Міністерство освіти і науки України

Державне некомерційне підприємство «ДУ «Київський авіаційний інститут»

Кваліфікаційна наукова Праця на правах рукопису

ЧАЛИЙ ОЛЕГ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 531.7:62-189.2:006.91(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЮ МАШИНОЮ

152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,

результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

___О.В.Чалий

Науковий керівник Квасніков Володимир Павлович, Заслужений метролог України, доктор технічних наук, професор

Київ-2025

Анотація

Чалий О.В. Автоматизована система керування координатновимірювальною машиною. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня РНD за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – ДНП «ДУ «Київський авіаційний інститут, Київ». – 2025.

У дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше розроблено метод координатних вимірювань високоточних деталей, який базується на новій стратегії вимірювання та математичній моделі взаємозв'язку координат вимірюваних точок з лінійно-кутовими параметрами. На відміну від існуючих методів, запропонований підхід дозволяє підвищити точність вимірювання в 1.5-2 рази за рахунок оптимізації траєкторії вимірювання та компенсації систематичних похибок.

2. Вперше створено математичну модель оцінки похибок вимірювання на КВМ, яка враховує вплив геометричних, кінематичних та температурних факторів. Модель дозволяє прогнозувати та компенсувати похибки вимірювання в реальному часі, що забезпечує підвищення точності вимірювання на 25-30% порівняно з традиційними методами.

3. Розроблено новий підхід до автоматичної корекції похибок вимірювання, який базується на адаптивному алгоритмі обробки даних з датчика КВМ. Це дозволило зменшити випадкові похибки вимірювання на 35-40% та підвищити стабільність роботи системи в умовах дії дестабілізуючих факторів.

4. Вдосконалено методику оптимізації метрологічних характеристик КВМ шляхом комплексного врахування параметрів чутливості датчика та характеристик вимірюваної поверхні. Це забезпечило підвищення точності вимірювання складних просторових поверхонь на 20-25%.

5. Створено новий моделюючий комплекс для визначення метрологічних характеристик КВМ, який дозволяє проводити віртуальні

випробування системи та оптимізувати параметри вимірювання без виконання фізичних експериментів. Застосування комплексу скорочує час налаштування системи на 40-50%.

6. Запропоновано методику використання та налаштування програмного забезпечення PC-DMIS CAD для автоматизованої обробки результатів вимірювань, що забезпечує ефективну інтеграцію з системами автоматизованого проєктування та виробництва (САПР). Оптимізовано параметри та процедури роботи з програмним комплексом для підвищення точності та швидкодії вимірювань.

У дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

1. Розроблено метод підвищення достовірності вимірювання на КВМ високоточних деталей, що включають алгоритми оптимізації траєкторії вимірювання та метод компенсації систематичних та випадкових похибок, способи мінімізації впливу зовнішніх факторів, процедури калібрування та налаштування КВМ, рекомендації щодо вибору режимів вимірювання, Це дозволило підвищити точність та швидкодію координатних вимірювань на 15-25%.

2. Вперше розроблено метод визначення комплексної похибки вимірювання геометричних параметрів деталей на автоматизованій системі КВМ, що враховує похибки при роботі механічної системи вимірювальної головки, температурні деформації, вібраційні впливи, базування деталей. Це дозволило забезпечити точність вимірювання високоточних деталей у межах 2-3 мкм.

3. Розроблено новий метод автоматизованого вимірювання на КВМ, що включає алгоритми автоматичного розпізнавання геометричних елементів, метод оптимізації кількості вимірюваних точок, способи адаптивного контролю швидкості вимірювання, процедури автоматичної обробки результатів, формування протоколів вимірювання. Це забезпечило підвищення продуктивності вимірювань на 12-15%. 4. Подальший розвиток отримав метод оптимального налаштування КВМ, вибору режимів вимірювання, технічного обслуговування системи, навчання операторів, забезпечення метрологічної простежуваності. Це забезпечило стабільну роботу КВМ в виробничих умовах.

Теоретичні здобутки впроваджено та практичні роботи на підприємстві ТОВ "Араміс" м. Черкаси акт від 16 січня 2025р. та у навчальний процес в ДНП ДУ київський авіаційний інститут на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних технологій: систем та використовуються у курсах лекцій та лабораторних роботах з дисципліни «Основи метрології, електричні вимірювання та прилади», та при викладанні курсів «Методологія прикладних досліджень» та у дипломному та курсовому проектуванні, що підтверджується актом від 23січня 2025р.

У вступі розкрито актуальність теми дослідження, яка полягає у зростаючій потребі високоточних вимірювань для забезпечення якості та конкурентоспроможності продукції в машинобудуванні, авіабудуванні, аерокосмічній промисловості та інших галузях. Представлено зв'язок роботи з розвитком інформаційно-вимірювальної техніки, сформульовано основну наукову задачу, яка полягає у розробці методів, математичних моделей, методик та технічної реалізації автоматизованих систем керування КВМ. Висвітлено проблеми точності, похибок вимірювань, калібрування та верифікації, а також необхідність створення сучасних КВМ, здатних інтегруватися із системами автоматизованого проєктування та виробництва. Акцент зроблено на науковій новизні та практичній значущості отриманих ефективності виробництва результатів підвищення ДЛЯ та конкурентоспроможності вітчизняної авіаційній промисловості.

В першому розділі проведено аналітичний огляд методів, засобів та способів вимірювання геометричних параметрів високоточних деталей на КВМ. Виконано класифікацію сучасних методів контролю геометричних параметрів деталей, а також проведено якісний аналіз дестабілізуючих факторів, що впливають на точність вимірювань. Доведено актуальність

наукової задачі, яка полягає у розробці автоматизованих систем керування КВМ з підвищеними метрологічними характеристиками, що є важливим для промисловості, зокрема в авіабудуванні та аерокосмічній галузі.

В другому розділі розглянуто теоретичні засади методів вимірювання геометричних параметрів високоточних деталей на КВМ та проаналізовано способи підвищення їх точності.

Розроблено метод координатних вимірювань, який включає стратегію вимірювання складних просторових поверхонь і розрахункову модель, що математично описує взаємозв'язок координат вимірюваних точок із визначеними параметрами. Проаналізовано методи математичного моделювання процесів вимірювання геометричних параметрів деталей, що дозволяють підвищити точність та проводити моделювання похибок для оптимізації метрологічних характеристик.

Запропоновано методику підвищення достовірності вимірювань за рахунок врахування характеристик точності використовуваних методів та похибок вимірювального обладнання. Представлено математичні моделі для розрахунку геометричних параметрів деталей, зокрема із складною поверхнею, а також запропоновано структурну схему інформаційновимірювального моделюючого комплексу для автоматизованих вимірювань.

Особлива увага приділена розробці методів, які забезпечують ефективне вимірювання складних просторових поверхонь, враховуючи особливості геометрії деталей та вплив дестабілізуючих факторів на процес вимірювання.

В третьому розділі проведено аналіз похибок вимірювань складних просторових поверхонь високоточних деталей на КВМ. Розглянуто математичні моделі похибок вимірювань, які враховують вплив геометричних, кінематичних, температурних і випадкових факторів на результати вимірювань. Виконано класифікацію основних складових похибок та запропоновано методику їхнього кількісного оцінювання.

Досліджено методи виявлення аномальних відхилень у координатних вимірюваннях, які базуються на аналізі статистичних характеристик вимірювальних даних. Проведено порівняльний аналіз ефективності існуючих підходів до виявлення таких відхилень у процесі вимірювання складних поверхонь.

Розроблено метод автоматичної корекції похибок вимірювань, що використанні базується на математичних моделей, які описують взаємозв'язок між джерелами похибок та отриманими координатними Запропонований підхід суттєво даними. дозволяє зменшити вплив систематичних та випадкових похибок на кінцевий результат вимірювань.

Описано підходи до оптимізації метрологічних характеристик КВМ під час вимірювання складних геометричних форм. Визначено ключові параметри, що впливають на точність вимірювання, та розроблено рекомендації щодо їх оптимізації.

Запропоновано модель процесу вимірювань, яка враховує особливості складних просторових поверхонь та дозволяє з високою точністю виконувати оцінку метрологічних характеристик. Такий підхід сприяє підвищенню достовірності результатів вимірювань і дозволяє використовувати КВМ для контролю якості високоточних деталей у різних галузях промисловості.

В четвертому розділі проведено експериментальні дослідження розробленої автоматизованої системи вимірювання високоточних деталей на КВМ. Виконано аналіз результатів експериментальних вимірювань, який підтвердив підвищення точності та швидкодії процесу вимірювання складних просторових поверхонь.

Розглянуто розрахунок похибок інформаційно-вимірювального комплексу автоматизованої системи вимірювання деталей, проведено їх кількісний аналіз та визначено основні джерела похибок. Проведено метрологічне забезпечення вимірювального каналу системи, що дозволило підтвердити відповідність її метрологічних характеристик сучасним вимогам. Розроблено методику підвищення точності вимірювання геометричних параметрів складних деталей шляхом врахування дестабілізуючих факторів та застосування методів дисперсійного аналізу. Представлено шляхи вдосконалення алгоритмів корекції похибок на основі експериментальних даних та математичного моделювання.

Використано та адаптовано програмне забезпечення PC-DMIS CAD для автоматизованої обробки результатів вимірювань, що забезпечує ефективну інтеграцію з САПР. Розроблено додаткові модулі та алгоритми для оптимізації процесу обробки даних з урахуванням специфіки вимірюваних деталей.

Представлені результати доводять ефективність впровадженої автоматизованої системи для вимірювання геометричних параметрів деталей із складною геометрією, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної продукції на ринку високотехнологічної техніки.

В загальних висновках підсумовано основні результати досліджень, проведених у роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих у процесі розробки автоматизованої системи вимірювання високоточних деталей на КВМ. Результати досліджень підтвердили актуальність і ефективність запропонованих методів та підходів до підвищення точності та швидкодії вимірювань складних просторових поверхонь.

Ключові слова: автоматизована система керування, координатновимірювальна машина, вимірювання високоточних деталей, метрологічні характеристики, похибки вимірювань, автоматична корекція похибок, математична модель, точність вимірювань, системи автоматизованого проектування, промислова метрологія, автоматизація вимірювань.

Список основних публікацій здобувача:

1. Kvasnikov V.P. Optimizing the uncertainty of measurements on a coordinate measuring machine when controlling complex geometric surfaces /Kvasnikov V.P., Chalyi O.V., Graf M.S., Perederko A.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Mathematics Series. – 2024.–№4(5 (130), P.14–25.https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310051

2. Чалий О.В. Вимірювання складних просторових поверхонь на координатно вимірювальній машині/ Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка / ТЕХНІЧНІ НАУКИ – 2023. – № 41(2023). – С. 62-67. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.9

3. Чалий О.В. Система управління калібруванням координатновимірювальної машини / Проблеми інформатизації та управління – Розділ – статті – Том 4 № 76 (2023) – С. 121-126. DOI: https://doi.org/10.18372/2073-4751.76.18247

4. Чалий О.В. Автоматична корекція похибки вимірювання на координатно-вимірювальній машині вимірювальній / Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка /ТЕХНІЧНІ НАУКИ – 2024. – № 45(2024) – С. 108-113. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-4

5. Чалий О.В. Дослідження чутливості датчика координатновимірювальної машини / Чалий О.В., Сірий Д.Т./ Проблеми інформатизації та управління – Розділ – статті. Том 3 № 79 (2024) – С.88-90. DOI: ttps://doi.org/10.18372/2073-4751.79.19376

6. Чалий О.В. Контроль точності авіаційних деталей з використанням координатно вимірювальних машин // IIPTK-2022. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси чотирнадцята міжнародна міжнар. наук.–практ. конф. 17-18 травня 2022, Київ. – С. 142–144.

7. Чалий О.В. Математичний опис кривої евольвенти методом триангуляції координатно-вимірювальної машини // XVI міжнар. наук.– технічна конф. «ABIA-2023» – 18-20 квітня 2023 р. – Київ, 2023.– С. 14.13-14.15.

8. Чалий О.В. Вимірювання складних просторових поверхонь за допомогою координатно вимірювальних машин // ПРТК-2023. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси шістнадцята міжнародна міжнар. наук.–практ. конф. 23-24 травня 2023, Київ. – С. 186–189.

9. Чалий О.В. Системи керування координатно-вимірювальних машин // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення. Матеріали міжнародної наукова-технічної конференції, 29-30 листопада 2023 року, м. Житомир. С. 262-265.

10. Чалий О.В. Вплив теплових градієнтів на корекцію геометрії координатно-вимірювальної машини// Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбережені. Матеріали міжнародної наукова-технічної конференції, 6-7 грудня 2023р. С. 355–357.

11. Чалий О.В. Математична модель вимірювання на координатновимірювальній машині // ПРТК-2024. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси сімнадцята міжнародна міжнар. наук.–практ. конф. 21-22 травня 2024, Київ. – С. 261–264.

12. Чалий О.В. Методи та принципи побудови координатновимірювальної машин// Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси. V міжнародна науково-практична конференція. 18-19 квітня 2024 року Черкаси С. 195–197.

13. Чалий О.В. Алгоритми вимірювання на координатновимірювальній машині// Комп'ютерні системи та мережні технології. П'ятнадцята міжнародна міжнар. наук.–практ. конф. 25-26 травня 2024, Київ. С. 167–169.

Abstract

Chalyi O. Automated control system for coordinate measuring machine. Dissertation for the degree of PhD in specialty 152 "Metrology and Information-Measuring Technology." – State University "Kyiv Aviation Institute".

This dissertation presents the following scientific results:

1. For the first time, a method for coordinate measurement of highprecision parts has been developed, based on a new measurement strategy and a mathematical model that establishes a relationship between the coordinates of measured points and linear-angular parameters. Unlike existing methods, the proposed approach improves measurement accuracy by 1.5–2 times through trajectory optimization and systematic error compensation.

2. A mathematical model for assessing measurement errors in a CMM has been developed for the first time, taking into account the influence of geometric, kinematic, and thermal factors. This model enables real-time prediction and compensation of measurement errors, resulting in a 25–30% increase in measurement accuracy compared to traditional methods.

3. A novel approach to automatic measurement error correction has been developed, based on an adaptive algorithm for processing data from the CMM sensor. This method reduces random measurement errors by 35–40% and enhances the system's stability under destabilizing factors.

4. An improved methodology for optimizing the metrological characteristics of CMMs has been developed by comprehensively considering the sensitivity parameters of the sensor and the characteristics of the measured surface. This has resulted in a 20–25% increase in measurement accuracy for complex spatial surfaces.

5. A new modeling complex for determining the metrological characteristics of CMMs has been created. It allows for virtual testing of the system and optimization of measurement parameters without conducting physical experiments. The application of this complex reduces system setup time by 40–50%.

6. A methodology for the use and configuration of PC-DMIS CAD software for automated processing of measurement results has been proposed, ensuring effective integration with computer-aided design and manufacturing systems (CAD/CAM). Parameters and procedures for working with the software complex have been optimized to improve the accuracy and speed of measurements.

The dissertation presents the following scientific results:

1. Methods for improving the reliability of high-precision part measurements on CMMs have been developed. These include algorithms for optimizing measurement trajectories, methods for compensating systematic and random errors, techniques for minimizing the influence of external factors, calibration and adjustment procedures, and recommendations for selecting measurement modes. These advancements have improved the accuracy and speed of coordinate measurements by 15–25%.

2. For the first time, a method for determining the comprehensive measurement error of geometric parameters in an automated CMM system has been developed. This method accounts for errors caused by the operation of the measuring head's mechanical system, thermal deformations, and vibrational effects on part positioning. As a result, it ensures measurement accuracy for high-precision parts within $2-3 \mu m$.

3. A new method for automated measurement on CMMs has been developed. It includes algorithms for automatic recognition of geometric elements, optimization of the number of measured points, adaptive control of measurement speed, automatic processing of results, and generation of measurement reports. This has increased measurement productivity by 12–15%.

4. Further development has been made in optimizing CMM setup, selecting measurement modes, maintaining the system, training operators, and ensuring metrological traceability. These improvements have ensured stable CMM operation in production environments.

The theoretical and practical contributions of this work have been implemented at ARAMIS LLC (Cherkasy, Ukraine), as confirmed by an implementation act dated January 16, 2025. They have also been integrated into the educational process at State University "Kyiv Aviation Institute"in the Department of Computerized Electrotechnical Systems and Technologies, as confirmed by an act dated January. The results are used in lectures and laboratory work for the course "Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements", as well as in teaching the courses "Methodology of Applied Research", and in diploma and coursework projects, as confirmed by an act dated January 23, 2025.

The introduction highlights the relevance of the research topic, which stems from the growing demand for high-precision measurements to ensure product quality and competitiveness in mechanical engineering, aviation, aerospace, and other industries. The study establishes a connection with the advancement of information-measuring technology and formulates the main scientific problem, which involves developing methods, mathematical models, techniques, and technical implementations for automated CMM control systems.

The challenges of measurement accuracy, errors, calibration, and verification are addressed, emphasizing the need for modern CMMs capable of integration with computer-aided design (CAD) and manufacturing (CAM) systems. Special attention is given to the scientific novelty and practical significance of the obtained results in improving production efficiency and enhancing the competitiveness of the domestic aerospace industry.

The first chapter presents an analytical review of methods, tools, and techniques for measuring the geometric parameters of high-precision parts using CMMs. A classification of modern methods for geometric parameter control is performed, along with a qualitative analysis of destabilizing factors that affect measurement accuracy.

The scientific problem is substantiated, emphasizing the development of automated CMM control systems with enhanced metrological characteristics, which is crucial for industrial applications, particularly in aviation and aerospace engineering. The second chapter explores the theoretical foundations of methods for measuring geometric parameters of high-precision parts on CMMs and analyzes approaches to improving measurement accuracy.

A coordinate measurement method has been developed, incorporating a measurement strategy for complex spatial surfaces and a computational model that mathematically describes the relationship between measured point coordinates and defined parameters. Mathematical modeling methods for the measurement process are analyzed, enabling error modeling and optimization of metrological characteristics.

A methodology for improving measurement reliability is proposed by considering the accuracy characteristics of applied methods and measurement equipment errors. Mathematical models for calculating geometric parameters of parts, including those with complex surfaces, are presented. Additionally, a structural diagram of an information-measuring system for automated measurements is proposed.

Special attention is given to the development of methods that ensure effective measurement of complex spatial surfaces, taking into account the geometry of parts and the influence of destabilizing factors on the measurement process.

The third chapter analyzes measurement errors in complex spatial surfaces of high-precision parts using CMMs. Mathematical models of measurement errors are examined, considering the influence of geometric, kinematic, thermal, and random factors on measurement results. A classification of primary error components is performed, and a methodology for their quantitative assessment is proposed.

Methods for detecting anomalous deviations in coordinate measurements are studied, based on the analysis of statistical characteristics of measurement data. A comparative analysis of the effectiveness of existing approaches for detecting such deviations in the measurement of complex surfaces is conducted. A method for automatic error correction is developed, utilizing mathematical models that describe the relationship between error sources and the obtained coordinate data. The proposed approach significantly reduces the impact of systematic and random errors on the final measurement results.

Approaches to optimizing the metrological characteristics of CMMs when measuring complex geometric shapes are described. Key parameters affecting measurement accuracy are identified, and recommendations for their optimization are provided.

A measurement process model is proposed, taking into account the specific features of complex spatial surfaces. This model enables high-accuracy evaluation of metrological characteristics, enhancing the reliability of measurement results and enabling CMMs to be used for high-precision quality control in various industrial sectors.

The fourth chapter presents experimental studies on the developed automated high-precision measurement system for CMMs. An analysis of experimental measurement results confirms improvements in accuracy and speed for measuring complex spatial surfaces.

The calculation of errors in the information-measuring system of the automated measurement system is reviewed, along with a quantitative analysis identifying the main sources of errors. A metrological certification of the measurement system is performed, verifying that its metrological characteristics meet modern requirements.

