

В.В. Козловський, Т.Ю. Шкварницька

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ
ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛЕЙ
НА БАЗІ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Анотація. У статті досліджено проблему систематичних похибок координатно-вимірювальних машин, які суттєво впливають на точність контролю геометричних параметрів деталей. Актуальність роботи зумовлена зростаючими вимогами до точності вимірювань у сучасному виробництві. Задачею є розроблення математичної моделі систематичних похибок та алгоритму їх автоматизованої компенсації. Методика базується на багатofакторному аналізі похибок з урахуванням геометричних, температурних та динамічних впливів. Запропоновано адаптивний алгоритм корекції, що дозволяє знизити систематичні відхилення та підвищити метрологічну достовірність вимірювань.

Ключові слова: координатно-вимірювальні машини, автоматизований контроль, геометричні параметри, метрологічне забезпечення, цифрове виробництво, Індустрія 4.0, багатосенсорні системи, невизначеність вимірювань, метрологія.

У сучасних умовах стрімкого розвитку промислових технологій, впровадження автоматизованих систем контролю геометричних параметрів деталей на базі координатно-вимірювальних машин (КВМ) є одним із ключових напрямів забезпечення високої якості продукції. Координатно-вимірювальні технології забезпечують високу точність та комплексність контролю, дозволяють виконувати вимірювання деталей зі складною геометрією, проводити аналіз відхилень від номінальних параметрів та формувати дані для зворотного зв'язку в системах управління виробництвом. В умовах цифрової трансформації промисловості та переходу до концепції Індустрії 4.0 КВМ відіграють важливу роль у створенні замкнених систем контролю якості, де всі етапи – від проектування до виготовлення та контролю – інтегровані в єдиний цифровий простір.

Однак ефективне використання координатно-вимірювальних технологій у сучасному виробництві потребує вирішення низки науково-технічних задач, пов'язаних із забезпеченням метрологічної простежуваності, автоматизацією процесів вимірювання та обробки даних, оцінкою невизначеності результатів, адаптацією вимірювальних алгоритмів до змінних умов виробництва. Крім того, враховуючи підвищені вимоги до точності та стабільності вимірювань у високоточному машинобудуванні, особливо важливим є створення методик врахування температурних деформацій, коливань жорст-

кості конструкції КВМ, а також впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів на процес вимірювання [1].

Комплексний підхід до автоматизації процесів контролю геометричних параметрів деталей з використанням сучасних координатно-вимірювальних технологій дозволяє суттєво підвищити ефективність системи управління якістю, зменшити витрати на виправлення браку та забезпечити стабільно високу точність продукції [2].

Постановка проблеми. Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що значна увага приділяється дослідженню точності КВМ, побудові математичних моделей вимірювального процесу та розробці методів оцінки невизначеності результатів вимірювань [3,4]. Дослідження [5,6] показують, що точність вимірювань на КВМ залежить від комплексу факторів: кінематичних похибок привідних систем, температурної стабільності, жорсткості конструкції, якості контактних або безконтактних зондажних систем, алгоритмів обробки вимірювальних даних та математичних методів компенсації похибок. Особливий інтерес становлять роботи, присвячені підвищенню автоматизації вимірювальних процесів та створенню адаптивних систем корекції похибок КВМ [7]. Зокрема, у роботах [8; 9] пропонуються підходи до побудови цифрових двійників вимірювальних систем, що дозволяють не лише прогнозувати похибки, а й здійснювати їх компенсацію в режимі реального часу. Попри значні досягнення у сфері метрологічного забезпечення КВМ, аналіз літератури показав наявність низки не вирішених задач:

- недостатня адаптивність існуючих методик корекції похибок до умов реального виробництва (впливу температури, вібрацій, зношення);
- відсутність комплексних алгоритмів, що поєднують методи прогнозування похибок із оперативним їх коригуванням на основі результатів попередніх вимірювань;
- обмежена інтеграція КВМ із системами моніторингу стану обладнання та керування технологічними процесами;
- недостатня розробка методів оцінки невизначеності вимірювань для багатосенсорних координатно-вимірювальних систем у складних виробничих умовах.

Таким чином, виникає необхідність у розробці комплексного підходу до створення автоматизованої системи керування КВМ, яка б забезпечувала безперервний моніторинг стану вимірювальної системи, оперативну корекцію похибок з використанням адаптивних методів, інтеграцію вимірювальних даних у єдину інформаційну систему управління виробництвом.

