$$

де $\Delta_{\text{темп}}$ – температурні похибки;

$\Delta_{\text{кінем}}$ – кінематичні похибки;

$\Delta_{\text{щуп}}$ – похибки вимірювального щупа;

$\Delta_{\text{поз}}$ – похибка позиціонування;

ϵ – випадкові похибки.

Систематичні похибки можна оцінити та компенсувати за допомогою математичних моделей. Випадкові похибки зменшуються шляхом повторних вимірювань і статистичної обробки даних.

2. Математична модель компенсації похибок.

1.4 Динамічні впливи, такі як вібрації, спричинені роботою приводів або зовнішніми джерелами, також є критичним джерелом похибок [12]. Амплітуда вібрацій описується гармонійною функцією (4):

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t), \quad (4)$$

де A_0 – амплітуда вібрацій;

ω – кругова частота вібрацій.

1.5 Неточність позиціонування:

Системи позиціонування в КВМ забезпечують рухи вимірювального щупа з високою точністю. Проте похибки можуть виникати через нелінійності та люфти у приводах, помилки зворотного зв'язку (датчиків), кінематичні неточності, спричинені зносом направляючих [13]. Похибки в позиціонуванні та відгуках сенсорів можуть бути моделювані як систематичні та випадкові складові (5):

$$\Delta x_i = b_i + \epsilon_i, \quad (5)$$

де b_i – систематична похибка; ϵ_i – випадкова похибка, яку можна моделювати як гаусівський шум із середнім значенням 0 і дисперсією σ^2 .

1.6 Вплив характеристик вимірювального щупа. Щупи, що використовуються у КВМ, можуть мати власні джерела похибок:

– сила контакту: деформація щупа через контакт з поверхнею деталі викликає похибки, які моделюються за законом Гука (6):

Для забезпечення високої точності вимірювань на КВМ розроблено математичну модель компенсації похибок вимірювання прецизійних деталей. Така модель враховує вплив як систематичних, так і випадкових чинників. Випадкові похибки описуються стохастичною складовою ϵ , яка додається до вимірюваного значення (8):

$$y_m = y_{\text{іст}} + \Delta y_{\text{сист}} + \epsilon, \quad (8)$$

де y_m – виміряне значення;

$\Delta y_{\text{сист}}$ – систематична похибка, що підлягає компенсації;

ϵ – випадкова похибка, яку необхідно мінімізувати шляхом статистичного аналізу.

2.1. Загальна модель компенсації.

З урахуванням випадкових похибок скориговане значення записується у вигляді (9):

$$y_{\text{кор}} = y_m - \Delta y_{\text{сист}} - \bar{\epsilon}, \quad (9)$$

де $\bar{\epsilon}$ – оцінка середнього значення випадкової похибки, яка визначається за допомогою математичної обробки результатів вимірювань.

Сумарна систематична похибка $\Delta y_{\text{сист}}$ моделюється як сума впливів різних чинників (10):

$$\Delta y_{\text{сист}} = f_{\text{темп}} + f_{\text{кінем}} + f_{\text{щуп}}. \quad (10)$$

2.2. Модель випадкових похибок. Випадкові похибки моделюються як реалізації нормально розподіленої випадкової величини (11):

$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2), \quad (11)$$

де $E[\epsilon] = 0$ – середнє значення похибки;

σ^2 – дисперсія, яка описує варіативність вимірювань.

Для мінімізації впливу ϵ застосовується згладжування результатів на основі багатократних вимірювань (12):

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i, \quad (12)$$

де n – кількість повторних вимірювань.

2.3. Температурна компенсація

Температурна компенсація враховує нелінійний характер впливу температури та її градієнтів. Для прецизійних деталей застосовується узагальнена модель (13):

$$f_{\text{тем}} = \sum_{i=1}^n \left(\alpha_i T_i + \beta_i T_i^2 + \gamma_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \epsilon_T, \quad (13)$$

де $\epsilon_T \sim N(0, \sigma_T^2)$;

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – коефіцієнти компенсації для i -тої ділянки деталі;

T_i – локальна температура в i -тій зоні;

$\frac{\partial T_i}{\partial x}$ – температурний градієнт вздовж координати x .

Ця модель дозволяє врахувати як глобальні, так і локальні температурні впливи.

2.4. Кінематична компенсація

Врахування випадкових похибок під час руху щупа. Кінематичні похибки залежать від положення щупа (x, y, z) та швидкості його переміщення v (14):

$$f_{\text{кінем}} = \gamma_1 x^2 + \gamma_2 y^2 + \gamma_3 z^2 + \delta_1 v + \delta_2 v^2 + \epsilon_K, \quad (14)$$

де $\epsilon_K \sim N(0, \sigma_K^2)$,

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – коефіцієнти впливу координат;

δ_1, δ_2 – коефіцієнти, що враховують вплив швидкості руху щупа.

Таке представлення дозволяє не лише компенсувати лінійні, але й врахувати нелінійні динамічні ефекти.