A methodology for improving measurement accuracy of complex part geometries is developed, incorporating destabilizing factors and using variance analysis methods. Enhancements to error correction algorithms based on experimental data and mathematical modeling are presented.

PC-DMIS CAD software has been utilized and adapted for automated processing of measurement results, providing effective integration with CAD/CAM systems. Additional modules and algorithms have been developed to optimize the data processing workflow, taking into account the specific characteristics of the measured parts..

The general conclusions summarize the main theoretical and experimental results obtained in the research and development of an automated measurement system for high-precision parts using CMMs. The findings confirm the relevance and effectiveness of the proposed methods and approaches for improving the accuracy and speed of measuring complex spatial surfaces.

Keywords: Automated control system, coordinate measuring machine, high-precision measurement, metrological characteristics, measurement errors, automatic error correction, mathematical model, measurement accuracy, computer-aided design (CAD) systems, industrial metrology, measurement automation.

List of the main publications of the applicant:

1. Kvasnikov V.P. Optimizing the uncertainty of measurements on a coordinate measuring machine when controlling complex geometric surfaces /Kvasnikov V.P., Chalyi O.V., Graf M.S., Perederko A.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Mathematics Series. – 2024.–№4(5 (130), P.14–25.https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310051

2. Chalyi, O. V. (2023). Measurement of complex spatial surfaces on a coordinate measuring machine. *Podilskyi Bulletin: Agriculture, Technology, Economics*, (41), 62–67. <u>https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.9</u>

3. Chalyi, O. V. (2023). Calibration control system of a coordinate measuring machine. *Problems of Informatization and Control*, 4(76), 121–126. <u>https://doi.org/10.18372/2073-4751.76.18247</u>

4. Chalyi, O. V. (2024). Automatic correction of measurement error on a coordinate measuring machine. *Podilskyi Bulletin: Agriculture, Technology, Economics*, (45), 108–113. <u>https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-4</u>

5. Chalyi, O. V., & Siryi, D. T. (2024). Investigation of the sensitivity of a coordinate measuring machine sensor. *Problems of Informatization and Control*, *3*(79), 88–90. <u>https://doi.org/10.18372/2073-4751.79.19376</u>

6. Chalyi, O. V. (2022, May 17–18). Accuracy control of aviation parts using coordinate measuring machines. *Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference on Integrated Intelligent Robotic Complexes (IIRTK-2022)*, Kyiv, 142–144.

7. Chalyi, O. V. (2023, April 18–20). Mathematical description of the involute curve by the triangulation method of a coordinate measuring machine. *Proceedings of the 16th International Scientific and Technical Conference "AVIA-2023"*, Kyiv, 14.13–14.15.

8. Chalyi, O. V. (2023, May 23–24). Measurement of complex spatial surfaces using coordinate measuring machines. *Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference on Integrated Intelligent Robotic Complexes (IIRTK-2023)*, Kyiv, 186–189.

9. Chalyi, O. V. (2023, November 29–30). Control systems of coordinate measuring machines. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Computer Technologies: Innovations, Problems, Solutions"*, Zhytomyr, 262–265.

10. Chalyi, O. V. (2023, December 6–7). Influence of thermal gradients on the correction of coordinate measuring machine geometry. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "New and Non-Traditional Technologies in Resource and Energy Saving"*, 355–357.

11. Chalyi, O. V. (2024, May 21–22). Mathematical model of measurements on a coordinate measuring machine. *Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference on Integrated Intelligent Robotic Complexes (IIRTK-2024)*, Kyiv, 261–264.

12. Chalyi, O. V. (2024, April 18–19). Methods and principles of building coordinate measuring machines. *Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference on Information Modeling Technologies, Systems and Complexes*, Cherkasy, 195–197.

13. Chalyi, O. V. (2024, May 25–26). Measurement algorithms on a coordinate measuring machine. *Proceedings of the 15th International Scientific*

and Practical Conference on Computer Systems and Network Technologies, Kyiv, 167–169.

Анотація	1
Abstract	9
Вступ	21
1. Аналіз сучасного стану проблеми вимірювання високоточних	20
деталей на координатно-вимірювальній машині	29
1.1. Аналітичний огляд робіт в галузі КВМ	29
1.2. Сучасний стан методів, засобів та способів вимірювання	20
КВМ	38
1.3. Аналіз дестабілізуючих факторів при вимірюванні на	50
КВМ	32
1.4. Постановка наукової задачі	56
Висновок до розділу 1	. 58
Перелік літератури до розділу 1	58
2. Методи та моделі процесу вимірювання на координатно-	65
вимірювальній машині	05
2.1. Метод вимірювання на КВМ	65
2.2. Синтез структури КВМ	71
2.3. Алгоритми вимірювання на КВМ	74
2.4. Вимірювання складних просторових поверхонь на КВМ	79
Висновок до розділу 2	88
Перелік літератури до розділу 2	89
3. Математична модель вимірювання складних просторових	05
поверхонь	95
3.1. Математична модель похибки вимірювання	95
3.2. Методика розрахунку похибки вимірювання на КВМ	101
3.3. Дослідження чутливості датчика КВМ	107
3.3. Автоматична корекція похибки вимірювання	117
3.4. Оптимізація метрологічних характеристик при	121

3MICT

вимірюванні КВМ	
Висновок до розділу 3	131
Перелік літератури до розділу 3	132
Розділ 4. Експериментальні дослідження та шляхи підвищення	120
точності вимірювання на координатно-вимірювальній машині	139
4.1. Результати досліджень метрологічних характеристик	120
КВМ	139
4.2. Моделюючий комплекс для визначення метрологічних	150
характеристик КВМ	150
4.3. Шляхи підвищення точності вимірювання на КВМ	152
4.4. Програмно-математичне забезпечення процесу	154
вимірювання на КВМ	154
Висновок до розділу	
4	
Перелік літератури до розділу 4	161
Висновки до розділу 4	157
Загальні висновки	159
Додатки	165
	103

Перелік умовних позначень і скорочень

- ВГ-вимірювальна головка;
- ВН вимірювальний наконечник;
- ВВ випадкова величина;
- ВП вимірювальний перетворювач;
- ГП геометричні параметри;
- КВМ координатно-вимірювальна машина;
- ЛКП лінійно-кутові параметри;
- МКЕ метод кінцевих елементів;
- ММ математична модель;
- НВ невизначеність вимірювання;
- ПК Персональний комп'ютер;
- ПМЗ програмно-математичне забезпечення;
- САПР системи автоматизованого проектування;
- СПП Складна просторова поверхня;
- СПП складна просторова поверхня;
- ЧПК числове програмне керування;
- САD системи автоматизованого проектування;
- GUM guide to the expression of uncertainty in measurement
- MES системи управління виробництвом;
- МРЕ_Е Максимально допустима похибка вимірювання довжини
- РF Похибка форми щупа
- VDI/VDE 2617- Об'ємна точність позиціонування
- QMS системи управління якістю;
- ΔХ відхилення об'єкта при фіксації;
- r(t) траєкторія руху датчика;
- σ середньо квадратичне відхилення;
- ∆*L* максимально допустима похибка вимірювання;
- J функціонал мінімізації кривизни траєкторії;

ΔL_T – зміна розміру внаслідок температурного впливу;

 $\mu \frac{\partial^4 x^i}{\partial s^4}$ – корекція форми для збереження гладкості кривини вимірюваної .

поверхні;

 $\frac{\partial t}{\partial T}$ Розподіл температури в об'ємі КВМ;

D_e – сумарна похибка вимірювань датчика;

 $\sum_{k=1}^{N} w_k f_k(x^i)$ – апроксимація вимірюваних точок за допомогою базисних функцій:

∆_{заг}– Загальна похибка вимірювання;

б_{геом} – геометричні похибки напрямних;

- $\vec{\psi}$ повна модель геометричних MPE_E похибок;
- $\hat{\Sigma}_{\Delta}$ коваріаційна матриця сумарної похибки;
- *S* чутливість датчика;
- $\vec{X}_{_{\rm кор}}$ математична модель модель корекції похибки вимірювання;

 $\overrightarrow{\Delta X}$ – вектор похибки;

МРЕ_Е – результати вимірювань;

- *R* повторюваність результатів вимірювання;
- ∆*L* зміна результату вимірювання через температурний вплив;
- *PF* похибка форми щупа;
- E_v об'ємна точність позиціонування;
- E_{dyn} математична модель динамічної похибки;

Актуальність теми. У сучасному світі, де технологічний прогрес та інновації відіграють ключову роль у розвитку економіки та промисловості, потреба в точних вимірюваннях геометричних параметрів деталей стає все більш актуальною. Високоточні вимірювання є фундаментальною основою для багатьох галузей України, включаючи машинобудування, авіабудування та аерокосмічну промисловість. З ростом складності авіаційних виробів та підвищенням вимог до їх якості, зростає і потреба в більш точних, швидкодіючих та універсальних засобах вимірювання параметрів деталей та виробів. У забезпеченні якості та конкурентоспроможності продукції авіаційної техніки ключову роль відіграє контрольно-вимірювальна техніка. Особливе місце в ній посідають координатно-вимірювальні машини для контролю геометричних параметрів деталей, вузлів машин і механізмів. Однак, більшість теоретичних та прикладних досліджень нових прецизійних методів автоматизованого вимірювання не знайшли належного практичного застосування. Це зумовлено складністю вимірювальних систем, проблемами з точністю та похибками вимірювань, які важко врахувати, обмеженням існуючих способів вимірювання, проблемами калібрування та верифікації, технологічні обмеження. Це вимагає комплексного підходу до розробки КВМ, що враховує не лише теоретичні аспекти, але й практичні обмеження реального виробничого середовища. Тому розробка автоматизованих систем керування КВМ та підвищення їх метрологічних характеристик залишається актуальним питанням сучасного розвитку інформаційно-вимірювальної техніки.

Подальші дослідження KBM, ïχ технічних метрологічних та характеристик вказують на необхідність підвищення точності та швидкодії вимірювань. Ці дослідження спрямовані на створення методів, методик та засобів автоматизованого керування КВМ на базі розробки нових універсальних та перспективних систем з визначенням складових похибок вимірювання та їх автокомпенсації з використанням сучасних технологій.

Сучасні КВМ виконуються із застосуванням передових технологій, зазвичай, із комп'ютерним керуванням і обробкою даних та передачею результатів. Вони дозволяють отримувати інформацію про точки реальних координат геометричних параметрів об'єктів з високою точністю, здійснюють комп'ютерну корекцію похибок, зберігання даних про результати та процес вимірювання. Крім того, сучасні КВМ здатні інтегруватися з системами автоматизованого проектування (САПР) та виробництва, що значно розширює їх функціональні можливості та сферу застосування.

Таким чином, наукова задача розробки методів, математичних моделей, методик та технічної реалізації автоматизованих систем керування КВМ є актуальною та має важливе значення для розвитку інформаційновимірювальної техніки та метрології. Вирішення цієї задачі дозволить не лише підвищити точність та ефективність вимірювань, але й сприятиме загальному прогресу в галузі контролю якості та автоматизації виробництва. Це в свою чергу, матиме позитивний вплив на конкурентоспроможність вітчизняної промисловості на глобальному ринку.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення автоматизованої систем вимірювання на КВМ геометричних параметрів деталей з високою точністю.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

1. Аналіз існуючих методів, методик та алгоритмів вимірювань на КВМ та програмно-апаратних засобів реалізації вимірювальних задач, теоретичне обґрунтування, розробка методик вимірювання геометричних параметрів деталей на базі створення універсальних методів вимірювання та розробки методик проектування систем із заданими метрологічними характеристиками;

2. Удосконалення існуючих КВМ на основі розробки нових систем керування та їх структур з розширеним діапазоном, точністю та швидкодією вимірювання з підвищеними метрологічними характеристиками;

3. Розробка методологічних засад проектування автоматизованих систем керування КВМ, виконання теоретичних досліджень вимірювання геометричних параметрів деталей;

4. Розробка математичних моделей руху вимірювальної головки КВМ та програмно-математичного забезпечення автоматизованої системи керування КВМ для реалізації запропонованих методів та моделей.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання геометричних параметрів деталей на координатно-вимірювальній машині.

Предмет дослідження – методи, математичні моделі та алгоритми автоматизованої системи вимірювання на КВМ.

дослідження. Методи При розв'язанні поставленої залачі використані методи, що основані на теорії інформаційно-вимірювальних систем, методах імітаційного моделювання та програмно-математичного забезпечення, методах створення автоматизованих систем керування та методах управління КВМ, теорії похибок, метрологія. Методи дослідження математичне моделювання, систематичних та включають випадкових похибок KBM. сприяє підвищенню точності вимірювання. ЩО Використовується метод максимальної правдоподібності для оцінки похибок, що забезпечує більш точну корекцію. Методи чисельного моделювання включають застосування методу Монте-Карло для оцінки невизначеності вимірювань. Проводиться моделювання впливу різних факторів на точність вимірювань, що дозволяє оцінити ефективність розроблених методів. Експериментальні дослідження передбачають проведення вимірювань на реальній координатно-вимірювальній машині для збору даних про похибки. Оцінюється ефективність запропонованих методів корекції шляхом порівняння з референтними вимірами. Алгоритмічна та програмна реалізація автоматичної розробку алгоритмів корекції похибок включає лля автоматизованої системи вимірювання. Статистична обробка даних дозволяє проаналізувати отримані результати з використанням сучасних методів статистичної обробки. Визначається ефективність запропонованих методів корекції похибок, що дає можливість покращити точність вимірювань на координатно-вимірювальних машинах.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше обґрунтовано концепцію автоматизованої системи керування на КВМ прецезійних деталей з підвищеними метрологічними характеристиками, що дає можливість формалізувати нові структури та розробити нові алгоритми процесу вимірювання;

2. Подальший розвиток отримали теоретичні основи побудови автоматизованої системи вимірювання на КВМ на основі створення нових структурних та функціональних схем 3 використанням адаптивних кореляційні зв'язки між алгоритмів, IIIO враховують дискретними вимірюваннями та змінами дестабілізуючих факторів, що дає можливість зменшити похибку на (7-18)% та підвищити завадозахищеність;

3. Удосконалено математичні моделі процесу вимірювання геометричних параметрів, які відрізняються від раніше відомих тим, що враховано дію дестабілізуючих факторів і дають змогу визначити положення та позиціонування рухомих частин КВМ під час експлуатації;

4. Удосконалено математичні моделі розрахунку похибок вимірювання з врахуванням рухів виконуючих органів та сукупної компенсації дестабілізуючих параметрів (температури, вібрації, вологості), що дає змогу розширити діапазон вимірювання, підвищити швидкодію і точність вимірювання.

5. Подальший розвиток отримав метод вимірювання деталей із складною просторовою поверхнею на КВМ з використанням адаптивної стратегії вимірювання, що забезпечує підвищення точності та скорочення часу інспекції на 10-12%.

Практичне значення отриманих результатів:

У роботі отримані такі нові наукові результати:

1. Розроблено методики підвищення достовірності вимірювання геометричних параметрів складних поверхонь, що дозволяє підвищити точність і швидкість координатних вимірювань на 15-20%.

2. Визначено похибку вимірювання геометричних параметрів складних поверхонь на КВМ, що дозволяє підвищити якість контролю деталей у галузях авіакосмічної та авіаційної промисловості.

3. Підвищено точність та швидкість вимірювання геометричних параметрів деталей із складною просторовою поверхнею, розширено функціональні можливості системи для реєстрації, аналізу та зберігання даних на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

практичні здобутки Теоретичні роботи впроваджено та на підприємстві: ТОВ "Араміс" м. Черкаси та у навчальний процес кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій «ДНП «ДУ київський авіаційний інстит» пілготовки фахівців для V галузі автоматизованих вимірювальних систем. Вони використовуються у лекціях, лабораторних та практичних заняттях, а також у дипломних роботах студентів за спеціальністю «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та при викладанні курсів «Методологія прикладних досліджень» та у дипломному та курсовому проектуванні, що підтверджується відповідним актом від 23січня 2025р..

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в роботі використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, експериментально та моделюванням на ПК.

Особистий внесок здобувача у праці, опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації:

1. Kvasnikov V.P. Optimizing the uncertainty of measurements on a coordinate measuring machine when controlling complex geometric surfaces /

Kvasnikov V.P., Chalyi O.V., Graf M.S., Perederko A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Mathematics Series. – 2024. – №4(5 (130), C. 14–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310051.

Здобувачем проведено аналіз методів оптимізації невизначеності вимірювань на координатно-вимірювальній машині при контролі складних геометричних поверхонь та запропоновано методику підвищення точності вимірювань.

2. Чалий О.В. Вимірювання складних просторових поверхонь на координатно-вимірювальній машині // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. ТЕХНІЧНІ НАУКИ – 2023. – №41(2023). – С. 62-67. DOI: 10.37406/2706-9052-2023-4.9.

Здобувачем досліджено особливості вимірювання складних просторових поверхонь на КВМ, запропоновано стратегію вимірювань та методику оцінки точності результатів.

3. Чалий О.В. Система управління калібруванням координатновимірювальної машини // Проблеми інформатизації та управління – 2023. – Том 4, №76. – С. 121-126. DOI: 10.18372/2073-4751.76.18247.

Здобувачем розроблено систему управління калібруванням КВМ, визначено алгоритми компенсації похибок та оцінено вплив калібрування на метрологічні характеристики вимірювань.

4. Чалий О.В. Автоматична корекція похибки вимірювання на координатно-вимірювальній машині // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. ТЕХНІЧНІ НАУКИ – 2024. – №45(2024). – С. 108-113. DOI: 10.37406/2706-9052-2024-4.

Здобувачем запропоновано алгоритм автоматичної корекції похибок вимірювань на КВМ, реалізовано математичну модель компенсації систематичних помилок та оцінено ефективність корекції.

5. Чалий О.В., Сірий Д.Т. Дослідження чутливості датчика координатно-вимірювальної машини // Проблеми інформатизації та

управління — 2024. — Том 3, №79. — С. 88-90. DOI: 10.18372/2073-4751.79.19376.

Здобувачем проведено дослідження чутливості датчика КВМ, виконано оцінку впливу різних факторів на точність вимірювань та запропоновано методику калібрування сенсорного елемента.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на наступних науково-технічних конференціях та семінарах:

Чотирнадцята міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (м. Київ, 17 – 18 травня, 2022р.); Шіснадцята міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2023», (м. Київ, 18-20 квітня, 2023р); П'ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», (м. Київ, 23 – 24 травня, 2023р.); Сьома міжнародна науковотехнічна конференція «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (м. Житомир, 29 – 30 листопада, 2023р.); Міжнародна науковотехнічна конференція «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбережені» (м. Одеса, 6 – 7 грудня, 2023р); Шіснадцята міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», (м. Київ, 21 – 22 травня, 2024р.); П'ята міжнародна науковотехнічна конференція «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси» (м. Київ, 18 – 19 квітня, 2024р.); П'ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології» (м. Київ, 25 – 26 травня, 2024р.). Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 14 наукових працях з яких: 5 статей в наукових фахових виданнях України з них 1 включена до міжнародних наукових-метричних баз Scopus та 9 тез доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний текст дисертації викладено на 164 сторінках основного друкованого тексту. Повний обсяг дисертаційної роботи 181 сторінок друкованого тексту, містить 12 рисунків, 4 таблиці, 5 додатків. Список використаних джерел по розділах становить: розділ 1 – 49 джерел, розділ 2 – 39 джерело, розділ 3 – 57 джерел, розділ 4 – 25 джерел.

1. Аналіз сучасного стану проблеми вимірювання високоточних деталей на координатно-вимірювальних машинах

Точність вимірювання геометричних параметрів деталей є критичним машинобудуванні, авіаційній та космічній фактором y сучасному промисловості, де високоточні координатні вимірювання забезпечують якість та відповідність продукції заданим технічним вимогам. КВМ є основним вимірювання складних просторових інструментом для поверхонь i геометричних параметрів виробів, що зумовлює необхідність їх постійного вдосконалення.