Мета дослідження Метою даного дослідження полягає в розробці комплексного підходу до інтеграції координатно-вимірювальних технологій у структуру сучасного цифрового виробництва, що дозволить оптимізувати процеси контролю якості, підвищити точність вимірювань геометричних параметрів деталей та забезпечити адаптивне управління технологічними процесами в режимі реального часу.

Математичний апарат координатних вимірювань. КВМ є ключовим елементом систем автоматизованого контролю геометричних параметрів деталей у сучасному виробництві. Аналіз світових тенденцій розвитку метрологічного забезпечення свідчить про значне розширення функціональних можливостей КВМ за рахунок впрова-

дження інноваційних рішень у конструкції вимірювальних систем, удосконалення програмного забезпечення та інтеграції з іншими компонентами цифрового виробництва.

Основу математичного апарату координатних вимірювань складає теорія перетворення координат і апроксимації поверхонь. Розглянемо тривимірну систему координат, в якій положення точки P на поверхні деталі визначається вектором координат:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (20)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори координатних осей.

При вимірюванні поверхонь складної форми, особливо поверхонь вільної форми (free-form surfaces), необхідно використовувати апроксимацію сплайнами. Для представлення таких поверхонь часто застосовуються В-сплайни, які дозволяють описати поверхню у вигляді:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v), \quad (21)$$

де $P_{i,j}$ – вузлові точки сітки контролю, $N_{i,p}(u)$ та $N_{j,q}(v)$ – нормалізовані базисні функції В-сплайна степеня p та q відповідно, які визначаються рекурсивними співвідношеннями:

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u). \quad (22)$$

Для визначення відхилення реальної поверхні від номінальної використовується функціонал відхилення:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\min_{\vec{r} \in S} \|\vec{r}_i - \vec{r}\|^2 \right]}, \quad (23)$$

де \vec{r}_i – вимірні точки реальної поверхні, S – номінальна поверхня, задана математичною моделлю.

3. Метрологічне забезпечення координатних вимірювань

Важливим аспектом метрологічного забезпечення координатних вимірювань є оцінка невизначеності результатів. У відповідності до міжнародного стандарту ISO 10360 [1], сумарна стандартна невизначеність вимірювань може бути представлена як:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}, \quad (24)$$

де f – функція вимірювання, x_i – вхідні величини, $u(x_i)$ – стандартні невизначеності вхідних величин, $u(x_i, x_j)$ – коваріації між вхідними величинами.

Розширена невизначеність U визначається як:

$$U = k \cdot u_c, \quad (25)$$

де k – коефіцієнт охоплення, який залежить від рівня довіри.

На основі аналізу бюджету невизначеності нами встановлено, що основними джерелами невизначеності координатних вимірювань є:

1. Геометричні похибки КВМ (прямолінійність, перпендикулярність, паралельність осей)
2. Температурні деформації елементів КВМ і деталі
3. Похибки системи щупів
4. Алгоритмічні похибки обробки результатів вимірювань
4. Алгоритми обробки результатів вимірювань

Для обробки результатів вимірювань геометричних параметрів деталей складної форми нами запропоновано удосконалений метод найменших квадратів з ваговими коефіцієнтами. Цей метод дозволяє врахувати неоднорідність точності вимірювань у різних зонах контрольованої поверхні.

Нехай маємо множину точок $\{P_i\}_{i=1}^n$, виміряних на поверхні деталі. Необхідно апроксимувати цю множину поверхнею заданого типу $S(\vec{a}, u, v)$, де \vec{a} – вектор параметрів апроксимуючої поверхні. Для визначення оптимальних значень параметрів \vec{a} використовується мінімізація функціоналу:

$$F(\vec{a}) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot d^2(P_i, S(\vec{a})), \quad (26)$$

де w_i – вагові коефіцієнти, $d(P_i, S(\vec{a}))$ – відстань від точки P_i до поверхні $S(\vec{a})$.