2.5. Позиційна компенсація

Для компенсації похибок позиціонування використовується модель кінематичних помилок. Похибка координатного вимірювання x, y, z описується як (15):

$$\begin{cases} \Delta x = f_x(x, y, z) \\ \Delta y = f_y(x, y, z), \\ \Delta z = f_z(x, y, z) \end{cases} \quad (15)$$

де f_x, f_y, f_z – функції, що враховують нелінійності, люфти та інші фактори позиціонування.

Наприклад, для лінійної апроксимації можна записати (16):

$$f_x(x, y, z) = a_x + b_x x + c_x y + d_x z, \quad (16)$$

де a_x, b_x, c_x, d_x – параметри, що визначаються шляхом калібрування.

2.6. Деформація щупа

Щуп КВМ зазнає механічних деформацій через силу контакту та кут контакту. Для компенсації цього впливу застосовується модель (17):

$$f_{\text{щуп}} = \kappa_1 F \cos(\theta) + \kappa_2 F^2 \sin^2(\theta) + \epsilon_S, \quad (17)$$

де: $\epsilon_S \sim N(0, \sigma_S^2)$,

κ_1, κ_2 – коефіцієнти жорсткості щупа,

F – сила контакту,

θ – кут контакту.

Ця модель дозволяє враховувати складні деформаційні ефекти під час вимірювання деталей із різними характеристиками поверхонь.

2.7. Оцінка параметрів моделі

Загальна функція похибок для компенсації враховує всі джерела похибок, у тому числі випадкові (18):

$$S = \sum_{i=1}^n (y_m^i - y_{\text{кор}}^i)^2 + \lambda \sum_j \sigma_j^2, \quad (18)$$

де λ – коефіцієнт штрафу для регуляризації моделі;

σ_j^2 – дисперсія випадкових похибок для кожного джерела.

Метод мінімізації цієї функції дозволяє одночасно оцінити як систематичні параметри ($\alpha, \beta, \gamma, \kappa$), так і дисперсії випадкових похибок ($\sigma_T^2, \sigma_K^2, \sigma_S^2$).

2.8. Реалізація компенсації

Після розрахунків систематичних та випадкових похибок компенсація проводиться в реальному часі за алгоритмом:

1. Збір даних про впливи.
2. Моделювання випадкових похибок за допомогою оцінки їх дисперсії.
3. Розрахунок корекційних значень $\Delta \mathcal{U}_{\text{комп}}$.
4. Застосування компенсації з урахуванням скоригованих випадкових складових $\bar{\epsilon}$.

Ця модель не тільки мінімізує систематичні похибки, а й знижує вплив випадкових відхилень, забезпечуючи високу точність вимірювань на КВМ.

3. Етапи реалізації методики

Реалізація методики компенсації похибок під час вимірювання прецизійних деталей на КВМ включає кілька послідовних етапів. Вони спрямовані на мінімізацію впливу як систематичних, так і випадкових похибок шляхом застосування математичних моделей, корекції умов вимірювання та обробки отриманих даних.

3.1. Підготовка до вимірювання

3.1.1. Калібрування КВМ:

– виконується первинне калібрування системи для перевірки точності вимірювального обладнання;

– перевіряються такі параметри, як правильність позиціонування щупа, геометрична стабільність вимірювальних осей та наявність початкових відхилень.

3.1.2. Контроль умов вимірювання:

– вимірювання проводяться у контрольованих температурних умовах, щоб зменшити вплив термічних деформацій;

– фіксується початкова температура T_0 , яка буде використана у компенсаційних обчисленнях.

3.1.3. Підготовка зразка:

– прецизійна деталь очищується від забруднень та закріплюється на фіксуючій платформі, щоб уникнути механічних зсувів під час вимірювань.

3.2. Збір даних та проведення вимірювань

3.2.1. Зняття початкових значень:

– виконується серія вимірювань контрольних точок деталі для збору первинних даних.

– кожне виміряне значення u_m фіксується разом із параметрами умов вимірювання (температура, швидкість щупа тощо).

3.2.2. Багатократні вимірювання:

Для кожної точки виконується n -кратне вимірювання з метою обчислення середнього значення \bar{u}_m та дисперсії випадкових похибок σ^2 .

3.3. Математична обробка даних

3.3.1. Розрахунок систематичних похибок:

– на основі математичних моделей (температурних, кінематичних, деформацій щупа) обчислюються значення систематичних похибок $\Delta u_{\text{сист}}$ для кожного вимірювання, де кожна функція обчислюється за заданими параметрами.

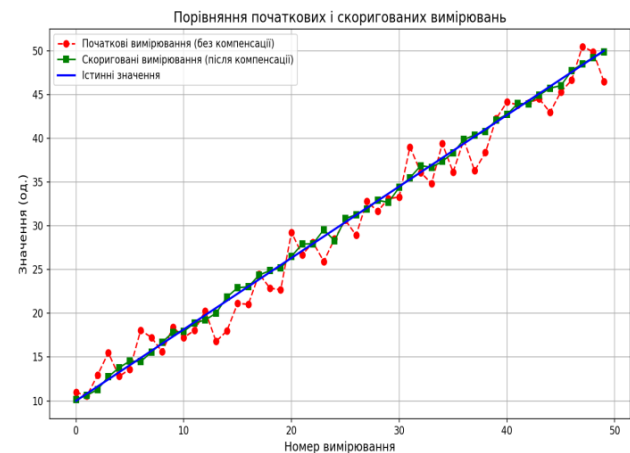
3.3.2. Компенсація випадкових похибок.