У цьому розділі проведено аналіз сучасного стану вимірювання високоточних деталей на КВМ. Розглянуто основні наукові роботи, присвячені вдосконаленню методів і засобів координатних вимірювань, а також проаналізовано існуючі підходи до підвищення точності вимірювань. Особливу увагу приділено аналізу дестабілізуючих факторів, що впливають на точність результатів вимірювань, зокрема геометричних, температурних, кінематичних і випадкових похибок.

Важливою частиною цього розділу є методи вимірювання на КВМ, які охоплюють контактні та безконтактні методи збору даних, способи мінімізації похибок та особливості застосування сучасних датчиків і зондів.

На основі проведеного огляду сформульовано наукову задачу дослідження, яка спрямована на розробку нових підходів до підвищення точності вимірювання складних деталей за допомогою КВМ.

1.1. Аналітичний огляд робіт в галузі КВМ

Розвиток автоматизованих систем вимірювання на базі КВМ пройшов значний шлях від перших механічних пристроїв до сучасних автоматизованих систем, що інтегруються з передовими технологіями Industry 4.0 [1].

Основоположні роботи в галузі КВМ були проведені в 1960-х роках такими вченими, як D. McMurtry та J. Shelton, які розробили перші автоматизовані системи з числовим програмним керуванням для вимірювання високоточних деталей [2]. Їхні дослідження заклали основу для створення сучасних автоматизованих вимірювальних систем.

Значний внесок у розвиток методів підвищення точності вимірювання на КВМ зробили А. Weckenmann та G. Moroni [3, 4]. Вони розробили методики оцінки точності та калібрування автоматизованих вимірювальних систем, що дозволило забезпечити надійний контроль високоточних деталей у виробничих умовах.

Важливим етапом стала розробка автоматизованих систем програмування КВМ на основі САД-моделей [5]. Дослідження R. Hocken та Р. Регеіга дозволили створити алгоритми автоматичного генерування програм вимірювання складних високоточних деталей, що суттєво підвищило ефективність використання КВМ.

Суттєвий прогрес у підвищенні точності автоматизованих вимірювань був досягнутий завдяки роботам A Chandrakanth, та його колеги [6], які розробили методи компенсації геометричних та температурних похибок при вимірюванні високоточних деталей. Їхні дослідження дозволили забезпечити стабільну роботу автоматизованих вимірювальних систем в реальних виробничих умовах.

У галузі програмного забезпечення для автоматизованих систем вимірювання важливими є роботи Di Giacomo, B., та de Morais, C. A. G, які розробили методології оцінки невизначеності вимірювань високоточних деталей [7]. Їхні дослідження заклали основу для створення автоматизованих систем обробки результатів вимірювань з урахуванням всіх факторів впливу.

Сучасний розвиток автоматизованих систем вимірювання характеризується впровадженням інтелектуальних технологій. Роботи Boutarfa A. та Bouguechal N.-E у галузі автоматизації процесу вимірювання [8] відкрили нові можливості для підвищення точності та швидкодії контролю високоточних деталей. Їхні розробки дозволили створити системи, що автоматично адаптуються до різних типів вимірюваних деталей.

Значний внесок у розвиток автоматизованих систем вимірювання зробили вітчизняні вчені. Зокрема, дослідження Іволгіної, Т. О присвячені підвищенню точності вимірювань та розробці методів калібрування автоматизованих вимірювальних систем [9]. Ці роботи дозволили створити ефективні методики забезпечення точності вимірювань високоточних деталей у виробничих умовах.

Важливим напрямком досліджень є інтеграція автоматизованих систем вимірювання у загальну систему управління якістю. Роботи J. Savio та R. Meneghello [10] присвячені розробці автоматизованих систем аналізу результатів вимірювань та їх використання для статистичного контролю процесів виготовлення високоточних деталей.

У галузі архітектури систем керування КВМ значний внесок зробили дослідження Woźniak A. та його колег [11]. Вони розробили модульну архітектуру системи керування, яка дозволяє легко інтегрувати нові функції та адаптуватися до різних типів КВМ. Їхні роботи заклали основу для створення гнучких та масштабованих систем керування.

Важливим напрямком досліджень є розробка алгоритмів керування рухом вимірювальної головки. Роботи Н. Schwenke та його команди [12] зосереджені на створенні адаптивних алгоритмів, які оптимізують траєкторію руху залежно від геометрії вимірюваної деталі та вимог до точності. Ці дослідження дозволяють значно підвищити ефективність процесу вимірювання та знизити час контролю.

У сфері інтерфейсів взаємодії між системою керування та іншими компонентами КВМ варто відзначити роботи Nuccio, S. та Spataro C. [13]. Його команда розробила універсальний протокол обміну даними, який забезпечує безшовну інтеграцію різних типів датчиків та виконавчих механізмів з системою керування. Це відкриває нові можливості для створення гнучких та легко налаштовуваних КВМ. Дослідження в галузі реального часу систем керування КВМ, проведені R. Ramesh та його колегами [14], дозволили створити алгоритми, здатні обробляти великі обсяги даних та приймати рішення в режимі реального часу. Це особливо важливо для забезпечення високої точності вимірювань при роботі зі складними поверхнями.

Роботи Y. Zhang та його команди [15] зосереджені на розробці інтелектуальних систем керування КВМ на основі нейронних мереж. Їхні дослідження показали, що використання методів глибокого навчання дозволяє створювати системи, здатні адаптуватися до змін умов вимірювання та автоматично коригувати стратегію контролю.

У галузі моделювання динаміки КВМ значний внесок зробили дослідження Н. Zhang та його колег [16]. Вони розробили високоточні моделі, які враховують не лише геометричні, але й динамічні характеристики машини. Це дозволяє створювати більш ефективні алгоритми керування та підвищувати точність вимірювань при високих швидкостях сканування.

Інтеграція КВМ з промисловими роботами є ще одним перспективним напрямком досліджень. Роботи G. Acaccia та його команди [17] присвячені розробці систем керування, які забезпечують точну координацію між роботом-маніпулятором та вимірювальною системою. Це відкриває нові можливості для автоматизації контролю якості в умовах гнучкого виробництва.

Дослідження в галузі самокалібрування КВМ, проведені G. Ge та його колегами [18], дозволили створити системи керування, здатні автоматично виявляти та компенсувати похибки вимірювання. Це значно підвищує надійність та точність вимірювань, особливо в умовах змінних температур та вібрацій.

Важливим напрямком залишається розробка методів оптимізації траєкторій вимірювання. Роботи В. Gapinski та його команди [19] зосереджені на створенні алгоритмів, які мінімізують час вимірювання при

збереженні заданої точності. Їхні дослідження дозволяють значно підвищити продуктивність КВМ при контролі серійної продукції.

У галузі розподілених систем керування КВМ варто відзначити роботи F. Franceschini та його колег [20]. Вони розробили архітектуру, яка дозволяє розподілити обчислювальне навантаження між кількома процесорами, що особливо важливо для обробки даних з мультисенсорних систем у реальному часі.

У сфері програмного забезпечення для КВМ значний внесок зробили дослідження G. T. Gebreselassie та його колег [21]. Вони розробили нові алгоритми для автоматичного планування траєкторії вимірювань на основі методів машинного навчання. Ці алгоритми дозволяють оптимізувати процес вимірювання, значно скорочуючи час контролю без втрати точності.

Інтеграція КВМ з технологіями Industry 4.0 є ще одним важливим напрямком досліджень. Роботи J. Lee та його колеги зосереджені на створенні "розумних" КВМ, які здатні адаптуватися до змін у виробничому процесі та обмінюватися даними з іншими системами в режимі реального часу [22]. Їхні дослідження відкривають нові можливості для повної автоматизації процесу контролю якості.

У галузі мобільних КВМ варто відзначити роботи F. Franceschini та його колег [23]. Вони розробили нові методи калібрування та оцінки невизначеності вимірювань для портативних координатно-вимірювальних систем, що дозволило значно розширити сферу їх застосування.

Дослідження в галузі нанометрології, проведені R. Herrera-Basurto та його командою [24], дозволили створити КВМ з роздільною здатністю на рівні нанометрів. Їхні роботи відкривають нові можливості для контролю якості в мікроелектроніці та нанотехнологіях.

Важливим напрямком досліджень залишається розробка методів оцінки невизначеності вимірювань. Роботи А. Передерко та його колег [25] дозволили створити більш надійні та ефективні алгоритми для оцінки невизначеності в режимі реального часу, що особливо важливо для автоматизованих виробничих систем.

У сфері великогабаритної метрології значний внесок зробили дослідження G. Peggs та його команди [26]. Вони розробили нові методи для вимірювання великих об'єктів з високою точністю, що особливо актуально для аерокосмічної та суднобудівної промисловості.

У галузі мультисенсорних КВМ варто відзначити роботи М. Saadat та його команди [27]. Вони розробили нові методи калібрування та об'єднання даних від різних типів датчиків, що дозволяє отримати більш повну інформацію про геометрію деталі.

Дослідження в галузі термостабільності КВМ, проведені G. Moroni та його колегами [28], дозволили створити нові методи компенсації температурних деформацій. Це особливо важливо для забезпечення високої точності вимірювань в умовах виробництва.

Роботи К.J. Stout та його команди [29] зосереджені на розробці методів віртуального калібрування КВМ. Їхні дослідження дозволяють значно скоротити час, необхідний для калібрування складних вимірювальних систем.

У галузі роботизованих КВМ значний внесок зробили дослідження А. De Groot, P. J. та його колег [30]. Вони розробили нові методи планування траєкторії та управління для автономних вимірювальних систем, що відкриває нові можливості для автоматизації контролю якості.

Інтеграція КВМ з системами комп'ютерного зору є ще одним перспективним напрямком досліджень. Роботи X Zhang та інших вчених [31] дозволили створити системи, здатні проводити швидкі та точні вимірювання складних об'єктів без необхідності фізичного контакту.

Дослідження в галузі квантової метрології, проведені Р. Gill та його колегами [32], відкривають нові можливості для створення надточних КВМ на основі квантових ефектів. Хоча ці технології ще знаходяться на ранній стадії розвитку, вони мають потенціал революціонізувати галузь координатних вимірювань.

Аналіз літератури в галузі автоматизованих систем керування КВМ виявляє ряд ключових проблем, які потребують подальшого дослідження та вирішення:

Проблема балансу між швидкістю та точністю вимірювань: Незважаючи на досягнення, представлені в роботах Н. Schwenke, залишається актуальною проблема оптимізації траєкторії руху для одночасного забезпечення високої швидкості та точності вимірювань.

Складності в інтеграції різнорідних компонентів: Хоча роботи R. Schmitt [33] запропонували універсальний протокол обміну даними, все ще існують проблеми сумісності між компонентами різних виробників та поколінь.

Обмеження обчислювальної потужності для систем реального часу: Дослідження G. Lanza [34] виявили, що для складних вимірювальних завдань існуючі системи керування можуть не встигати обробляти дані в режимі реального часу.

Складності в адаптації нейромережевих алгоритмів: Вчений S. Zhang [35] показали потенціал використання нейронних мереж, але залишається проблема їх навчання та адаптації до нових типів деталей без значних часових витрат.

Недостатня точність динамічних моделей: Незважаючи на прогрес, досягнутий в роботах G. Zhang, існуючі моделі не завжди адекватно описують поведінку КВМ при високих швидкостях та прискореннях.

Проблеми координації робот-КВМ: Дослідження G. Acaccia [17] виявили складності в забезпеченні точної синхронізації між рухом робота та процесом вимірювання, особливо для складних траєкторій.

Обмеження методів самокалібрування: Автор Ү. Lin [35] показав, що існуючі методи самокалібрування не завжди ефективні в умовах значних температурних градієнтів або вібрацій.
Складності в оптимізації траєкторій для складних поверхонь: Дослідження S. Živković [36] виявили, що для деталей зі складною геометрією існуючі алгоритми оптимізації траєкторій не завжди дають оптимальний результат.

Проблеми масштабування розподілених систем: В роботі Р. Jogalekar показано [37], що при збільшенні кількості процесорів в розподіленій системі керування виникають проблеми з синхронізацією та балансуванням навантаження.

Проблема підвищення точності вимірювань: Незважаючи на значні досягнення, представлені в роботах Z. Geng та його колег [38], залишається актуальною проблема компенсації геометричних похибок, особливо для великогабаритних деталей. Існує потреба в розробці більш ефективних методів, які б враховували комплексну взаємодію різних джерел похибок.

Обмеження існуючих типів датчиків: Дослідження В. Pätoprstý [39] у галузі оптичних датчиків виявили проблему одночасного вимірювання макро- та мікрогеометрії поверхонь. Залишається актуальним питання створення універсальних датчиків, здатних працювати з різними типами матеріалів та поверхонь без втрати точності.

Недостатня автоматизація процесу планування вимірювань: Хоча роботи D. Vrakas [40] запропонували нові алгоритми на основі машинного навчання, все ще існує проблема створення повністю автономних систем планування, здатних адаптуватися до складних геометрій без втручання оператора.

Обмеження мобільних КВМ: Роботи F. A. M. Ferreira [41] показали, що, незважаючи на прогрес, портативні системи все ще поступаються стаціонарним КВМ за точністю та повторюваністю вимірювань. Існує потреба в розробці більш надійних методів калібрування та оцінки невизначеності для мобільних систем.

Виклики нанометрології: Дослідження К. W. Lyons [42] виявили складності в забезпеченні стабільності вимірювань на нанорівні. Залишається

актуальною проблема мінімізації впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань в нанометровому діапазоні.

Проблеми оцінки невизначеності в реальному часі: Хоча роботи С. Elster [43] запропонували нові алгоритми, залишається проблема балансу між швидкістю обчислень та точністю оцінки невизначеності, особливо для складних вимірювальних завдань.

Складності великогабаритної метрології: Дослідження X. Huang [44] виявили проблеми, пов'язані з вимірюванням великих об'єктів, включаючи вплив гравітації та температурних деформацій. Потрібні нові підходи для підвищення точності вимірювань великогабаритних деталей.

Проблеми мультисенсорних систем: Дослідження А. Weckenmann [45] виявили складності в об'єднанні даних від різних типів датчиків, особливо при роботі з складними поверхнями. Існує потреба в розробці більш надійних алгоритмів фузії даних.

Термостабільність КВМ: Незважаючи на прогрес, досягнутий в роботах W. G. Weekers [46], проблема компенсації температурних деформацій залишається актуальною, особливо для вимірювань з субмікронною точністю.

Обмеження систем комп'ютерного зору: Дослідження М. R. Lopez [47] показали, що існуючі оптичні системи мають обмеження щодо роботи з блискучими або прозорими поверхнями. Потрібні нові підходи для розширення спектру матеріалів, що піддаються вимірюванню.

Тому, подальший розвиток автоматизованих систем керування КВМ вимагає комплексного підходу, що включає вдосконалення апаратного та програмного забезпечення, розробку нових методів вимірювань та аналізу даних, а також стандартизацію та метрологічне забезпечення цих систем. Особливу увагу слід приділити інтеграції систем керування КВМ з промисловими мережами та розподіленими обчислювальними ресурсами, що дозволить створити високоефективні автоматизовані системи контролю якості, здатні адаптуватися до мінливих умов виробництва та забезпечувати високу точність вимірювань при оптимальних часових витратах. Ці розробки мають важливе значення для підвищення ефективності автоматизованих систем керування КВМ, покращення їх метрологічних характеристик та розширення можливостей застосування в різних галузях промисловості.

1.2. Сучасний стан методів, засобів та способів вимірювання координатно-вимірювальною машиною

КВМ на сьогоднішній день є одними з найбільш універсальних, надійних і точних засобів для вимірювання геометричних параметрів складних і високоточних деталей. Завдяки постійному розвитку технологій, сучасний стан методів, засобів та способів вимірювання на основі КВМ характеризується високим рівнем автоматизації, широкою інтеграцією з САD/САМ системами, а також активним використанням передових інноваційних технологій. Впровадження новітніх рішень забезпечує значне підвищення точності, швидкості та ефективності вимірювань, що є особливо важливим у сучасній промисловості.

Розвиток КВМ відбувається в тісному зв'язку із загальними тенденціями, що панують у промисловості, такими як концепція Industry 4.0, а також загальна цифровізація виробничих процесів. Це сприяє автоматизації багатьох аспектів вимірювальних операцій, включаючи інтеграцію процесів вимірювання в загальну виробничу мережу та вдосконалення систем зворотного зв'язку.

Автоматизовані системи управління стають ключовими компонентами для підвищення ефективності роботи КВМ і забезпечення максимального рівня точності та надійності вимірювань. Ці системи дозволяють здійснювати комплексне керування всіма процесами, пов'язаними з роботою КВМ: від початкового планування траєкторії руху вимірювальної головки до детальної обробки й аналізу отриманих вимірювальних даних. Серед важливих напрямків розвитку КВМ слід виділити впровадження адаптивних алгоритмів керування, які дозволяють значно оптимізувати процес вимірювання залежно від геометрії конкретної деталі та вимог до точності. Такі алгоритми здатні враховувати динамічні характеристики машини, що дозволяє мінімізувати вплив небажаних факторів, таких як вібрації, інерційні ефекти та інші зовнішні впливи, які можуть негативно позначитися на точності отриманих результатів.

Окрім цього, інтеграція КВМ з САD/САМ системами суттєво підвищує продуктивність вимірювальних процесів, дозволяючи автоматизувати створення програм для вимірювань безпосередньо на основі наявних 3D-моделей деталей. Це забезпечує значне скорочення часу на підготовчі етапи вимірювань, зменшення людського втручання та мінімізацію ризику виникнення помилок у процесі програмування. Завдяки цьому виробництво стає більш гнучким та точним, що відповідає сучасним вимогам високотехнологічних галузей промисловості.

Методи вимірювання.

1. Контактні методи. Контактні методи вимірювання залишаються основою точних координатних вимірювань завдяки їхній надійності, універсальності та широкому спектру застосувань у різних промислових секторах. Ці методи відіграють ключову роль у контролі якості, оскільки забезпечують високу точність і стабільність результатів (Рисунок 1.1а). Основні контактні методи включають:

а) Традиційні механічні щупи з тригерними датчиками. Ці щупи є класичними інструментами для вимірювання, які надають високу точність і надійність. Вони здатні проводити вимірювання для широкого спектру матеріалів і геометрій, що робить їх універсальними для різних застосувань. Сучасні системи, такі як Renishaw PH20, представляють собою значний крок вперед у технології вимірювання, оскільки вони дозволяють виконувати вимірювання в п'яти осях. Це не лише підвищує швидкість виконання вимірювань, але й забезпечує велику гнучкість у роботі з різними формами та розмірами деталей.

б) Розвиток технології сканування, що забезпечує безперервний збір даних про поверхню деталі. Системи сканування стають все більш популярними завдяки своїй здатності швидко і точно фіксувати складні геометрії. Наприклад, система Renishaw REVO дозволяє проводити сканування зі швидкістю до 500 мм/с. Це суттєво скорочує час вимірювання складних поверхонь, що, в свою чергу, підвищує продуктивність процесу контролю якості.

в) Впровадження інтелектуальних датчиків, які мають здатність адаптувати силу контакту в залежності від матеріалу та геометрії деталі. Ця інноваційна технологія дозволяє оптимізувати процес вимірювання для різних типів поверхонь, що особливо важливо при роботі з делікатними або нестандартними формами. Завдяки цьому мінімізується ризик пошкодження деталі під час вимірювань, а також підвищується загальна точність результатів. Інтелектуальні датчики можуть автоматично регулювати свої параметри, що дозволяє ще більше покращити ефективність вимірювального процесу.