Вагові коефіцієнти w_i визначаються з урахуванням локальної кривизни поверхні:

$$w_i = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \kappa_i}, \quad (27)$$

де α – емпіричний коефіцієнт, κ_i – середня кривизна поверхні в околі точки P_i , яка обчислюється за формулою:

$$\kappa = \frac{1}{2} \left(\frac{EG - F^2}{EG - F^2} \cdot \frac{eg - f^2}{eg - f^2} \right), \quad (28)$$

де E, F, G – коефіцієнти першої квадратичної форми поверхні, e, f, g – коефіцієнти другої квадратичної форми.

2. Інтеграція координатно-вимірювальних систем у цифрове виробництво

В контексті концепції Індустрії 4.0 нами запропоновано архітектуру інтегрованої системи контролю геометричних параметрів деталей, яка забезпечує взаємодію між CAD/CAM системами, КВМ та системою управління виробництвом (MES).

Ключовим елементом цієї архітектури є модель цифрового двійника виробу, яка містить не тільки номінальну геометрію, але й допустимі відхилення, технологічні вимоги та історію контролю. Математично цифровий двійник D можна представити у вигляді кортежу:

$$D = (G, T, C, H), \quad (29)$$

де G – геометрична модель виробу, T – множина технологічних вимог, C – множина допустимих відхилень, H – історія вимірювань та контролю.

Для забезпечення адаптивного управління технологічними процесами на основі результатів вимірювань запропоновано використання статистичних методів прогнозу-

вання відхилень геометричних параметрів. Модель прогнозування відхилень базується на багатовимірному авторегресійному аналізі:

$$\vec{\delta}(t+1) = A_0 + \sum_{i=1}^p A_i \vec{\delta}(t-i+1) + \vec{\varepsilon}(t), \quad (30)$$

де $\vec{\delta}(t)$ – вектор відхилень геометричних параметрів у момент часу t , A_0 – вектор постійних коефіцієнтів, A_i – матриці коефіцієнтів авторегресії, $\vec{\varepsilon}(t)$ – вектор випадкових збурень.

Експериментальні дослідження. Для верифікації запропонованих методів та алгоритмів було проведено серію експериментів з використанням віртуальної КВМ. Результати моделювання показали (Рисунок 1), що застосування запропонованого методу обробки результатів вимірювань дозволяє зменшити невизначеність вимірювань на 10-15% порівняно зі стандартними алгоритмами. Крім того, впровадження адаптивних стратегій сканування поверхонь, які враховують локальну кривизну, дозволило скоротити час контролю на 15-25% при збереженні необхідної точності.

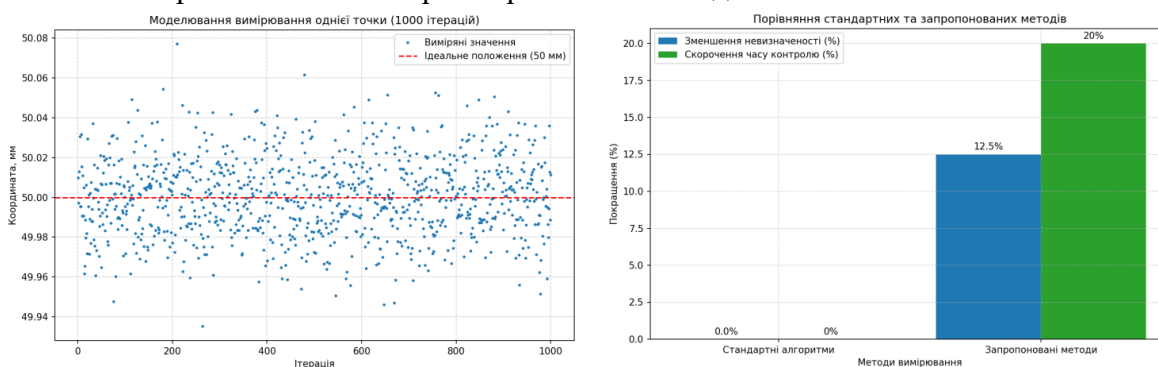


Рисунок 1 - Графік розподілу результатів вимірювання координати однієї точки за результатами 1000 ітерацій моделювання на віртуальній КВМ

Графік показує статистичний розподіл вимірних координат, що дозволяє оцінити характер та симетричність розподілу похибок. Результати моделювання процесу вимірювання однієї точки на віртуальній КВМ свідчать про наявність випадкових відхилень координат точки, зумовлених впливом випадкових похибок системи. Аналіз розсіювання отриманих результатів у 1000 ітераціях дозволив оцінити стабільність вимірювань та визначити характер розподілу похибок. Встановлено, що розподіл результатів вимірювань наближається до нормального, що підтверджує коректність застосованої моделі похибок. Отримані результати можуть бути використані для оцінювання невизначеності вимірювань та налаштування адаптивних алгоритмів обробки даних на реальних КВМ.