Виконується статистичний аналіз випадкових похибок ϵ для кожної контрольної точки. Середнє значення похибки використовується для корекції результатів.

3.3.3. Корекція вимірювань. Скориговане значення для кожної контрольної точки.

3.3.4. Аналіз точності. Проводиться оцінка загальної точності методики шляхом визначення стандартного відхилення похибок. Потім виконується багатократне повторення вимірювань для перевірки стабільності компенсації похибок за різних умов.

4. Візуальне представлення порівняння вимірювання прецизійних деталей з використанням методики і без показано на рисунку 1.



Рисунку 1 – Порівняння початкових вимірювань (без компенсації) та скоригованих значень (після компенсації)

На рисунку наведено порівняння початкових вимірювань (без компенсації), скоригованих вимірювань (після компенсації), та істинних значень. Видно, що після застосування методики компенсації вимірювання стають ближчими до істинних значень, що підтверджує її ефективність.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Розроблено методику вимірювання прецизійних деталей на КВМ, яка компенсує систематичні та випадкові похибки. Аналіз ключових чинників та розробка математичної моделі дозволили підвищити точність вимірювань, мінімізувати вплив зовнішніх факторів і автоматизувати обробку результатів. Практичне впровадження методики сприяє покращенню контролю якості деталей у виробництві.

Перспективи подальших досліджень:

Розробка моделей для нелінійних та динамічних похибок, інтеграція штучного інтелекту для аналізу даних та прогнозування похибок. Ці напрями сприятимуть подальшому вдосконаленню вимірювальних технологій та підвищенню якості продукції.

Список використаних джерел

1. Angelova, D., & Gochkov, G. (2020). Analysis of Measurement Uncertainty in CMM Metrology. *Measurement*, 154, 107454.
2. Carmignato, S. and Dewulf, W. (2018). *Industrial X-ray Computed Tomography*. Springer.
3. De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J. P., Schmitt, R., & Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 63(2), 655-677.
4. Zhang, G., Xu, Y., Li, X., & Zhou, Z. (2021). Error modeling and compensation techniques for CMMs: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 206-218.
5. Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., & Kunzmann, H. (2002). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *CIRP Annals*, 51(2), 685-699.
6. Nielsen, J. and Hansen, S. (2020). Efficient compensation algorithms for coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 65, 251-258.
7. Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., & McMurtry, D. (2004). Probing systems in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 53(2), 657-684.
8. Forbes, A. B. (1989). Least squares best-fit geometric elements. National Physical Laboratory (NPL) Report.
9. Flack, D. The Measurement of Coordinate Measuring Machines. National Physical Laboratory (NPL) Good Practice Guide No. 41, 2011.
10. Choi, S., & Kim, J. Machine learning methods for error compensation in precision measurements. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(1), 012001.
11. ISO/TS 15530-3:2011. Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement — Part 3: Use of calibrated workpieces or standards. International Organization for Standardization, 2011.
12. Verma, R., & Kumar, P. Review on thermal error compensation techniques in CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 100, 24-36.
13. Bell, S. A beginner's guide to uncertainty of measurement. National Physical Laboratory (NPL) Report, 2001.

References

1. Angelova, D. and Gochkov, G. (2020). Analysis of measurement uncertainty in CMM metrology. *Measurement*, 154, 107454.
2. Carmignato, S. and Dewulf, W. (2018). *Industrial X-ray Computed Tomography*. Springer.
3. De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J. P., Schmitt, R., and Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 63(2), pp. 655-677.
4. Zhang, G., Xu, Y., Li, X., and Zhou, Z. (2021). Error modeling and compensation techniques for CMMs: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, pp. 206-218.
5. Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., and Kunzmann, H. (2002). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *CIRP Annals*, 51(2), 685-699.
6. Nielsen, J. and Hansen, S. (2020). Efficient compensation algorithms for coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 65, 251-258.
7. Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., and McMurtry, D. (2004). Probing systems in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 53(2), 657-684.
8. Forbes, A. B. (1989). Least squares best-fit geometric elements. National Physical Laboratory (NPL) Report.
9. Flack, D. (2011). *The Measurement of Coordinate Measuring Machines*. National Physical Laboratory (NPL) Good Practice Guide No. 41.
10. Choi, S. and Kim, J. (2022). Machine learning methods for error compensation in precision measurements. *Measurement Science and Technology*, 33(1), 012001.
11. ISO/TS 15530-3 (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement — Part 3: Use of calibrated workpieces or standards*. International Organization for Standardization.
12. Verma, R. and Kumar, P. (2020). Review on thermal error compensation techniques in CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 100, 24-36.
13. Bell, S. (2001). *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. National Physical Laboratory (NPL) Report.

Надійшла до редакції 21.10.2024