Контактні методи вимірювання залишаються невід'ємною частиною сучасної вимірювальної технології, оскільки вони забезпечують надійність, точність та адаптивність до вимог сучасного виробництва.

2. Безконтактні методи вимірювання на КВМ (Рисунок 1.16) набувають все більшого значення в сучасній промисловості завдяки своїм численним перевагам, які включають високу швидкість, високу точність і можливість вимірювання складних і делікатних поверхонь без ризику їх пошкодження.

Ці методи використовують різноманітні технології, такі як лазерне сканування, оптичні системи та ультразвукові датчики, що дозволяє здійснювати вимірювання без фізичного контакту з об'єктом. Це особливо важливо для виробів з чутливих або легко пошкоджуваних матеріалів, де традиційні контактні методи можуть викликати дефекти або пошкодження. Безконтактні технології також забезпечують можливість отримання великих обсягів даних за короткий час, що робить їх ідеальними для високопродуктивних виробничих процесів. Здатність виконувати вимірювання в режимі реального часу дозволяє швидко реагувати на будь-які відхилення у виробничому процесі, забезпечуючи високий рівень контролю якості.

Крім того, безконтактні методи відкривають нові можливості для вимірювання складних геометрій і форм, що є надзвичайно важливим в умовах сучасного машинобудування та інших технологічних галузей. Наприклад, лазерні сканери можуть точно вимірювати деталі з нестандартними контурами, такими як вільні форми, що часто зустрічаються в аерокосмічній та автомобільній промисловості.

Основні напрямки розвитку включають:

а) Лазерні сканери та оптичні системи:

Системи Nikon LC15Dx забезпечують швидке сканування поверхонь з високою роздільною здатністю до 4 мкм.

Лазерні трекери, наприклад Leica AT960, дозволяють проводити вимірювання великогабаритних об'єктів з точністю до 15 мкм + 6 мкм/м.

b) Технології структурованого світла:

Системи GOM ATOS забезпечують високу точність (до 0,01 мм) та швидкість вимірювань складних поверхонь.

Проектори структурованого світла, такі як AICON SmartSCAN, дозволяють створювати детальні 3D-моделі об'єктів різних розмірів.

с) Конфокальні та інтерферометричні датчики: Конфокальні датчики, наприклад Micro-Epsilon confocalDT, забезпечують вимірювання з нанометровою роздільною здатністю.

Інтерферометричні системи, такі як Zygo NewView[™] 9000, дозволяють вимірювати мікрогеометрію поверхонь з вертикальною роздільною здатністю менше 0,1 нм.

е) Фотограмметричні системи:

Використання високоточних камер та спеціалізованого програмного забезпечення для 3D-реконструкції об'єктів, наприклад, система AICON MoveInspect DPA.

Використання безконтактних методів вимірювання значно розширюють можливості КВМ, дозволяючи проводити швидкі та точні вимірювання складних об'єктів без фізичного контакту з їх поверхнею.

3. Мультисенсорні системи. Мультисенсорні системи є передовим напрямком у розвитку КВМ (Рис 1.1в), що дозволяє значно розширити їх можливості та підвищити ефективність вимірювань. Ці системи поєднують різні типи датчиків в одній КВМ, забезпечуючи гнучкість та універсальність вимірювань.



Рисунок. 1.1 а – Контактні системи вимірювання на КВМ, б – Безконтактні системи вимірювання, в – Мультисенсорні системи КВМ.

Мультисенсорні дозволяють оптимізувати процес вимірювання для різних типів поверхонь та матеріалів, забезпечуючи високу точність, швидкість та гнучкість вимірювань. Розвиток інтелектуальних систем керування та інтеграція передових технологій, таких як рентгенівська томографія, відкривають нові можливості для контролю якості складних деталей.

Будова базової частини КВМ.

Портальні КВМ (Рис 1.2а) є одним з найважливіших типів вимірювального обладнання, яке використовується в різних промислових секторах для забезпечення високої точності та надійності вимірювань. Вони характеризуються конструкцією, яка нагадує портал: вимірювальна головка переміщується по направляючих, які підтримуються вертикальними стійками.

Завдяки своїм габаритам портальні КВМ можуть вимірювати великі деталі, які можуть бути недоступні для інших типів КВМ. Це робить їх незамінними в машинобудуванні, авіації та інших галузях, де працюють з великими конструкціями.

Портальні КВМ можуть використовувати як контактні, так і безконтактні методи вимірювання. Це забезпечує гнучкість у вимірюваннях і можливість працювати з різними типами матеріалів і форм.

Портальні КВМ широко використовуються в багатьох галузях, включаючи авіацію, для вимірювання елементів літаків і двигунів, оцінки геометрії металевих виробів і формувань, для контролю якості великих деталей та складних конструкцій. Сучасні моделі, такі як Zeiss PRISMO ultra, забезпечують точність вимірювання до 0,3 мкм. Впровадження активних систем віброізоляції та термостабілізації дозволяє досягти стабільності вимірювань до 0,1 мкм/°С.

Розвиток високошвидкісних приводів та легких конструкцій дозволяє досягти швидкості вимірювання до 800 мм/с, що значно підвищує продуктивність контролю.

Горизонтальні КВМ (Рис 1.2б) спеціалізуються на вимірюванні великогабаритних деталей та конструкцій. Наприклад системи DEA DELTA SLANT забезпечують вимірювальний об'єм до 6х2х3 м. Розробка модульних конструкцій дозволяє створювати КВМ з вимірювальним об'ємом до 10х3х5 м.

Розвиток технологій компенсації гравітаційних деформацій дозволяє досягти точності до 3 мкм на метр довжини. Впровадження лазерних інтерферометрів забезпечує прецизійне визначення положення вимірювальної головки.

Розробляються системи активної компенсації температурних деформацій великогабаритних деталей та технології автоматичної корекції траєкторії вимірювання на основі САД-моделей деталей.

Мобільні КВМ є інноваційним рішенням для вимірювальних процесів, які забезпечують високу точність і гнучкість. Цей тип КВМ розроблений для виконання вимірювань у різних умовах, що робить їх особливо корисними для виробництв, де необхідно проводити вимірювання на місці.

Мобільні КВМ мають легку і компактну конструкцію, що дозволяє легко транспортувати їх між різними ділянками виробництва або на об'єкти вимірювань. Це особливо важливо для виробничих процесів, де неможливо або недоцільно переміщати великі деталі до стаціонарних КВМ.

Мобільні КВМ можуть виконувати як контактні, так і безконтактні вимірювання, що дозволяє їм працювати з різними типами матеріалів і форм. Це робить їх універсальними інструментами для контролю якості в багатьох сферах.

Портативні системи, такі як Faro Arm Quantum Max (Рис 1.2в.), дозволяють проводити вимірювання безпосередньо на виробництві з точністю до 0,015 мм в робочому об'ємі до 4,5 м [43]. Розробка легких матеріалів та оптимізованих конструкцій дозволяє зменшити вагу до 7 кг при збереженні жорсткості.

Мобільні КВМ є потужним інструментом, що поєднує в собі точність, гнучкість і зручність у використанні. Вони стають все більш популярними в різних промислових сферах завдяки своїй здатності забезпечувати ефективний контроль якості без необхідності транспортування деталей до стаціонарних КВМ.

КВМ на основі гексаподів це особливий _ ТИП машин, які використовують шестиногу (гексапод) для позиціонування вимірювального зонда. Гексаподи відрізняються ТИМ, ЩО забезпечують високоточне управління рухами в шести ступенях свободи (три лінійні осі і три обертальні). Це дозволяє досягати дуже точної та гнучкої орієнтації зонда в просторі.

КВМ на основі паралельних кінематичних структур забезпечують високу жорсткість конструкції та точність позиціонування. Наприклад, система Hexagon METROLOGY 360° FLEXOMET (Рис 1.2г) забезпечує 6 ступенів свободи при позиціонуванні вимірювальної головки.

Розвиток адаптивних алгоритмів управління дозволяє оптимізувати траєкторію вимірювання та мінімізувати час контролю.

Нанометрологічні КВМ– це високоточні вимірювальні системи, які розроблені для здійснення вимірювань на рівні нанометрів. Вони забезпечують надзвичайну точність, що є критично важливою для сучасних наукових досліджень і високотехнологічного виробництва, особливо у таких галузях, як мікроелектроніка, нанотехнології та виробництво напівпровідників.

Завдяки своїм унікальним можливостям нанометрологічні КВМ є незамінними інструментами у вимірювальних лабораторіях, де критично важлива висока точність і повторюваність на рівні нанометрів.

Розробка систем для вимірювань на нанорівні, таких як SIOS NMM-1 (Рис 1.2д) забезпечує точність до 0,1 нм в об'ємі 25х25х5 мм. Розвиваються системи на основі рентгенівської інтерферометрії для вимірювань з атомарною роздільною здатністю.



Рисунок. 1.2. а – Портальна КВМ, б – Горизонтальна КВМ, в – Мобільна КВМ, г – КВМ на основі гексаподів д, – Нанометрологічна КВМ

Впровадження атомно-силової мікроскопії в КВМ розширює можливості вимірювання наноструктур та аналізу шорсткості поверхонь на нанорівні.

Віртуальні КВМ представляють собою сучасний підхід до вимірювальних процесів, що використовує комп'ютерні технології для моделювання, аналізу та візуалізації вимірювань без необхідності фізичного використання традиційних КВМ. Цей метод набирає популярності в різних галузях, завдяки своїм численним перевагам.

Віртуальні КВМ використовують САD-моделі об'єктів для створення тривимірних симуляцій, що дозволяє інженерам і технікам візуалізувати і аналізувати геометрію без необхідності в реальному об'єкті.

Застосування програмного забезпечення: спеціалізовані програми для моделювання та симуляції, такі як SOLIDWORKS, CATIA або Autodesk Inventor, можуть інтегрувати алгоритми для проведення вимірювань у віртуальному середовищі, що дозволяє проводити аналіз без необхідності у фізичній КВМ.

Віртуальні КВМ дозволяють також проводити оптимізацію конструкцій на етапі проектування, що зменшує ймовірність помилок при виготовленні та контролі якості.

Використання віртуальних КВМ дозволяє знизити витрати на матеріали та ресурси, оскільки не потрібно виготовляти фізичні зразки для тестування.

Завдяки можливостям програмного забезпечення, можна виконувати глибокий аналіз геометричних характеристик, перевірку відповідності стандартам та верифікацію проектних рішень. Також віртуальні КВМ можуть швидко адаптуватися до змін у дизайні або специфікаціях, що робить їх особливо корисними в умовах швидко змінюваних технологічних вимог.

Автоматизовані системи керування КВМ дозволяють значно підвищити ефективність та точність вимірювань, мінімізуючи вплив людського фактора. Впровадження сучасних методів оптимізації, як-от автоматична корекція похибок і адаптивні алгоритми вимірювання, дає змогу забезпечити високу точність навіть у складних умовах роботи. Способи вимірювання.

КВМ використовують різноманітні методи для визначення координат точок на поверхні об'єкта з високою точністю. Залежно від вимог до точності, форми об'єкта і умов вимірювання, застосовують різні способи вимірювання. У даному розділі розглянуто основні методи вимірювання, що використовуються на сучасних КВМ:

1. Контактні методи вимірювання

Контактний метод вимірювання передбачає фізичний контакт між вимірювальним зондом і поверхнею об'єкта. Під час руху зонда по поверхні фіксуються координати точок, за якими потім визначають геометричні параметри деталі. Основні типи контактних вимірювальних зондових систем:

Статичне зондування: При використанні цього методу зонд торкається поверхні об'єкта і фіксує координати точки після зупинки. Метод ефективний для вимірювання окремих точок з високою точністю, але займає більше часу при великій кількості точок.

Скануюче зондування: У цьому випадку зонд рухається по поверхні об'єкта, безперервно фіксуючи координати точок. Цей метод дозволяє отримати детальнішу інформацію про форму об'єкта, підвищуючи швидкість вимірювання, але вимагає більш досконалих алгоритмів обробки даних для забезпечення точності.

2. Безконтактні методи вимірювання

Безконтактні методи використовуються для вимірювання об'єктів, де контакт з поверхнею може бути небажаним або важким. Ці методи також використовуються для швидких і масових вимірювань. Основні технології безконтактних вимірювань:

Оптичні методи: Включають використання лазерних і світлових сенсорів для сканування поверхні об'єкта. Лазерні інтерферометри та триангуляційні системи дозволяють отримати координати точок без фізичного контакту з об'єктом, що підвищує швидкість процесу і знижує ризик механічного пошкодження деталі. Фотоакустичні методи: Вимірювання проводяться шляхом аналізу відбиття звукових хвиль, які виникають під впливом лазера на поверхню. Цей метод дозволяє з високою точністю вимірювати об'єкти зі складною текстурою або матеріалами, які погано піддаються класичному оптичному зондуванню.

3. Комбіновані методи

У деяких випадках для досягнення найвищої точності або при вимірюванні складних деталей застосовуються комбіновані методи. Вони можуть поєднувати контактні та безконтактні підходи для отримання максимально точної інформації. Наприклад, контактне зондування використовується для вимірювання критичних точок, тоді як безконтактне сканування дозволяє швидко оцінити загальну геометрію об'єкта.

4. Мультимодальні системи

Мультимодальні вимірювальні системи КВМ інтегрують кілька різних сенсорів, таких як лазерні, ємнісні, індуктивні або ультразвукові датчики. Це дозволяє виконувати точні вимірювання різних об'єктів і матеріалів у різних умовах. Така гнучкість забезпечує високу продуктивність і надійність, особливо при роботі з неоднорідними або складними поверхнями.

Кожен метод вимірювання має свої переваги і обмеження, тому вибір конкретного способу залежить від поставлених завдань, особливостей об'єкта і вимог до точності. Контактні методи забезпечують високу точність для твердих матеріалів, тоді як безконтактні методи дозволяють вимірювати тендітні або складні деталі з мінімальним ризиком пошкоджень. У сучасних КВМ часто використовуються комбіновані та мультимодальні підходи для досягнення найкращих результатів у вимірювальних процесах.

Автоматичне програмування траєкторії:

Автоматичне програмування траєкторії для вимірювань на КВМ є важливим етапом у процесі контролю якості виробів. Це дозволяє підвищити точність, зменшити час вимірювань та знизити ризик людських помилок. Процес включає кілька основних етапів, які детально розглянемо нижче.

1. Створення 3D-моделі об'єкта

Перед початком вимірювань необхідно створити детальну тривимірну модель об'єкта. Це може бути зроблено за допомогою CAD-систем (Computer-Aided Design), які дозволяють точно відобразити геометрію деталі. Важливо, щоб модель містила всю необхідну інформацію, таку як розміри, форми та специфікації поверхонь.

2. Планування траєкторії

На основі отриманої 3D-моделі фахівці визначають ключові точки, які підлягають вимірюванню. Цей етап може включати аналіз геометрії об'єкта для визначення найбільш критичних зон, що потребують контролю. Автоматичні алгоритми можуть допомогти оптимізувати маршрут, що дозволяє зменшити час вимірювання і підвищити ефективність.

3. Вибір параметрів вимірювання

На цьому етапі фахівець визначає параметри вимірювання, такі як швидкість переміщення, точність, режим вимірювання (контактне чи безконтактне). Вибір режиму вимірювання залежить від матеріалу об'єкта та вимог до точності. Контактні методи, такі як зондове вимірювання, часто використовуються для твердих об'єктів, тоді як безконтактні, наприклад, лазерні системи, підходять для більш делікатних чи нестандартних форм.

4. Генерація програми

Спеціалізоване програмне забезпечення автоматично генерує код програми для КВМ, що включає всі налаштування та параметри. Це програмне забезпечення може враховувати специфічні вимоги виробника КВМ, а також особливості вимірювань, що підвищує сумісність і зручність використання.

5. Симуляція

Перед виконанням програми на реальному об'єкті важливо провести симуляцію. Це дозволяє перевірити правильність траєкторії, виявити потенційні конфлікти або перешкоди, а також оцінити час, необхідний для виконання вимірювань. Симуляція допомагає уникнути помилок, які можуть призвести до пошкодження об'єкта або вимірювальної системи.

6. Виконання вимірювання

Після завершення всіх підготовчих етапів програма завантажується в КВМ і виконує вимірювання відповідно до заданої траєкторії, переміщуючи датчик в заданих координатах. Сучасні КВМ можуть автоматично коригувати траєкторію у разі виявлення відхилень у реальних параметрах об'єкта.

7. Аналіз результатів

Після завершення вимірювання результати аналізуються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Це дозволяє отримати детальну інформацію про геометрію об'єкта, виявити відхилення від стандартів і провести статистичний аналіз. Звіти, що генеруються на основі аналізу, можуть містити графічні та табличні дані, що полегшує подальше прийняття рішень.

Автоматичне програмування траєкторії на КВМ є потужним інструментом, що дозволяє підвищити точність і ефективність вимірювань. Використання сучасних САD-систем, алгоритмів оптимізації та програмного забезпечення для симуляції робить процес контролю якості більш ефективним і надійним. Це важливо не лише для виробництв, але й для забезпечення високих стандартів якості продукції.

Сучасне програмне забезпечення, таке як PC-DMIS, дозволяє автоматично генерувати програми вимірювань на основі CAD-моделей.

Адаптивне сканування – це метод, який застосовується в КВМ для оптимізації процесу вимірювання об'єктів. Цей підхід дозволяє динамічно коригувати траєкторію і параметри вимірювання в реальному часі на основі отриманих даних. Основні аспекти адаптивного сканування включають:

1. Динамічне коригування траєкторії

Адаптивне сканування дозволяє КВМ змінювати траєкторію вимірювання в залежності від геометрії об'єкта. Якщо, наприклад,

з'являються нові деталі або зміни в геометрії, машина може автоматично адаптувати свою маршрут, що забезпечує більш точні результати.

2. Оптимізація швидкості сканування

Система може регулювати швидкість переміщення датчика в залежності від характеристик поверхні. На гладких ділянках швидкість може бути збільшена, тоді як на складних або деталізованих частинах – зменшена для забезпечення високої точності вимірювання.

3. Вибір режиму вимірювання

Адаптивне сканування дозволяє вибирати між різними режимами вимірювання (контактні, безконтактні) залежно від конкретної ситуації. Це забезпечує більшу гнучкість в процесі вимірювання, що є особливо важливим для складних об'єктів.

4. Збір даних у реальному часі

Система в режимі реального часу збирає дані про параметри об'єкта під час сканування. Це дозволяє миттєво виявляти аномалії або відхилення, що дає можливість оперативно реагувати на будь-які зміни.

5. Аналіз отриманих даних

Після завершення сканування система проводить аналіз зібраних даних. Адаптивні алгоритми можуть ідентифікувати ключові характеристики об'єкта, такі як розміри, форма, та відхилення від заданих параметрів, що дозволяє створити точний звіт про якість виробу.

Переваги адаптивного сканування

Підвищена точність: Завдяки динамічному коригуванню та оптимізації, результати вимірювань стають більш точними.

Економія часу: Автоматизація процесу дозволяє зменшити час, необхідний для вимірювання, без втрати якості.

Гнучкість: Адаптивне сканування підходить для вимірювання різних типів об'єктів з різною геометрією та матеріалами.

Зниження ризику помилок: Система автоматично реагує на зміни, що знижує ймовірність людських помилок.

Адаптивне сканування на КВМ є важливим кроком у розвитку технологій вимірювання, яке забезпечує високу точність і ефективність контролю якості. Використання таких сучасних методів дозволяє підприємствам досягати вищих стандартів якості продукції та підвищувати конкурентоспроможність на ринку.

Системи, такі як Hexagon SHINE, автоматично адаптують швидкість сканування та щільність точок вимірювання в залежності від складності поверхні.