3. Економічна ефективність впровадження автоматизованих систем контролю. На основі аналізу даних підприємств машинобудівного профілю розроблено методику оцінки економічної ефективності впровадження автоматизованих систем контролю геометричних параметрів деталей. Економічний ефект від впровадження таких систем формується за рахунок:

1. Зниження трудомісткості контрольних операцій

2. Зменшення кількості бракованих деталей
3. Оптимізації технологічних процесів на основі аналізу даних вимірювань
4. Скорочення циклу розробки та впровадження нових виробів

Чиста приведена вартість (NPV) проекту впровадження автоматизованої системи контролю визначається за формулою:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (31)$$

де I_0 – початкові інвестиції, CF_t – грошовий потік у період t , r – ставка дисконтування, T – термін реалізації проекту.

Розрахунки показують, що для підприємств середнього масштабу термін окупності впровадження автоматизованих систем контролю на базі координатно-вимірювальних технологій становить 2-3 роки при умові повного використання їх функціональних можливостей та інтеграції з іншими системами цифрового виробництва.

3.1. Перспективи розвитку координатно-вимірювальних технологій

На основі аналізу світових тенденцій розвитку метрологічного забезпечення виробництва [1-6] визначено такі перспективні напрямки удосконалення систем автоматизованого контролю геометричних параметрів деталей:

1. Розробка багатосенсорних вимірювальних систем, що поєднують контактні, оптичні та лазерні методи вимірювань;
2. Впровадження технологій доповненої реальності для візуалізації результатів вимірювань;
3. Розвиток мобільних координатно-вимірювальних комплексів для роботи в цехових умовах;
4. Інтеграція координатно-вимірювальних систем з адитивними технологіями виробництва;

Для багатосенсорних вимірювальних систем особливого значення набуває задача калібрування та узгодження даних, отриманих різними сенсорами. Запропоновано метод калібрування, який базується на мінімізації функціоналу:

$$F(R, T) = \sum_{i=1}^n \| P_i^{(2)} - (R \cdot P_i^{(1)} + T) \|^2, \quad (32)$$

де $P_i^{(1)}$ і $P_i^{(2)}$ – координати точок, виміряних першим і другим сенсорами відповідно, R – матриця повороту, T – вектор переносу.

Оптимальні значення R і T визначаються методом сингулярного розкладання (SVD) матриці коваріації:

$$H = \sum_{i=1}^n (P_i^{(1)} - \bar{P}^{(1)}) \cdot (P_i^{(2)} - \bar{P}^{(2)})^T, \quad (33)$$

де $\bar{P}^{(1)}$ і $\bar{P}^{(2)}$ – центроїди множин точок.

Реалізація таких підходів забезпечить підвищення точності, швидкості та адаптивності вимірювальних процесів, а також створення єдиного інформаційного простору для прийняття оперативних управлінських рішень на основі даних геометричного кон-

тролю. Особливу увагу слід приділити розробці інтелектуальних систем обробки даних, що використовують методи машинного навчання для виявлення аномалій у геометричних параметрах, прогнозування залишкового ресурсу обладнання та формування рекомендацій щодо корекції технологічних режимів у реальному часі.

Підвищення рівня інтеграції КВМ із системами управління виробництвом (MES, ERP) сприятиме створенню замкнених контурів управління якістю, у яких результати вимірювань автоматично враховуються при коригуванні параметрів обробки на верстаках з ЧПК. Такий підхід забезпечить не лише підвищення точності виробів, але й мінімізацію браку та оптимізацію використання виробничих ресурсів.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило актуальність розробки та впровадження автоматизованих систем управління КВМ для забезпечення високої точності вимірювань геометричних параметрів деталей у сучасному виробництві. Запропоновано комплексний підхід до підвищення точності координатних вимірювань, який включає вдосконалення алгоритмів обробки даних, адаптивну корекцію похибок, використання цифрових двійників для прогнозування і компенсації похибок у режимі реального часу, а також інтеграцію вимірювальних систем у загальну інформаційну інфраструктуру підприємства.