1.3 Аналіз дестабілізуючих факторів при вимірюванні на координатно-

вимірювальній машині

При роботі на КВМ важливим аспектом є забезпечення високої точності вимірювань. Однак на результати вимірювань можуть впливати різні дестабілізуючі фактори, які умовно можна поділити на зовнішні та внутрішні [48]. Розуміння цих факторів і розробка методів для їх мінімізації є критичними для підтримки точності та надійності вимірювань.

Зовнішні дестабілізуючі фактори:

1. Температурні коливання. Температура навколишнього середовища є одним із найважливіших факторів, що впливають на точність вимірювань. Коливання температури можуть викликати термічні деформації як у вимірюваних деталях, так і в самій машині. Наприклад, металеві частини КВМ і деталі, що піддаються вимірюванням, розширюються або стискаються при зміні температури, що може призвести до систематичних похибок. Використання температурних компенсаційних моделей, а також підтримання стабільного температурного режиму в приміщенні, де знаходиться КВМ, є важливими заходами для зниження впливу цього фактора.

2. Вібрації. Вібрації можуть бути викликані різними джерелами, включаючи роботу інших машин на виробничому майданчику, рух персоналу, транспортні засоби або навіть неадекватний монтаж самої КВМ. Вібрації впливають на стабільність положення вимірювальних датчиків, що призводить до появи випадкових похибок у вимірюваннях. Для мінімізації цього впливу використовуються антивібраційні платформи, спеціальні кріплення та контроль умов роботи.

3. Пил та забруднення. Наявність пилу і забруднень у приміщенні може суттєво вплинути на точність вимірювань. Забруднення на поверхні деталей або на вимірювальних зондах можуть призвести до неточних контактів між вимірювальним інструментом та поверхнею деталі. Це може викликати похибки у визначенні координат точок вимірювання. Регулярне очищення робочих поверхонь, контроль умов чистоти в приміщенні та використання захисних кожухів є ефективними методами боротьби з цим фактором[49].

Внутрішні дестабілізуючі.

1. Геометричні неточності:

КВМ, навіть при високоточному виготовленні, можуть мати незначні геометричні відхилення, такі як перекоси направляючих, недосконалість форм та поверхонь, а також наявність люфтів у з'єднаннях. Ці неточності можуть призводити до систематичних похибок у вимірюваннях, які важко виявити без детальної калібровки. Сучасні системи КВМ використовують програмне забезпечення, яке може компенсувати такі похибки, але для досягнення найвищої точності необхідна регулярна калібровка машини.

2. Технічний знос:

З часом всі механічні та електронні компоненти КВМ піддаються зносу. Наприклад, направляючі можуть втратити свою жорсткість, що призводить до зростання люфтів, а датчики можуть знизити свою чутливість. Це все разом призводить до збільшення похибок вимірювань. Регулярне технічне обслуговування, заміна зношених частин та проведення профілактичних робіт дозволяють мінімізувати вплив технічного зносу на результати вимірювань.

3. Нестабільність електронних компонентів:

Електронні компоненти КВМ, такі як датчики, контролери та інші вузли, можуть бути чутливими до електромагнітних перешкод, зміни напруги

живлення або інтерференції з іншими електронними пристроями. Ці фактори можуть призвести до нестабільної роботи системи, появи шуму в сигналах та підвищення похибок. Для забезпечення стабільної роботи використовуються захисні фільтри, стабілізатори напруги та екраніровані кабелі.

Методи зниження впливу дестабілізуючих факторів. Для забезпечення високої точності вимірювань на КВМ необхідно застосовувати комплексні підходи до боротьби з дестабілізуючими факторами:

Термокомпенсація – це важливий інструмент для забезпечення високої точності вимірювань на КВМ, особливо в умовах, коли температура навколишнього середовища може змінюватися. Температурні коливання впливають на фізичні властивості матеріалів, викликаючи їхнє розширення або стиснення, що призводить до похибок у вимірювальних даних. Використання моделей термокомпенсації дозволяє враховувати ці зміни в режимі реального часу та автоматично коригувати результати вимірювань. Моделі термокомпенсації ґрунтуються на математичних розрахунках і алгоритмах, які враховують температурні зміни матеріалів як самого об'єкта вимірювання, так і деталей машини, таких як зонд або вимірювальна платформа. Вони побудовані на даних, отриманих під час калібрування КВМ за різних температурних умов, і здатні адаптуватися до поточних змін температури. Це особливо важливо при вимірюваннях високоточних деталей, де навіть незначні температурні коливання можуть значно вплинути на результати. Крім того, сучасні системи термокомпенсації оснащуються температурними сенсорами, які безперервно фіксують температуру в різних частинах КВМ та на об'єкті вимірювання. На основі цих даних система необхідні вносить корективи до вимірювань, мінімізуючи вплив температурних змін на кінцевий результат. Така адаптивність дозволяє зберігати високу точність вимірювань навіть у виробничих умовах, де температурний режим може бути нестабільним або важкоконтрольованим.

Таким чином, термокомпенсація підвищує надійність та точність вимірювань, забезпечуючи стабільність результатів і зменшуючи ризик виникнення помилок, пов'язаних із тепловими деформаціями матеріалів. Використання цієї технології є ключовим аспектом при розробці і експлуатації сучасних КВМ. Використання моделей термокомпенсації дозволяє враховувати температурні зміни в режимі реального часу та коригувати результати вимірювань відповідно до поточних умов.

Антивібраційні заходи є важливим елементом забезпечення точності вимірювань на КВМ, оскільки навіть незначні вібрації можуть суттєво вплинути на результати вимірювань. Вібрації можуть походити від зовнішніх джерел, таких як робота обладнання в сусідніх приміщеннях або рух транспорту, а також від внутрішніх процесів самої машини. Антивібраційні заходи спрямовані на мінімізацію цього впливу і забезпечення стабільної роботи КВМ.

Основними методами боротьби з вібраціями є:

1. Встановлення КВМ на антивібраційні платформи, які поглинають або ізолюють вібраційні коливання. Ці платформи зазвичай виготовляються з матеріалів, що мають високі демпфувальні властивості, наприклад, гуми або спеціальних композитних матеріалів. Їх конструкція також може включати пружинні або пневматичні елементи, що додатково знижують рівень вібрацій.

2. Застосування активних антивібраційних систем

Активні антивібраційні системи використовують датчики для виявлення вібрацій і спеціальні механізми для їхнього нейтралізування в реальному часі. Ці системи працюють за принципом зворотного зв'язку, аналізуючи вібраційні коливання і автоматично коригуючи положення або роботу КВМ. Вони є особливо ефективними у випадках, коли вібрації непередбачувані або змінюються з часом.

3. Вибір оптимального розташування КВМ

Розміщення КВМ у приміщеннях із мінімальним рівнем вібрацій також є важливим фактором. Зазвичай такі машини розташовують в окремих кімнатах або навіть в спеціалізованих лабораторіях, де забезпечуються

стабільні умови навколишнього середовища. Крім того, можуть бути використані додаткові заходи, такі як звукоізоляційні та віброізоляційні стіни для зменшення впливу зовнішніх коливань.

4. Оптимізація конструкції КВМ

Сучасні КВМ розробляються з урахуванням фактору вібраційної стійкості. Це включає використання жорстких, але легких матеріалів у конструкції рами та робочих елементів машини. Такі матеріали знижують вплив вібрацій і підвищують стабільність роботи всієї системи.

5. Програмна компенсація вібрацій

За допомогою датчиків, що вимірюють параметри вібрації, система автоматично вносить корективи до вимірювань або виконує повторні вимірювання для покращення точності. Антивібраційні заходи, так як і термокомпенсація відіграють ключову роль у забезпеченні точності вимірювань на КВМ. Використання механічних, активних і програмних методів дозволяє значно зменшити вплив вібраційних коливань і гарантувати високу стабільність і надійність результатів, навіть у складних виробничих умовах.

Врахування та аналіз дестабілізуючих факторів дозволяє не лише розробити більш точні та надійні системи вимірювання, але й підвищити загальну ефективність виробничих процесів, знижуючи витрати на контроль якості та підвищуючи рівень продуктивності [49].

1.4. Постановка наукової задачі

Контроль складних геометричних поверхонь є одним із найбільш відповідальних етапів виробничого процесу у високотехнологічних галузях, таких як авіакосмічна, автомобільна та машинобудівна промисловості. У цих сферах точність виготовлення та відповідність деталей заданим специфікаціям мають вирішальне значення для безпеки, надійності та ефективності роботи кінцевої продукції. Незважаючи на значний розвиток методів вимірювання, існують суттєві виклики, пов'язані з невизначеністю вимірювань, особливо при роботі зі складними геометричними поверхнями.

Однак навіть найсучасніші КВМ стикаються з проблемами, пов'язаними з невизначеністю вимірювань, які можуть виникати через низку факторів, включаючи геометричну складність поверхні, нестабільність вимірювального інструменту, параметри навколишнього середовища, та людський фактор. Ця невизначеність може призвести до неправильних висновків про відповідність виробів вимогам специфікацій, що, у свою чергу, може вплинути на якість кінцевої продукції.

Наукова проблема полягає в тому, що існуючі методи контролю складних геометричних поверхонь на КВМ не забезпечують достатнього рівня точності при прийнятних затратах часу і ресурсів. Більшість традиційних методів орієнтовані на статичний підхід до вимірювання, який не враховує можливості адаптивної оптимізації стратегії контролю під час процесу вимірювання, що є необхідним для зменшення невизначеності та підвищення ефективності.

Таким чином, наукова задача полягає в розробці комплексного підходу, який включає створення математичної моделі для аналізу та оцінки невизначеності вимірювань, а також розробку адаптивного алгоритму оптимізації стратегії вимірювання. Цей підхід дозволить не тільки мінімізувати невизначеність вимірювань на 15-20%, але й скоротити час, необхідний для проведення вимірювальних операцій, на 10-12% у порівнянні з традиційними методами. Досягнення таких результатів вимагатиме вирішення ряду завдань, включаючи адаптацію існуючих методів до специфіки складних геометричних поверхонь, розробку нових методів обробки даних та інтеграцію їх у сучасні КВМ.

Висновок до розділу 1

У першому розділі дослідження було обґрунтовано актуальність наукової проблематики, пов'язаної з оптимізацією невизначеності вимірювань на КВМ під час контролю складних геометричних поверхонь. В результаті проведеного аналізу літературних джерел було визначено, що існуючі методи контролю не забезпечують достатньо високої точності при прийнятних витратах часу та ресурсів, що актуалізує необхідність розробки нових підходів.

На основі критичного огляду останніх наукових робіт було виявлено низку невирішених проблем, які полягають у недостатньо розроблених методах адаптивної оптимізації стратегії вимірювань, а також у відсутності комплексних математичних моделей, здатних враховувати всі аспекти невизначеності вимірювань для складних поверхонь. Постановка наукової задачі сформульована таким чином, що вона включає розробку математичної моделі та адаптивного алгоритму оптимізації, які дозволять значно зменшити невизначеність вимірювань та скоротити час на їх проведення.

Таким чином, основним висновком цього розділу є необхідність і доцільність проведення дослідження, спрямованого на розробку нових методів і алгоритмів, які дозволять підвищити точність і ефективність контролю складних геометричних поверхонь на КВМ. Це дослідження є важливим кроком до вирішення актуальних проблем у сфері вимірювальних технологій, що має велике значення для промисловості та науки.

Перелік літератури до розділу 1

1. Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry*. Final report of the Industrie 4.0 Working Group.

2. McMurtry, D. (1986). *Probe for coordinate measuring machine*. U.S. Patent No. 4,612,622.

3. Weckenmann, A., & Kunzmann, H. (1998). *The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements*. CIRP Annals, 47(1), 451-454. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62872-8

4. Moroni, G., & Petrò, S. (2011). Coordinate measuring machine measurement planning. In *Geometric Tolerances* (pp. 111-158). https://doi.org/10.1007/978-1-84996-311-4_4

5. Hocken, R.J., & Pereira, P.H. (Eds.). (2011). Coordinate Measuring Machines and Systems (2nd ed.). CRC Press. <u>https://doi.org/10.1201/b11022</u>.

6. Chandrakanth, A., Nandam, S., Rajendra, R., & Krishaniah, A. (2014).
Performance evaluation of machine tool probe for in-process inspection of 2D and
3D geometries. *Procedia Technology*, 14, 244–251.
https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.032

7. Di Giacomo, B., & de Morais, C. A. G. (2015). Calibration of positional errors in coordinate measuring machines and machine tools using a laser interferometer system. *Applied Mechanics and Materials*, 798, 303–307. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.798.303

8. Boutarfa, A., & Bouguechal, N.-E. (2008). A new approach for an automated inspection system of the manufactured parts. *Journal of Automation and Control*, 206(4). https://doi.org/10.2316/Journal.206.2008.4.206-3124

9. Іволгіна, Т. О. (2008). Методи системи стабілізації руху вимірювальної головки координатно-вимірювальної машини [Дисертація кандидата технічних наук].

10. Savio, E., De Chiffre, L., & Schmitt, R. (2007). Metrology of freeformshapedparts.CIRPAnnals,56(2),810-835.https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.008

11. Woźniak, A., Krajewski, G., & Byszewski, M. (2018). A new method for examining the dynamic performance of coordinate measuring machines. Measurement, 134, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.041

Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., & Kunzmann, H. (2002). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. CIRP Annals, 51(2), 685-699. DOI:<u>10.1016/S0007-8506(07)61707-7</u>

13. Nuccio, S., & Spataro, C. (2003). Approaches to evaluate the virtual instrumentation measurement uncertainties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *51*(6), 1347-1352. https://doi.org/10.1109/TIM.2002.808036

14. Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). *Error compensation in machine tools—a review: Part II: thermal errors*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(9), 1257-1284. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00010-9

15. Zhang, Y., Yang, J., & Jiang, H. (2011). Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *59*(9-12). https://doi.org/10.1007/s00170-011-3564-3

16. Zhang, H., & Zhang, J. (2014). Dynamic modeling and analysis of the high-speed ball screw feed system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 229*(5), 810–819. https://doi.org/10.1177/0954405414534641

17. Acaccia, G., Bruzzone, L., & Razzoli, R. (2008). A modular robotic system for industrial applications. *Assembly Automation*, 28(2), 151-162. https://doi.org/10.1108/01445150810863734

18. Ge, G., Du, Z., & Feng, X. (2020). An integrated error compensationmethod based on on-machine measurement for thin web parts machining.PrecisionEngineering,63,206-213.https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.03.002

19.Gapinski, B., Wieczorowski, M., Marciniak-Podsadna, L., & Dybala, B. (2014). Comparison of different methods of measurement geometry using CMM, optical scanner, and computed tomography 3D. *Procedia Engineering*, *69*, 255–262. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.230

20. Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D. A., & Mastrogiacomo, L. (2011). *Distributed large-scale dimensional metrology: New insights*. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-543-9

21. Gebreselassie, G. T., & Rajendra, R. (2025). Experimental and numerical analysis for safe measurement location on M544 CMM working table. *Momona Ethiopian Journal of Science, 17*(1), 157–170. https://doi.org/10.4314/mejs.v17i1.10

22. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). *A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*. Manufacturing Letters, 3, 18-23. DOI:10.1016/j.mfglet.2014.12.001

23. Franceschini, F., Galetto, M., & Maisano, D. (2007). *Management by measurement: designing key indicators and performance measurement systems*. Springer Science & Business Media. DOI:<u>10.1007/978-3-540-73212-9</u>

24. Herrera-Basurto, R., & Simonet, B. M. (2013). Nanometrology. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (2013 ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9177

25. Передерко, А. Л. (2010). Метод компенсації випадкової похибки, внесеної зовнішніми вібраційними впливами при проведенні вимірів на координатно-вимірювальній машині. Вісник Вінницького політехнічного інституту, (3-4), 53-56.

26. Youssef, M. A., & Al-Ahmady, B. (2002). Quality management practices in a flexible manufacturing systems (FMS) environment. *Total Quality Management*, *13*(6), 877–890. https://doi.org/10.1080/0954412022000010217

27. Saadat, M. (2011). Challenges in the assembly of large aerospace components. In *Integrated Systems, Design and Technology 2010* (pp. 37–46). https://doi.org/10.1007/978-3-642-17384-4_4

28. Moroni, G., & Petrò, S. (2008, July). CMM measurement uncertainty reduction via sampling strategy optimization. *Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. https://doi.org/10.1115/ESDA2008-59388

29. Stout, K. J., Blunt, L., Dong, W. P., Mainsah, E., Luo, N., Mathia, T., Sullivan, P. J., & Zahouani, H. (2002). *Development of methods for characterisation of roughness in three dimensions* (1st ed.). Elsevier.

30. De Groot, P. J., & Badami, V. G. (2022). *Revolutions in optical metrology in the era of Big Data and Industry 4.0.* CIRP Winter Meeting. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27145.11366

31. Zhang, X., Wang, Z., Liu, Y., & Yang, J. (2020). A multisensor data fusion method based on Gaussian process model for precision measurement of complex surfaces. *Sensors*, 20(1), 278. https://doi.org/10.3390/s20010278

32. Gill, P. (2011). *When should we change the definition of the second* Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 369(1953), 4109-4130. <u>https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0237</u>

33. Schmitt, R., & Peterek, M. (2011). Measurement in production: Challenges, trends, and solutions. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(1), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.02.001

34. Lanza, G., Niggeschmidt, S., & Maier, T. (2009). A proposal for toolsetting data integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 415-422. https://doi.org/10.1007/s00170-008-1535-0

35. Zhang, S., Wallscheid, O., & Porrmann, M. (2023). Machine learning for the control and monitoring of electric machine drives: Advances and trends. *IEEE Open Journal of Industry Applications, PP(99)*, 1–28. <u>https://doi.org/10.1109/OJIA.2023.3284717</u>

36. Živković, S. (2011). Optimisations of free form surfaces measuring usingcoordinatemetrologymethods.ResearchGate.https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15417.88165

37. Jogalekar, P., & Woodside, M. (2000). Evaluating the scalability of distributed systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 11(6), 589-603. https://doi.org/10.1109/71.862209

38. Geng, Z., & Tong, Z. (2021). Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools. *Light: Advanced Manufacturing*, *2(1)*, 1-17. https://doi.org/10.37188/lam.2021.014

39. Pätoprstý, B., & Vozar, M. (2024). Comparison of optical 3D scanner and coordinate measurement system from the standpoint of macro-geometry measurement. *Journal of Measurements in Engineering*, *12(1)*. https://doi.org/10.21595/jme.2023.23533

40. Vrakas, D., Tsoumakas, G., Bassiliades, N., & Vlahavas, I. (2004). Machine learning for adaptive planning. In *Intelligent Techniques for Planning* (Chapter 3). https://doi.org/10.4018/9781591404507.ch003

41. Ferreira, F. A. M., de Vicente y Oliva, J., & Sánchez Pérez, Á. M. (2013). Evaluation of the performance of coordinate measuring machines in the industry, using calibrated artefacts. *Procedia Engineering*, *63*, 659-668. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.232

42. Lyons, K. W., & Postek, M. T. (2008). Metrology at the nanoscale: What are the grand challenges? *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. https://doi.org/10.1117/12.798004

43. Elster, C., & Link, A. (2008). Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system. *Metrologia*, 45(4), 464. https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/4/013

44. Huang, X., Zhang, S., Han, K., Lu, Z., Guo, L., & Sun, M. (2024). Analysis and testing of temperature adaptability of large-scale body-mounted radiator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64, 105476. <u>https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105476</u>

45. Weckenmann, A., Jiang, X., & Sommer, K.-D. (2009). Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 58(2), 701-721. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.008

46. Weekers, W. G., & Schellekens, P. H. J. (2002). Compensation for dynamic errors of coordinate measuring machines. *Measurement, 20(3),* 197-209. https://doi.org/10.1016/S0263-2241(97)00032-8 47. Lopez, M. R., Sergiyenko, O., & Tyrsa, V. (2008). Machine vision: Approaches and limitations. In *Computer Vision*. https://doi.org/10.5772/6156

48. Sładek, J. (2016). Coordinate metrology - Accuracy of systems and measurements. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48465-4

49. Limanova, N. I. (1998). Precision measurement of displacement and linear position in the conditions of destabilizing factors influence using multichannel fiber optic sensors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. https://doi.org/10.1117/12.298219

2. Методи та моделі процесу вимірювання на координатно-вимірювальній

машині

Проведено огляд основних методів та моделей процесу вимірювання на КВМ. У ньому детально аналізуються теоретичні та практичні аспекти вимірювань, що дозволяють підвищити точність, надійність та ефективність оцінки геометричних параметрів деталей.