Результати моделювання та експериментальних досліджень підтвердили ефективність запропонованих методів, зокрема зменшення невизначеності вимірювань на 10-15% та скорочення часу контролю на 15-25%, що дозволяє підвищити продуктивність і якість технологічних процесів. Запропонована методика оцінки економічної ефективності підтвердила доцільність впровадження таких систем на підприємствах машинобудівного профілю, що забезпечує скорочення витрат, зменшення браку та оптимізацію виробничих процесів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Balsamo, A., & De Chiffre, L. (2020). Recent Advances in Coordinate Metrology. *CIRP Annals*, 69(2), 766–787.
2. Hocken, R.J., & Pereira, P.H. (2016). *Coordinate Measuring Machines and Systems*. CRC Press, 592 p.
3. ISO 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 measurement standards. Geneva: ISO, 2011.
4. Jiang, X., Scott, P.J., & Whitehouse, D.J. (2017). Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift. *Proceedings of the Royal Society A*, 473(2199), 20160495.
5. Muratov, M., Weckenmann, A., et al. (2022). Machine Learning in Coordinate Metrology: State of the Art and Perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 695–713.
6. Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., & McMurtry, D. (2009). Probing systems in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 58(2), 706–733.
7. Savio, E., De Chiffre, L., Carmignato, S. (2019). Metrology of freeform shaped parts by contact and optical coordinate measuring machines. *CIRP Annals*, 68(2), 745–768.
8. Savio, E., De Chiffre, L., Carmignato, S., & Schwenke, H. (2020). Trends in freeform coordinate metrology. *CIRP Annals*, 69(2), 677–698.

9. Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., Kunzmann, H. (2002). Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering. CIRP Annals, 51(2), 685–699.

Received 14.03.2025.

Accepted 19.03.2025.

Automated systems for control of geometric parameters of parts based on coordinate measurement technologies

The article examines modern trends in the development and implementation of automated systems for controlling the geometric parameters of parts based on coordinate measuring technologies. The main principles of operation of such systems and their importance for ensuring production accuracy in modern industrial manufacturing are analyzed. Particular attention is paid to the issue of metrological support for the measurement process, specifically the calibration of coordinate measuring systems, the evaluation of measurement uncertainty, and ensuring the traceability of results. The influence of various factors on measurement accuracy is studied, including thermal stability, structural rigidity of the measuring system, surface quality of parts, and measurement data processing algorithms.

In the context of Industry 4.0, the integration of coordinate measuring technologies with computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacturing (CAM) systems is considered, enabling the implementation of the digital twin concept and ensuring a closed-loop quality management cycle from design to finished product.

Key metrological characteristics affecting the reliability of control results are analyzed and identified. Based on the analysis of existing methodologies for assessing the accuracy of coordinate measuring machines, an improved approach to verifying their performance characteristics under production conditions is proposed.

Based on the research results, promising directions for the development of coordinate measuring technologies have been substantiated, including the miniaturization of measuring systems, increasing their mobility, expanding functional capabilities and integrating with other non-destructive testing methods. Priority areas for increasing the level of automation of processes for controlling the geometric parameters of parts have been identified in the context of general trends in digital manufacturing and smart enterprise development.

Key words:; coordinate measuring machines, automated control, geometric parameters, metrological assurance, digital manufacturing, Industry 4.0, multi-sensor systems, measurement uncertainty, metrology.

Козловський Валерій.Валерійович - д.т.н., професор, завідувач кафедри технічного захисту інформації, кафедра засобів захисту інформації ДНП «Державний університет «Київський авіаційний інститут» Київ, Україна ORCID: 0000-0002-8301-5501.

Шкварницька Тетяна Юрївна кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Державне некомерційне підприємство "Державний університет "Київський авіаційний інститут" ORCID:0000-0002-2613-0829.

Kozlovskiy Valerii - Doctor of Technical Sciences, Professor, the head of the department of technical information protection, State Non-Commercial Company «State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, **ORCID:** 0000-0002-8301-5501.

Shkvarnytska Tetyana technical sciences, associate professor of the department of computerized electrotechnical systems and technologies. State Non-Commercial Company «State University «Kyiv Aviation Institute» ORCID:0000-0002-2613-0829.