Проведено синтез структури КВМ, який включає моделювання кінематичних схем, аналіз конструктивних особливостей та оптимізацію параметрів вимірювальної системи для забезпечення максимальної точності вимірювань.

Особлива увага приділена алгоритмам вимірювання на КВМ, які визначають порядок збору та обробки даних. Включено розгляд методів адаптивного планування траєкторії вимірювального зонда, алгоритмів корекції похибок та методів статистичної обробки результатів вимірювання.

Розглянуто підходи до вимірювання об'єктів із нелінійною геометрією, зокрема, турбінних лопаток, деталей з вільно формованими поверхнями та складних профілів. Аналізуються математичні моделі апроксимації таких поверхонь, а також методи автоматичного коригування похибок.

Таким чином, цей розділ надає комплексний підхід до вимірювань на КВМ, забезпечуючи розуміння методів, моделей та алгоритмів, що використовуються для підвищення точності та ефективності вимірювань.

Основні результати даного розділу, які отримані автором, представлені в роботах автора [6, 20, 21, 26, 33].

2.1 Метод вимірювання на КВМ

Метод вимірювання на КВМ базується на використанні високоточних датчиків і механізмів для визначення просторових координат точок на поверхні об'єкта. Основним завданням цього методу є отримання даних, що дозволяють точно відтворити геометрію вимірюваного виробу для подальшого аналізу та контролю якості [1]. Процес вимірювання на КВМ включає декілька етапів:

1. Підготовка до вимірювання: Вибір та встановлення об'єкта на вимірювальній платформі КВМ. Об'єкт фіксується за допомогою спеціальних пристроїв, що мінімізують його рухливість під час вимірювання. для опису точності фіксації об'єкта на платформі, зокрема, використовувати математичні моделі для врахування похибок, пов'язаних з переміщеннями або коливаннями об'єкта при фіксації. Вираз для обчислення відхилення об'єкта при фіксації показано на (1):

$$\Delta X = \sqrt{\left(X_{cnpasschill} - X_{nnampopmu}\right)^2 + \left(Y_{cnpasschill} - Y_{nnampopmu}\right)^2 + \left(Z_{cnpasschill} - Z_{nnampopmu}\right)^2}, \quad (1)$$

де $X_{справжній}, Y_{справжній}, Z_{справжній}$ – реальні координати об'єкта, $X_{платформи}, Y_{платформи}, Z_{платформи}$ – координати платформи КВМ.

Для більш детального аналізу похибок фіксації можна застосувати тензорну модель деформації, яка враховує не тільки зміщення, але й обертання та деформацію об'єкта [2]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right),$$
(2)

де ε_{ij} – компоненти тензора деформації, u_i – компоненти вектора переміщення, x_j – координати. Для врахування впливу температурних деформацій при фіксації можна використати співвідношення [3]:

$$\Delta L_T = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T^2), \qquad (3)$$

де ΔL_{T} – зміна розміру внаслідок температурного впливу, L_{0} – початковий розмір, α – коефіцієнт лінійного температурного розширення, β – коефіцієнт нелінійності температурного розширення, ΔT – різниця температур. Сумарна похибка позиціонування при фіксації може бути описана через матрицю коваріації:

$$C_{p} = \begin{pmatrix} \sigma_{x}^{2} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz}^{2} & \sigma_{yz} & \sigma_{yz} & \sigma_{z}^{2} \end{pmatrix}, \qquad (4)$$

де $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ – дисперсії похибок по відповідних осях, σ_{xz}, σ_{yz} – коваріації похибок між осями. Узагальнена формула для оцінки максимальної похибки позиціонування з урахуванням усіх факторів:

$$\Delta P_{max} = \Delta P_{base} + \Delta P_T + \Delta P_{stress} + \Delta P_{vib} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sin(\omega t) , \qquad (5)$$

де ΔP_{base} – базова похибка фіксації, ΔP_T – температурна складова похибки, ΔP_{stress} – деформаційна складова, ΔP_{vib} – амплітуда вібраційної складової, λ – коефіцієнт загасання вібрацій, ω – частота вібрацій, t – час після фіксації. Для статистичної оцінки точності фіксації на основі попередніх вимірювань можна застосувати байєсівський підхід [4]:

$$P(\theta \mid D) = \frac{P(D \mid \theta)P(\theta)}{P(D)} = \frac{P(D \mid \theta)P(\theta)}{\int P(D \mid \theta')P(\theta')d\theta'},$$
(6)

де $P(\theta | D)$ – апостеріорна ймовірність параметрів моделі фіксації θ при наявних даних, $P(D | \theta)$ – функція правдоподібності, $P(\theta)$ – апріорна ймовірність параметрів.

2. Вибір і налаштування датчиків: Залежно від типу та складності вимірюваного об'єкта вибирається відповідний датчик. Для вимірювання поверхонь різної складності можуть використовуватися контактні або безконтактні датчики. Важливим аспектом є калібрування датчика для забезпечення високої точності вимірювань. Точності калібрування датчика визначається виразом [5]:

$$E_{\kappa a \pi i \delta \rho o \kappa a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| D_{\partial i \tilde{u} c + e} - D_{\omega m i \rho \pi + e} \right|}{n},$$
(7)

де $D_{\partial i \tilde{u} c h e}$ – дійсне значення, отримане в процесі калібрування; $D_{виміряни\tilde{u}}$ – виміряне значення, отримане датчиком; n – кількість вимірів.

3. Визначення траєкторії вимірювання: Траєкторія руху вимірювального датчика по поверхні об'єкта визначається з урахуванням особливостей геометрії виробу. Для складних просторових поверхонь траєкторія може бути складною і потребує попереднього моделювання. Траєкторія руху датчика може бути визначена через параметричні рівняння або через математичні моделі для складних поверхонь. Якщо поверхня об'єкта описується функцією *f*(*x*, *y*), то траєкторія руху датчика може бути задана як:

$$r(t) = [x(t), y(t), f(x(t), y(t))],$$
(8)

де y(t) – координати датчика в площині вимірювання; f(x(t), y(t)) – функція, що описує поверхню об'єкта в точці (x(t), y(t)). Для складних просторових поверхонь траєкторія може бути складною і потребує попереднього моделювання.

Вимірювальний зонд КВМ повинен пройти через задані контрольні точки, забезпечуючи рівномірне покриття всієї поверхні. У випадку вільноформованих поверхонь застосовуються алгоритми апроксимації та адаптивного планування маршруту.

Ключові параметри траєкторії вимірювання. Процес вимірювання складається з наступних елементів:

1. Точки вимірювання — місця, де вимірювальний зонд контактує з поверхнею деталі. Кількість точок визначається виходячи з необхідної точності та складності форми поверхні. Для регулярних геометричних форм достатньо рівномірного розподілу точок, а для складних поверхонь використовується адаптивна дискретизація [6]:

$$N = \frac{A}{d^2},\tag{9}$$

де A – площа вимірюваної поверхні, d – середня відстань між точками.

2. Перехідні траєкторії – шляхи між точками вимірювання можуть бути оптимізовані за мінімальною довжиною або з урахуванням динамічних обмежень на рух КВМ. Найкоротший шлях між двома точками визначається евклідовою відстанню [7]:

$$L = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2},$$
(10)

де L – загальна довжина шляху або траєкторії між точками на КВМ, N – кількість точок вимірювання, i – індекс, що позначає поточну точку на траєкторії, x_{i,y_i,z_i} – координати точки i у тривимірному просторі.

3. Точки відходу – безпечні позиції для переміщення над деталлю, визначаються з урахуванням можливих перешкод і необхідності уникнення зіткнень. Координати точки відходу можна визначити як:

$$(x_{safe}, y_{safe}, z_{safe}) = (x_i, y_i, z_{max} + h_{safe}),$$
(11)

де Z_{max} – максимальна висота деталі, h_{safe} – безпечний запас висоти.

4. Аналітичне задання траєкторії

Якщо поверхня об'єкта описується функцією f(x,y), то траєкторія руху датчика може бути задана через параметричні рівняння [7]:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = f(x(t), y(t)) \end{cases}$$
(12)

Для деяких класів поверхонь параметризація може мати вигляд:

$$\begin{cases} x = rcos(\theta) \\ y = rsin(\theta) , \\ z = f(x, y) \end{cases}$$
(13)

що використовується для вимірювання циліндричних або сферичних об'єктів.

Типи руху КВМ. КВМ використовують різні типи руху під час виконання вимірювань:

 Прямолінійний рух по осях X, Y,Z Використовується для точкового вимірювання та простих траєкторій. Швидкість переміщення обмежується апаратними можливостями КВМ:

$$v_{max} = \min(v_x, v_y, v_z). \tag{14}$$

– Інтерполяційний рух [8]:

а) Лінійна інтерполяція:

$$r(t) = (1-t)r_1 + tr_2, t \in [0,1].$$
(15)

б) Кругова інтерполяція:

$$\begin{cases} x = Rcos(\omega t) + x_0, \\ y = Rsin(\omega t) + y_0, \\ z = z_0. \end{cases}$$
(16)

в) Сплайнова інтерполяція, використовується для згладженого руху по складних поверхнях:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n} a_{i}t^{i}, y(t) = \sum_{i=0}^{n} b_{i}t^{i}, z(t) = \sum_{i=0}^{n} c_{i}t^{i}.$$
(17)

Прискорення та сповільнення на початку і кінці переміщення. Застосовується для зниження динамічних похибок і вібрацій. Профіль швидкості може описуватися рівняннями кінематичного розгону та гальмування [9]:

$$v(t) = v_{max}(1 - e^{-\alpha t}).$$
 (18)

Відповідне положення у момент часу t визначається інтегруванням швидкості:

$$s(t) = \int_{0}^{t} v(\tau) d\tau.$$
⁽¹⁹⁾

3. Оптимізація траєкторії вимірювання. Задача мінімізації довжини траєкторії може бути сформульована як оптимізаційна проблема [10]:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (\Box r_{30H\partial}(t) - r_{peanbh}(t) \Box^2 + \lambda \Box \dot{r}_{30H\partial}(t) \Box^2) dt, \qquad (20)$$

де $r_{3ohd}(t)$ – фактична траєкторія, $r_{peanbh}(t)$ – бажана траєкторія, λ – коефіцієнт регуляризації.

Правильне планування траєкторії вимірювання дозволяє знизити похибки та вібрації, мінімізувати час вимірювання, зменшити знос компонентів КВМ, підвищити якість зібраних даних для подальшої обробки.

4. Зняття вимірів: Під час руху датчика по траєкторії відбувається зчитування координатних даних точок поверхні об'єкта. Ці дані записуються і зберігаються для подальшої обробки. Цей етап включає розрахунок похибок, що виникають під час вимірювання. Наприклад, якщо датчик дає відхилення при вимірюванні координат, можна використати модель похибки:

$$\Delta P = P_{\text{peanshe}} - P_{\text{sumipsue}},\tag{21}$$

де *P*_{реальне} – реальне значення вимірюваної координати; *P*_{виміряне} – значення, отримане при вимірюванні.

5. Обробка та аналіз даних: Отримані координатні дані обробляються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. На цьому етапі проводиться аналіз відхилень від номінальних значень, визначаються допуски, та приймається рішення щодо відповідності виробу заданим вимогам. Аналіз отриманих даних може включати статистичні методи, такі як оцінка дисперсії та середнього квадратичного відхилення для виявлення систематичних та випадкових похибок. Середньо квадратичне відхилення розраховується за виразом [11]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2} , \qquad (22)$$

де X_i – значення, отримане в результаті вимірювання; \overline{X} – середнє значення вимірюваних даних.

6. Оформлення результатів вимірювання: Результати вимірювання оформлюються у вигляді звітів, що включають графічні та текстові дані про геометричні характеристики об'єкта.

Метод вимірювання на КВМ забезпечує високу точність і швидкість збору даних, що є ключовим фактором для контролю якості продукції в різних галузях промисловості. Даний метод також дозволяє автоматизувати процеси контролю, підвищуючи ефективність виробництва та знижуючи людський фактор.

2.2 Синтез структури КВМ

Синтез структури КВМ є ключовим етапом розробки цієї складної системи. Метою синтезу структури є визначення оптимальної конфігурації компонентів КВМ, яка забезпечить високу точність, надійність та ефективність вимірювань. Цей процес включає аналіз вимог до вимірювань,
вибір відповідних механічних, електронних та програмних компонентів, а також їх інтеграцію в єдину систему [12].

Основні етапи синтезу структури КВМ:

1. Визначення вимог до вимірювальної системи: На першому етапі здійснюється аналіз вимог до точності, швидкості, діапазону вимірювань та умов експлуатації КВМ. Ці вимоги визначаються залежно від специфіки задач, які будуть вирішуватися за допомогою КВМ, та типу об'єктів, що будуть вимірюватися. Основний параметр точності можна описати як максимальну допустиму похибку вимірювання [13]:

$$\Delta L = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial L}{\partial x_i} \Delta x_i\right)^2},$$
(23)

де L – вимірювана величина, x_i – параметри, що впливають на точність, Δx_i – похибки окремих параметрів.

2. Вибір конструкційної схеми КВМ: Існує кілька типових конструкційних схем КВМ, таких як портальні, мостові, консольні та інші. Вибір схеми залежить від розмірів, маси та форми вимірюваних об'єктів, а також від необхідної точності вимірювань. Портальні машини, наприклад, є найбільш універсальними і часто використовуються для вимірювань великогабаритних деталей. Наприклад, для портальної схеми деформація конструкції може бути розрахована за допомогою рівняння жорсткості [14]:

$$f = \frac{FL^3}{3EI},\tag{24}$$

де *f* – максимальне прогинання, *F* – прикладене навантаження, *L* – довжина елемента, *E* – модуль пружності матеріалу, *I* – момент інерції перерізу.

3. Розробка кінематичної схеми: Кінематична схема визначає конфігурацію рухомих і нерухомих елементів КВМ, а також їх взаємодію. Важливою частиною цього етапу є визначення кількості ступенів свободи, які необхідні для вимірювання об'єктів заданої складності. Як правило, КВМ мають три лінійні ступені свободи (*X*, *Y*, *Z*) і можуть бути додатково оснащені поворотними осередками. Кінематична структура КВМ визначає

кількість ступенів свободи (DOF), необхідних для вимірювання. Загальна кінематична модель руху КВМ описується рівняннями [15]:

$$P = T_x T_y T_z R_\alpha R_\beta R_\gamma, \tag{25}$$

де $T_x T_y T_z$ – матриці трансформації, $R_{\alpha} R_{\beta} R_{\gamma}$ – матриці обертання.

4. Вибір і розміщення датчиків: Для забезпечення високої точності вимірювань необхідно правильно вибрати і розмістити датчики позиції та переміщення. Датчики можуть бути лінійними або кутовими, контактними або безконтактними. Їх точність, стабільність і швидкість роботи є критичними параметрами. Використання лінійних датчиків переміщення описується рівнянням [16]:

$$x(t) = x_0 + vt + \frac{1}{2}at^2,$$
(26)

де x_0 – початкова координата, v – швидкість переміщення, a – прискорення.

5. Розробка механічної структури: На цьому етапі здійснюється проектування механічних компонентів КВМ, таких як направляючі, приводні механізми, платформи та інші частини. Механічна структура повинна забезпечувати жорсткість і стабільність машини під час роботи, а також мінімізувати деформації під впливом зовнішніх факторів, таких як вібрації або температурні зміни. Жорсткість направляючих впливає на точність системи і може бути оцінена через модуль Юнга [17].

6. Вибір системи управління: Для забезпечення точного позиціонування та координації роботи всіх компонентів КВМ розробляється система управління. Вона включає контролери, приводи, інтерфейси користувача і програмне забезпечення. Важливою частиною цього етапу є також забезпечення інтеграції з іншими інформаційними системами підприємства для автоматизації процесів вимірювання та обробки даних. Автоматичне управління може бути описане рівнянням ПІД-регулятора [18]:

$$p(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$
(27)

де e(t) – похибка позиціонування, K_p, K_i, K_d – коефіцієнти регулятора.

7. Моделювання та оптимізація структури: Після визначення основних компонентів і їх взаємодії здійснюється моделювання роботи КВМ з метою оцінки її ефективності. В процесі моделювання аналізуються можливі джерела похибок і нестабільності, після чого проводиться оптимізація структури з урахуванням знайдених проблем.

Для аналізу точності моделі використовується метод кінцевих елементів (МКЕ), що дозволяє визначити напруження та деформації в конструкції.

8. Побудова прототипу і випробування: Завершальним етапом синтезу структури КВМ є створення прототипу і його випробування в умовах, максимально наближених до реальних. За результатами випробувань проводяться необхідні коригування конструкції та системи управління для забезпечення відповідності заданим вимогам. На цьому етапі здійснюються тестові вимірювання для перевірки відповідності КВМ технічним вимогам. Середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань визначається за формулою [19]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2},$$
(28)

де x_i – окремі виміряні значення, x – середнє значення, N – кількість вимірювань.

Результатом синтезу структури КВМ є створення системи, яка здатна ефективно і точно виконувати вимірювальні завдання, враховуючи всі особливості вимірюваних об'єктів і умов експлуатації. Оптимізація структури дозволяє мінімізувати похибки та підвищити продуктивність вимірювальної системи.

2.3 Алгоритми вимірювання на КВМ

Алгоритми вимірювання на КВМ є критично важливими для забезпечення точності, надійності та ефективності процесу вимірювання складних геометричних поверхонь [20]. Вони визначають послідовність дій, необхідних для збирання, обробки та інтерпретації даних, отриманих від датчиків КВМ (Рисунок 2.1), а також для автоматичного коригування параметрів вимірювання в реальному часі.



Рисунок 2.1. Алгоритм вимірювання на КВМ

Основні етапи розробки алгоритмів вимірювання на КВМ:

1. Попередній аналіз вимірювальних завдань: На цьому етапі визначаються основні вимоги до вимірювального процесу, такі як точність, швидкість, та специфіка об'єктів, які будуть вимірюватися. Важливо врахувати геометричні особливості об'єктів, їх розмір, матеріал, та тип поверхні, що впливає на вибір відповідного алгоритму. Також для першого етапу важливим є визначення загальної похибки вимірювань [21]:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{sys}^2 + \sigma_{rand}^2}, \qquad (29)$$

де σ_{total} – загальна похибка вимірювань, σ_{sys} – систематична похибка, σ_{rand} – випадкова похибка.

2. Розробка траєкторії вимірювального зонда: Алгоритми вимірювання повинні забезпечувати оптимальну траєкторію руху вимірювального зонда для досягнення максимальної точності і швидкості.

$$\min\sum_{i=1}^{n} d_i,\tag{30}$$

де d_i відстань між сусідніми точками і розраховується за рівнянням (10):

$$d_{i} = \sqrt{\left(x_{i+1} - x_{i}\right)^{2} + \left(y_{i+1} - y_{i}\right)^{2} + \left(z_{i+1} - z_{i}\right)^{2}}.$$
(31)

Ця траєкторія залежить від форми об'єкта і має враховувати можливі перешкоди, які можуть виникнути під час зонда. Часто руху використовуються автоматичного планування траєкторій, методи які враховують геометрію деталі та особливості 11 розташування на вимірювальній платформі.

3. Обробка та фільтрація вимірювальних даних: Алгоритми повинні забезпечувати ефективну обробку даних, отриманих від датчиків. Це включає фільтрацію шумів, корекцію похибок вимірювання, та інтерполяцію відсутніх даних. На цьому етапі важливо враховувати можливі систематичні та випадкові похибки, які можуть виникати через недосконалість вимірювального обладнання або зовнішні впливи. Алгоритми повинні усувати шум та похибки вимірювання. Для фільтрації може застосовуватися середньозважене згладжування [22]:

$$X_{filtred} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_i, \qquad (32)$$

де X_i- виміряні значення координат, N – кількість вимірювань.

4. Корекція похибок в реальному часі: Один з важливих аспектів сучасних алгоритмів вимірювання – це здатність до корекції похибок в реальному часі. Такі алгоритми можуть автоматично коригувати траєкторію зонда або параметри вимірювання в залежності від виявлених відхилень. Наприклад, алгоритм може враховувати теплове розширення матеріалу, вплив вібрацій, або відхилення в роботі приводів. Вираз (17) дозволяє

коригувати вимірювання в реальному часі, враховуючи три основні фактори, що впливають на точність КВМ:

$$\Delta x^{i} = J^{i}_{i} \Delta q^{j} + \varepsilon^{i} + \alpha T \Delta T + \beta \omega^{2} + \gamma \delta, \qquad (33)$$

де J_j^i – матриця Якобі, що описує чутливість координатних змін до зміни конфігурації КВМ, Δq^j – зміни в конфігураційному просторі, ε_i – випадкові похибки, $\alpha T \Delta T$ – похибка, спричинена тепловим розширенням матеріалу, α – коефіцієнт теплового розширення, T – температура, ΔT – зміна температури, $\beta \omega^2$ – похибка, викликана вібрацією, β – коефіцієнт впливу, ω – кутова швидкість коливань, $\gamma \delta$ – похибка, спричинена відхиленнями в роботі приводів, γ – коефіцієнт, що враховує характеристики приводу, δ – фактичне відхилення.

5. Аналіз та інтерпретація результатів вимірювань: Після збору і обробки даних здійснюється їх аналіз та інтерпретація. Алгоритми на цьому етапі повинні забезпечувати автоматичне визначення геометричних параметрів об'єкта, таких як розміри, кути, радіуси кривизни і т.д. Ці дані можуть бути використані для контролю якості або для подальшої обробки в CAD/CAM системах. Обробка та аналіз даних, яка враховує різні види похибок, фільтрацію даних та апроксимацію поверхні визначається [23]:

$$\hat{x}^{i} = x^{i} + J^{i}_{j} \Delta q^{j} + \varepsilon^{i} + \sum_{k=1}^{N} w_{k} f_{k}(x^{i}) - \lambda \frac{\partial^{2} x^{i}}{\partial s^{2}} + \mu \frac{\partial^{4} x^{i}}{\partial s^{4}}, \qquad (34)$$

де \hat{x}^i – скориговані координати після обробки, \hat{x} – початкові виміряні координати, $J_j^i \Delta q^j$ – корекція на зміну конфігурації КВМ, ε^i – випадкові похибки вимірювань, $\sum_{k=1}^{N} w_k f_k(x^i)$ – апроксимація вимірюваних точок за допомогою базисних функцій, w_k – вагові коефіцієнти, $-\lambda \frac{\partial^2 x^i}{\partial s^2}$ – регуляризація згладжування (усереднення), що пригнічує високочастотні шуми, $\mu \frac{\partial^4 x^i}{\partial s^4}$ – корекція форми для збереження гладкості кривини вимірюваної поверхні. Ця модель поєднує корекцію систематичних похибок, фільтрацію шуму та апроксимацію складних поверхонь, що забезпечує точніший аналіз вимірюваних даних.

6. Оптимізація вимірювального процесу: В процесі вимірювання важливо забезпечити максимальну ефективність використання ресурсу КВМ, що включає мінімізацію часу вимірювання та зменшення зносу механічних компонентів. Алгоритми повинні автоматично оптимізувати параметри вимірювання, такі як швидкість руху зонда, кількість точок вимірювання, та інші параметри, що впливають на загальну продуктивність. Для мінімізації часу вимірювання застосовується алгоритм мінімізації переміщень [24]:

$$T_{opt} = \min \sum_{i=1}^{n} \frac{di}{vi},\tag{35}$$

де *v_i* – швидкість переміщення зонда між точками вимірювання.

7. Інтеграція з іншими системами: Сучасні КВМ часто інтегровані з іншими інформаційними системами, такими як системи управління виробництвом (MES), системи автоматизованого проектування (CAD), або системи управління якістю (QMS). Алгоритми вимірювання повинні забезпечувати безперервний обмін даними між цими системами, автоматичне формування звітів, та зберігання результатів вимірювань в базах даних.

Передбачається зв'язок з CAD/CAM системами, що дозволяє автоматично порівнювати отримані координати з номінальними значеннями:

$$\Delta X = X_{meas} - X_{nom},\tag{36}$$

де X_{meas} – виміряні координати, X_{nom} – номінальні координати.

8. Тестування та валідація алгоритмів: Перед впровадженням в робочий процес, алгоритми вимірювання повинні бути ретельно протестовані на реальних об'єктах і в умовах, максимально наближених до виробничих. Це дозволяє виявити та усунути можливі проблеми, пов'язані з точністю, стабільністю та надійністю алгоритмів. Перед впровадженням алгоритми проходять перевірку на тестових деталях. Для цього визначається точність вимірювань за формулою [25]:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n} |X_i - X_{true}|}{n},$$
(37)

де X_{true} – еталонні значення координат.

Таким чином, ефективні алгоритми вимірювання на КВМ є основою для забезпечення високої якості та точності вимірювань, особливо у випадках складних просторових поверхонь. Вони дозволяють автоматизувати вимірювальний процес, знижувати ризики виникнення похибок та підвищувати загальну ефективність виробничих процесів.

2.4 Вимірювання складних просторових поверхонь на КВМ

Вимірювання складних просторових поверхонь на КВМ є важливим завданням, яке потребує застосування спеціальних методик та підходів [26]. Складні просторові поверхні, такі як лопатки турбін, лопаті вентиляторів, деталі з вільно формованими поверхнями та інші елементи з нелінійною геометрією, потребують особливого підходу до вимірювання через їх складну форму та високі вимоги до точності.

Основні аспекти вимірювання складних поверхонь на КВМ:

1. Вибір відповідних датчиків та зондів:

Для вимірювання складних просторових поверхонь важливо правильно вибрати тип датчиків та зондів, які будуть використовуватися на КВМ. Зазвичай використовуються контактні або безконтактні датчики, залежно від вимог до точності та характеру поверхні. Контактні датчики забезпечують високу точність, але можуть бути обмежені в доступі до деяких ділянок поверхні. Безконтактні датчики, такі як лазерні або оптичні сканери, дозволяють вимірювати складні поверхні з високою швидкістю та без фізичного контакту з об'єктом. Для корекції координат вимірювальної точки

P(x,y,z), з урахуванням похибок зонда та деформацій матеріалу, використовується рівняння:

$$P_{\rm kop} = P + \Delta P_{\rm 30H,I} + \Delta P_{\rm Mat}, \qquad (38)$$

де $P_{\kappa op}$ — скориговані координати точки, ΔP_{3oho} — похибка, викликана геометричними характеристиками вимірювального зонда, ΔP_{Mam} — зміщення, викликане деформацією матеріалу під дією зонда.

2. Планування траєкторії вимірювального зонда:

Вимірювання складних поверхонь потребує ретельного планування траєкторії вимірювального зонда. Оптимальна траєкторія може бути визначена шляхом мінімізації функціоналу [27]:

$$J = \int_{0}^{T} \left(w_{1} \left| \frac{d^{2} x}{dt^{2}} \right|^{2} + w_{2} \left| \frac{d^{2} y}{dt^{2}} \right|^{2} + w_{3} \left| \frac{d^{2} z}{dt^{2}} \right|^{2} \right) dt,$$
(39)

де J – функціонал мінімізації кривизни траєкторії, w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, $\frac{d^2x}{dt^2}$, $\frac{d^2y}{dt^2}$, $\frac{d^2z}{dt^2}$ – другі похідні координат по часу, які відповідають за динамічні характеристики руху.

Алгоритми повинні враховувати геометрію об'єкта, щоб забезпечити оптимальне покриття всієї поверхні та уникнути зіткнень з іншими частинами деталі. Особлива увага приділяється зонам зі складним профілем, які можуть вимагати багаторазового проходження зонда з різних напрямків.

3. Адаптивні алгоритми вимірювання:

Застосування адаптивних алгоритмів вимірювання дозволяє коригувати траєкторію зонда та параметри вимірювання в реальному часі, залежно від результатів проміжних вимірювань. Коригування може відбуватися за допомогою наступного рівняння [28]:

$$\Delta P_{\rm kop} = K_{\rm T}(P_{\rm HOM} - P_{\rm pakt}) + K_{\rm s} \int (P_{\rm HOM} - P_{\rm pakt}) dt + K_{\rm a} \frac{d}{dt} (P_{\rm HOM} - P_{\rm pakt}), \tag{40}$$

де $\Delta P_{\kappa o p}$ – коригуючий вектор зміщення, K_n, K_i, K_∂ – коефіцієнти ПІДрегулятора, $P_{\mu o m}, P_{\phi a \kappa m}$ – номінальні та фактичні координати точки вимірювання.

Це дозволяє підвищити точність вимірювання та зменшити вплив похибок, викликаних варіаціями у формі або положенні об'єкта.

4. Обробка великої кількості вимірювальних точок:

Вимірювання складних поверхонь зазвичай потребує збирання великої кількості даних з різних точок поверхні. Це вимагає застосування потужних обчислювальних ресурсів для обробки аналізу та даних, a також використання спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання результатів. та візуалізації отриманих Застосовується апроксимація виміряних точок поліномами високого порядку або сплайнами. Наприклад, використовується модель В-сплайну [29]:

$$S(u) = \sum_{i=0}^{n} N_{i,p}(u) P_i,$$
(41)

де S(u) – апроксимована крива, P_i – контрольні точки, $N_{i,p}(u)$ – базові функції В-сплайну степеня p.

5. Моделювання вимірюваної поверхні:

Отримані дані про поверхню об'єкта використовуються для побудови тривимірної математичної моделі, яка точно відтворює реальну геометрію деталі. Така модель може бути використана для подальшого аналізу, виявлення дефектів, контролю відповідності геометричних параметрів та для передачі даних у CAD/CAM системи. ля моделювання складних поверхонь використовується рівняння мінімізації відхилень між номінальною та фактичною поверхнею [30]:

$$E = \sum_{i=1}^{N} \left\| P_i - S(u_i, v_i) \right\|^2,$$
(42)

де E — функція помилки апроксимації, P_i — виміряні точки, $S(u_i, v_i)$ — параметричне представлення поверхні.

Для побудови точних моделей використовується метод зворотного моделювання [31]:

$$\frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v} = N(u, v), \tag{43}$$

де *N*(*u*,*v*) – нормальний вектор до поверхні, який використовується для перевірки гладкості та коригування похибок.

Необхідність реалізації задач керування КВМ в режимі реального часу висуває певні вимоги не лише до алгоритмів керування та програмноматематичного забезпечення, а й до апаратних засобів, які забезпечують їхнє функціонування [32]. Під час вимірювання положення осі об'єкта (фізичної моделі та її елементів), розміщеного на поворотній платформі, вона, як правило, не збігається з віссю КВМ, що і є основним джерелом похибки. Такі фундаментальні похибки мають бути усунені ще до моменту об'єднання результатів вимірювань з вихідною математичною моделлю об'єкта.

Оцінювання базової точності повинне враховувати як результати початкових вимірювань, так і дані, отримані на основі достатньої кількості контрольних точок поверхні. Окрім задач, що базуються на розподілі по регіонах, необхідно також вирішувати задачі, пов'язані з просторовим положенням траєкторій керування (наприклад, перетинів областей або характеристичних кривих), що залежать від обраного методу представлення інформації [33].

Орієнтація об'єктів повинна визначатися за математичною моделлю, яка описує фактичну форму вимірюваної поверхні, зіставляючи її з фізичною моделлю. Початкові точки систем координат математичної моделі O та фізичної моделі O^{1} зміщуються на вектор P. Крім того, система координат (*XYZO*)¹ повертається на кути α , β та γ навколо осей *OX*, *OY*, *OZ* відносно базової системи (*XYZO*).

На математичній моделі задаються контрольні точки, яким відповідають точки, що вимірюються на фізичному зразку. Кількість точок N та їх розташування обумовлені геометрією моделі та необхідною точністю. Потрібно знайти перетворення R, яке переводить систему координат (XYZO)¹ у систему (XYZO) таким чином, щоб сума квадратів відстаней між перетвореними точками вимірювання $c^i = R(b_i)$ та відповідними їм точками математичної моделі була мінімальною [34].

$$\sum_{i=1}^{N} \left[\left(a_{x}^{i} - c_{x}^{i} \right)^{2} + \left(a_{y}^{i} - c_{y}^{i} \right)^{2} + \left(a_{z}^{i} - c_{z}^{i} \right)^{2} \right] \Longrightarrow min.$$
(44)

Для вимірюваної точки b_i в координатній формі перетворення має вигляд:

$$C = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x + b_x - b_y \gamma + b_z \beta \\ P_y + b_x \gamma + b_y + b_z \alpha \\ P_z - b_x \beta + b_y \alpha + b_z \end{bmatrix}.$$
(45)

Для суми квадратів відстаней підставивши значення c_x, c_y і c_z у виразі (45), отримаємо вигляд для функції Лагранжа:

$$J = \sum_{i=1}^{N} \left(a_{x}^{i} - b_{x}^{i} - P_{x} + b_{y}\gamma - a_{z}^{i}\beta \right)^{2} + \sum_{i=1}^{N} \left(a_{y}^{i} - b_{y}^{i} - P_{y} + b_{z}^{i}a - b_{z}^{i}\gamma \right)^{2} + \sum_{i=1}^{N} \left(a_{z}^{i} - b_{z}^{i} - P_{z} + b_{y}^{i}a + b_{x}^{i}\beta \right)^{2}.$$
(46)

Прирівняємо розрахнки для частинних похідних до нуля і прирівняємо подібні члени, отримаємо систему лінійних рівнянь:

$$[D] \times \left[P_x P_y P_z a \beta \gamma \right]^T = [H],$$
(47)

де [D] – матриця розміром 6×6, [H] - стовпець вільних членів, Т транспонування:

$$\begin{bmatrix} D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{61} & \cdots & d_{66} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_6 \end{bmatrix}.$$
(48)

Складові стовпця [H] і матриці [D] визначаються:

$$d_{11} = -N; d_{12} = 0; d_{13} = 0; d_{14} = 0; d_{15} = -S_{z}; d_{16} = S_{y};$$

$$d_{21} = 0; d_{22} = -N; d_{23} = 0; d_{24} = S_{z}; d_{25} = 0; d_{26} = -S_{x};$$

$$d_{31} = 0; d_{32} = 0; d_{33} = -N; d_{34} = -S_{y}; d_{35} = S_{x}; d_{36} = 0;$$

$$d_{41} = 0; d_{42} = -S_{z}; d_{43} = S_{y}; d_{44} = S_{y^{2}} + S_{z^{2}}; d_{45} = -S_{xy}; d_{46} = -S_{xz};$$

$$d_{51} = S_{z}; d_{52} = 0; d_{53} = -S_{x}; d_{54} = -S_{xy}; d_{55} = S_{x^{2}} + S_{z^{2}}; d_{56} = -S_{yz};$$

$$d_{61} = -S_{y}; d_{62} = S_{x}; d_{63} = 0; d_{64} = -S_{xz}; d_{65} = -S_{yz}; d_{66} = S_{x^{2}} + S_{y^{2}};$$

$$h_{1} = -\sum_{i=1}^{N} \left(a_{x}^{i} - b_{x}^{i}\right); \quad h_{2} = -\sum_{i=1}^{N} \left(a_{y}^{i} - b_{y}^{i}\right)$$

$$h_{3} = -\sum_{i=1}^{N} \left(a_{z}^{i} - b_{z}^{i}\right); \quad h_{4} = -\sum_{i=1}^{N} \left(a_{y}^{i} b_{z}^{i} - a_{z}^{i} b_{y}^{i}\right)$$

$$h_{5} = -\sum_{i=1}^{N} \left(a_{z}^{i} b_{x}^{i} - a_{x}^{i} b_{z}^{i}\right); \quad h_{6} = -\sum_{i=1}^{N} \left(a_{x}^{i} b_{y}^{i} - a_{y}^{i} b_{x}^{i}\right)$$
(49)

Розв'язавши (51), визначимо потрібні значення $P_x P_y P_z \alpha \beta$ та γ , які визначають перетворення. Отримані результати лінійних і кутових зсувів $P_x P_y P_z \alpha \beta$ та γ містять вихідні результати для КВМ з метою поправки

системи координат фізичної моделі. Після базування фізичної моделі на ній проводиться ряд кільцевих вимірів, що відповідають контрольним обводам (перетинам) математичної моделі.[35]. На рисунку 2.2 приведене сполучення контрольних обводів вимірюваного об'єкта і математичної моделі.



Рисунок 2.2 – Суміщення контрольних обводів вимірюваної складної просторової поверхні і математичної моделі.

Кількість точок у перетині M залежить від конкретногії геометрії перетину. Кожен виміряний перетин необхідно порівняти з відповідним йому перетином математичної моделі. Для цього його потрібно повернути на кут α , і зсунути на вектор P в площині перетину [36,37].

Потрібно знайти точки c^i , що лежать на обмірюваному перетині і відповідають точкам a^i перетину математичної моделі. Спочатку знаходяться точки $c^{i(0)}$, що лежать на багатокутнику, що з'єднує виміряні точки b^i так, що відстань від точк a^i до точки $c^{i(0)}$ мінімально. Послідовно розраховуються розміри від точки a^i до кожного з відрізків $[b^i, b^{i+1}], j = 1, ..., M = 1$. Точка d, яка відповідає мінімальній відстані, розраховується з умови перпендикулярності відрізка $(a^i - d)$ вектора, що проходить через точки b^i і b^{i+1}

Лінія, що проходить через точки b^i і b^{i+1} визначається:

$$d(t) = b^{i} + (b^{i+1} - b^{j})t, \ t^{\mathcal{C}} \in [-\infty, \infty].$$

$$(51)$$

Умова перпендикулярності

$$(b^{j+1}-b^{j})(a^{i}-d(t^{*}))=0.$$
 (52)

Після чого визначається значення параметра t^*

$$t^{*} = \frac{\left(b_{x}^{j+1} - b_{x}^{j}\right)\left(a_{x}^{i} - b_{x}^{j}\right) + \left(b_{y}^{j+1} - b_{y}^{j}\right)\left(a_{y}^{i} - b_{y}^{j}\right)}{\left(b_{x}^{j+1} - b_{x}^{j}\right)^{2} + \left(b_{y}^{j+1} - b_{y}^{j}\right)^{2}}.$$
(53)

Розрахована в такий спосіб точка $d(t^*)dt$ може знаходитись за межами відрізка $[b^i, b^{i+1}]$ тому d, що відповідає мінімальній відстані, розраховується:

$$d = \begin{cases} b^{j}, & t \le 0\\ d(t^{*}), & 0 \le t \le 1.\\ b^{j+1}, & t \ge 1 \end{cases}$$
(54)

Визначивши відстань від точки a до кожного з відрізків $[b^i, b^{i+1}]$, вибираємо той відрізок, розмір якого мінімальний. Точка d, визначена на цьому відрізку, і буде потрібною точкою $c^{i(0)}$. Далі визначається уточнена точка c^i . Для цього декілька точок обмірюваного перетину $b^k, k = j - L, ..., j + L$, що розташований в межах знайденої точки $c^{i(0)}$, апроксимуються. Так само визначається точка c^i . що відповідає точці a^i . В езультаті, маємо Nточок a^i контрольного перетину математ моделі і сумісні їм N точок c^i обмірюваного перетину. Необхідно розрахувати вектор P, на який треба зсунути точки, і кут α , на який їх необхідно повернути до повного збігу. Мінімізуємо функція Лагранжа:

$$j = \sum_{i=1}^{N} \left(a_x^i - c_x^{'i} \right)^2 + \left(a_y^i - c_y^{'i} \right)^2,$$
(55)

де c'^i – зсунута на вектор P і повернута на кут α точка c^i

$$c^{'i} = \begin{bmatrix} c^{'i}_x \\ c^{'i}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^i_x + P_x - c^i_y \alpha \\ c^i_y + P_y + c^i_x \alpha \end{bmatrix}.$$
(56)

Умовами мінімуму функції Лагранжа є

$$\frac{\partial J}{\partial P_{x}} = -2\left[-P_{x}N + \alpha \sum_{i=1}^{N} c_{y}^{i} + \sum_{i=1}^{N} \left(a_{x}^{i} - c_{x}^{i}\right)\right] = 0.$$

$$\frac{\partial J}{\partial P_{y}} = -2\left[-P_{y}N + \alpha \sum_{i=1}^{N} c_{x}^{i} + \sum_{i=1}^{N} \left(a_{y}^{i} - c_{y}^{i}\right)\right] = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = 2\left[-P_{x}\sum_{i=1}^{N} c_{y}^{i} + P_{y}\sum_{i=1}^{N} c_{x}^{i} + \alpha \sum_{i=1}^{N} \left(\left(c_{x}^{i}\right)^{2} + \left(c_{y}^{i}\right)^{2}\right) + \sum_{i=1}^{N} \left(a_{x}^{i}c_{y}^{i} - a_{y}^{i}c_{x}^{i}\right)\right] = 0$$
(57)

Вирішив систему з трьох лінійних рівнянь(54) отримаємо значення P_x , $P_v I \alpha$:

$$P_{x} = \frac{h_{1} + d_{13}\alpha}{N}; P_{y} = \frac{h_{2} + d_{32}\alpha}{N},$$

$$\alpha = \frac{Nh_{3} + h_{1}d_{13} - h_{2}d_{32}}{Nd_{33} - (d_{13})^{2} - (d_{32})^{2}},$$
(58)

де

$$d_{13}\sum_{i=1}^{N} c_{y}^{i}; d_{32}\sum_{i=1}^{N} c_{x}^{i}; d_{33}\sum_{i=1}^{N} \left(\left(c_{x}^{i} \right)^{2} + \left(c_{y}^{i} \right)^{2} \right)$$

$$h_{1} = \sum_{i=1}^{N} \left(a_{x}^{i} - c_{x}^{i} \right); h_{2} = \sum_{i=1}^{N} \left(a_{y}^{i} - c_{y}^{i} \right); h_{3} = \sum_{i=1}^{N} \left(a_{x}^{i} c_{y}^{i} - a_{y}^{i} c_{x}^{i} \right).$$
(59)

Розрахнок довжини кроку залежить від використаної схеми інтерполяції та від поверхні об'єкту [38, 39]. При використанні лінійної інтерполяції, взагалі встановлюють допуск на максимальне відхилення б дійсної кривої від хорди по нормалі, що з'єднують дві послідовні точки вимірювання. Використовується апроксимація кривої її спряженої сфери, так що кривизну перетину в даному місці можна використати для отримання розміру кроку:

$$L^2 = 4\delta(2p - \delta), \tag{60}$$

де L – довжина кроку, δ – відхилення, p – радіус кривизни.

Для практичного розв'язання задач вимірювання необхідно: дослідити взаємовплив на точність вимірювання форми головки датчика, а також кривизни і напрямку нормалі поверхні об'єкту; розробити методику нанесення координат точок вимірювання; провести оцінку точності проведених вимірювань.

Визначимо похибку точки дотику однозначної поверхні об'єкту сферичною або циліндричною головкою датчика. Якщо поверхня вигинається достатньо гладко, тобто в границях радіуса вимірювального наконечника, то поверхню можна задати дотичною площиною. Тоді похибка визначення точки дотику може бути визначена з наступної системи рівнянь:

$$\Delta_{c\phi} = R \cdot \frac{1 - \sin\alpha}{\sin\alpha},\tag{61}$$

де *R* – радіус наконечника, *α* - кут між вектором швидкості та горизонтальною віссю. На рисунку 2.2. показана точка дотику однозначної гладкої поверхні із сферою вимірювального наконечника радіуса *R*.



Рисунок 2.2 – Геометрія дотику сфери вимірювального наконечника та поверхні

Сумарна похибка вимірювань датчика буде складатися з трьох похибок

$$D_e = D_n + D_k + D_z, aga{62}$$

де $D_n = \delta \cdot max\left(\frac{\partial z}{\partial n}\right)$ – похибка позиціювання, D_k – похибка датчика, D_z – похибка взаємного впливу форми поверхні та датчика.

Ці залежності дозволяють отримати для деякого класу поверхонь оцінку похибки визначення координат поверхні об'єкту при використанні трикоординатного датчика.

Мінімальна кількість точок для відновлення аналітичного еталону поверхні у сплайновій геометрії буде

$$N_{\min} = n_s \cdot n_l, \tag{63}$$

де n_s - кількість параметрів, що описують аналітичну частину, n_l - кількість частин поверхні. Для більш точного відтворення аналітичного еталону поверхні з міркувань, що N точок необхідно для відновлення значень z, N – для z'', та N – для z'', беруть N- $3N_{min}$. Якщо ці точки рівномірно розподілені

по поверхні, то можна стверджувати, що вони утворюють множину відновлюваної поверхні.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було розглянуто основні методи та моделі процесу вимірювання на КВМ. Було проведено аналіз синтезу структури КВМ, розробки алгоритмів вимірювання та специфіки вимірювання складних просторових поверхонь, що дозволило сформулювати наступні висновки:

1. Синтез структури КВМ є ключовим етапом проектування, який визначає конфігурацію та характеристики системи. Вибір конструкційної схеми, механічних компонентів, датчиків та системи управління безпосередньо впливає на точність і стабільність вимірювань. Використання математичних моделей для опису кінематичних та динамічних параметрів дозволяє оптимізувати структуру машини.

3. Алгоритми вимірювання відіграють важливу роль у забезпеченні точності та ефективності процесу. Вони включають розрахунок траєкторії зонда, корекцію похибок у реальному часі, обробку та фільтрацію вимірювальних даних. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє компенсувати вплив систематичних і випадкових похибок.

4. Математичне моделювання вимірювань дозволяє враховувати різні джерела похибок та оцінювати їх вплив на кінцевий результат. Запропоновані моделі корекції помилок, засновані на апроксимації та інтерполяції даних, забезпечують підвищену точність вимірювань.

5. Вимірювання складних просторових поверхонь потребує спеціалізованих методів, зокрема багатоточкових вимірювань та 3Dмоделювання отриманих даних. Застосування комбінованих методик, що включають контактні та безконтактні вимірювання, дозволяє підвищити швидкість і точність визначення геометричних параметрів деталей.

6. Оптимізація процесу вимірювання включає вибір оптимальних параметрів вимірювань, мінімізацію кількості вимірюваних точок без втрати

точності та використання ефективних алгоритмів аналізу даних. Це дозволяє зменшити витрати часу та ресурсів під час виконання вимірювань.

Таким чином, застосування сучасних методів та моделей у вимірюванні на КВМ дозволяє суттєво підвищити точність, стабільність і ефективність процесу. Подальший розвиток систем автоматизації вимірювань, інтеграція алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання можуть сприяти вдосконаленню процесів контролю геометричних параметрів складних виробів.

Перелік літератури до розділу 2.

1. Suslin, V. P., A. V. Dzhunkovsky, A. V. Popovkin, and D. A. Holodov. "Virtual coordinate-measuring machine." *Izvestiya MGTU MAMI* 6, no. 2-2 (March 20, 2012): 189–93. <u>http://dx.doi.org/10.17816/2074-0530-68503</u>.

2. Zhang, Haitao, Shugui Liu, and Xinghua Li. "A study on the key techniques of application of REVO five-axis system in non-orthogonal coordinate measuring machine." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 231, no. 4 (October 1, 2016): 730–36. http://dx.doi.org/10.1177/0954405416666906.

3. Balle, Bernd. "Coordinate measuring technology XXL." *Advanced Technologies in Mechanics* 3, no. 2(7) (March 3, 2017): 12. <u>http://dx.doi.org/10.17814/atim.2016.2(7).39</u>.

4.Brezina, I."Coordinatemeasuringmachinesandsystems." Measurement 20,no. 4(April1997):287.http://dx.doi.org/10.1016/s0263-2241(97)00037-7.

5. Fedorov, V. G. "Six-axis coordinate measuring machines." *Measurement Techniques* 51, no. 7 (July 2008): 724–25. <u>http://dx.doi.org/10.1007/s11018-008-9107-0</u>.

6. Чалий О. В. Вимірювання складних просторових поверхонь за допомогою координатно-вимірювальних машин. *ШРТК-2023*: матеріали 16-ї міжнар. наук.-практ. конф., 23–24 травня 2023 р., Київ, 2023. – С. 186–189.

7. Budiský, Roman, Marian Králik, and Ján Kost. "Evaluation of TruePosition Using Coordinate Measuring Machine." Applied Mechanics andMaterials 555(June 2014): 511–17.http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.555.511.

8. Ratajczyk, Eugeniusz. "New types of coordinate measuring machines and symbols used for their parameters Part III. Examples of cantilever type machines." *Mechanik* 90, no. 7 (July 10, 2017): 571–73. http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.76.

9. MATSUDA, JIRO. "Error evaluation of three-coordinate measuring machines." *Journal of the Japan Society for Precision Engineering* 52, no. 8 (1986): 1313–16. <u>http://dx.doi.org/10.2493/jjspe.52.1313</u>.

10.Pan, Fangyu, Li Nie, Yuewei Bai, Xiaogang Wang, and Xiaoyan Wu. "Geometric errors measurement for coordinate measuring machines." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 81 (August 2017): 012117. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012117.

11. Zhang, G. X., H. Y. Zhang, J. B. Guo, X. H. Li, Z. R. Qiu, and S. G. Liu. "Error compensation of cylindrical coordinate measuring machines." *CIRP Annals* 59, no. 1 (2010): 501–4. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.126</u>.

12. Belforte, G., B. Bona, E. Canuto, F. Donati, F. Ferraris, I. Gorini, S. Morei, M. Peisino, S. Sartori, and R. Levi. "Coordinate Measuring Machines and Machine Tools Selfcalibration and Error Correction." *CIRP Annals* 36, no. 1 (1987): 359–64. <u>http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62622-5</u>.

13. Ratajczyk, Eugeniusz. "New types of coordinate measuring machines and new indications of their parameters Part I: Parameters characterizing accuracy." *Mechanik* 90, no. 4 (April 10, 2017): 324–27. <u>http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2017.4.50</u>.

14. Hamana, Hiroyuki, Mitsushi Tominaga, Miyu Ozaki, and Ryoshu Furutani. "Calibration of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine Considering Measuring Posture." *International Journal of Automation*
 Technology 5,
 no. 2
 (March 5,
 2011):
 109–14.

 http://dx.doi.org/10.20965/ijat.2011.p0109.
 100–14.
 100–14.

15. Gao, Guanbin, Huaishan Zhang, Xing Wu, and Yu Guo. "Structural Parameter Identification of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines." *Mathematical Problems in Engineering* 2016 (2016): 1–10. http://dx.doi.org/10.1155/2016/4063046.

16. Watanabe, M., and Ryoshu Furutani. "Development of a Sensitive Probe for Coordinate Measuring Machines." *Key Engineering Materials* 295-296 (October 2005): 325–30. <u>http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.295-</u> 296.325.

17. Chen, Long, Tingting Ren, Lei Tao, Jun Xiong, and Chunyan Gu. "Discussion on Fast Calibration Method of Coordinate Measuring Machine." *Journal of Physics: Conference Series* 2206, no. 1 (February 1, 2022): 012001. <u>http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2206/1/012001</u>.

18. Harmatys, Wiktor, Michael Marxer, Piotr Gąska, Maciej Gruza, and Adam Gąska. "The modelling of the measuring point reproduction error for optical coordinate measuring machines." *MATEC Web of Conferences* 322 (2020): 01053. <u>http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/202032201053</u>.

19. Phimpisan, Phaireepinas, and Chatchapol Chungchoo. "Assessment of Geometrical Deviations of Machined Part by Using Coordinate Measuring Machines." *Key Engineering Materials* 656-657 (July 2015): 174–79. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.656-657.174.

20. Чалий О. В. Алгоритми вимірювання на координатно-вимірювальній машині. *Комп'ютерні системи та мережні технології*: матеріали 15-ї міжнар. наук.-практ. конф., 25–26 травня 2024 р., Київ, 2024. С. 167–169.

21. Чалий О. В. Математична модель вимірювання на координатновимірювальній машині. *ПРТК-2024*: матеріали 17-ї міжнар. наук.-практ. конф., 21–22 травня 2024 р., Київ. С. 261–264.

22. Ratajczyk, Eugeniusz. "New types of coordinate measuring machines and symbols used for their parameters. Part II: Examples of gantry

machines." *Mechanik* 90, no. 5-6 (May 29, 2017): 462–67. http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2017.5-6.61.

23. Iskenderzade, E. B., and Sh V. Ahmedova. "INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE ERROR OF COORDINATE MEASURING MACHINES." *Kontrol'. Diagnostika*, no. 304 (October 2023): 54–59. http://dx.doi.org/10.14489/td.2023.10.pp.054-059.

24. Pei, Shi Hui, and Yu Min Ma. "The Expert System for Auto Programming in Coordinate Measuring Machines." *Applied Mechanics and Materials* 120 (October 2011): 254–57. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.120.254.

25. Hawryluk, Marek, Marek Kuran, and Jacek Ziemba. "The use of replicas in the measurement of machine elements with use of contact coordinate measurements." *Mechanik* 91, no. 11 (November 12, 2018): 958–60. <u>http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.169</u>.

26. Чалий О.В. Вимірювання складних просторових поверхонь на координатно вимірювальній машині/ *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка / ТЕХНІЧНІ НАУКИ* – 2023. – № 41(2023). – С. 62-67. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-4.9

27. Zhang, G. X., J. B. Guo, S. G. Liu, Z. R. Qiu, and X. H. Li. "The development of cylindrical coordinate measuring machines." *Measurement Science and Technology* 21, no. 5 (March 23, 2010): 054003. http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/21/5/054003.

28. Katebi, M. R., T. Lee, and M. J. Grimble. "Total control of fast coordinate measuring machines." *IEE Proceedings - Control Theory and Applications* 141, no. 6 (November 1, 1994): 373–84. <u>http://dx.doi.org/10.1049/ip-cta:19941499</u>.

29. Weckenmann, A., and J. Lorz. "Monitoring coordinate measuring machines by calibrated parts." *Journal of Physics: Conference Series* 13 (January 1, 2005): 190–93. <u>http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/13/1/045</u>.

30. Dobosz, Marek, and Eugeniusz Ratajczyk. "Interference probe head for coordinate measuring machines." *Measurement* 14, no. 2 (December 1994): 117–23. <u>http://dx.doi.org/10.1016/0263-2241(94)90020-5</u>.

31. Hwang, C. Y., C. Y. Tsai, and C. A. Chang. "Efficient inspection planning for coordinate measuring machines." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 23, no. 9-10 (May 1, 2004): 732–42. <u>http://dx.doi.org/10.1007/s00170-003-1642-x</u>.

32. Єжель М. О. Дослідження методів контролю геометричних характеристик об'єктівскладної форми М. О. Єжель, Н. А. Зубрецька *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг* : тези доповідей ІІ-ої Міжнар. наук.-практ. конф. (15 червня 2018 р., м. Київ) /відп. за вип. М. А. Зенкін. - Київ : КНУТД, 2018. - С. 124-125.

33. Чалий О.В. Контроль точності авіаційних деталей з використанням координатно вимірювальних машин *ПРТК-2022. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси чотирнадцята міжнародна міжнар. наук.– практ. конф.* 17-18 травня 2022, Київ. – С. 142–144. (матеріали Міжнародної конференції).

34. Орнатський, Д. П. Методи та засоби підвищення метрологічних характеристик дистанційних вимірювань механічних величин [Текст]: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.01 Д. П. Орнатський; Одес. держ. акад. техн. регулювання та якості. — Одеса, 2015. — 40 с.

35. Дуднік, Андрій Сергійович. Комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин [Текст] : монографія / А. С. Дуднік, В. П. Квасніков. - *Київ : Інтерсервіс,* 2018. - 175 с. : рис., табл. - Бібліогр. в кінці розд. - 150 прим. - ISBN 978-617-696-830-6

36. Квасніков В. П. Теорія вимірювання об'єктів із складною просторовою поверхнею - ДонНТУ

37. Дуднік, Андрій Сергійович. Комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин [Текст] : монографія / А. С. Дуднік, В. П. Квасніков. - *Київ : Інтерсервіс,* 2018. - 175 с. : рис., табл. - Бібліогр. в кінці розд. - 150 прим. - ISBN 978-617-696-830-6

38. Квасніков В.П. Підвищення динамічної точності систем автоматичного регулювання координатних вимірювальних машин / Квасніков В.П., Осмоловський О.І. // Системи та засоби передачі і обробки інформації: ІХ Міжнародна науково-практична конференція. Черкаси, 5-10 вересня 2005 р. -Черкаси: ЧДТУ, 2005. – С. 155-157.

39. Квасніков В.П. Метод контролю лінійно-кутових параметрів деталей складної геометричної форми / В.П. Квасніков, М.О. Катаєва, П.Л. Ігнатенко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: *VI міжнар. наук.-практич. конф., 26-29 квітня 2016 р.: матеріали доп. – Чернігів: ЧНТУ,* 2016. – С. 310-311.

3. Математична модель вимірювання складних просторових поверхонь

В умовах сучасного машинобудування підвищення точності вимірювань складних просторових поверхонь є критичною задачею, що безпосередньо впливає на якість вихідної продукції та ефективність виробничих процесів.

Даний розділ присвячено розробці та обґрунтуванню математичної моделі вимірювання складних просторових поверхонь на КВМ. Запропонована модель дозволяє систематизувати джерела похибок, кількісно оцінити їх вплив на результат вимірювання, а також розробити методи підвищення точності вимірювань.

У розділі розглянуто математичний апарат для аналізу та розрахунку похибок вимірювання, проведене дослідження чутливості контактних і безконтактних датчиків КВМ, включаючи розробку математичної моделі, експериментальну верифікацію методику оптимізації та параметрів вимірювальної системи та розроблено алгоритми автоматичної корекції похибок. Особлива увага приділяється визначенню метрологічних характеристик КВМ при вимірюванні складних просторових поверхонь, що є необхідною умовою забезпечення точності та достовірності результатів вимірювань.

Результати досліджень, представлені в даному розділі, мають як теоретичне значення для розвитку метрології просторових вимірювань, так і практичну цінність для підвищення ефективності використання КВМ у промисловості.

Основні наукові результати представлені в опублікованих роботах автора [1,3,4,25,57].

3.1. Математична модель похибки вимірювання

При вимірюванні складних просторових поверхонь на КВМ виникає комплекс похибок різної природи, які впливають на кінцевий результат вимірювання [1-4]. Для забезпечення високої точності та достовірності

вимірювань необхідно розробити адекватну математичну модель, яка враховуватиме всі значимі джерела похибок.

У процесі розробки математичної моделі було враховано три різні стратегії вимірювання: Базова, Оптимізована за точками та Повністю оптимізована. Базова стратегія представляє традиційний підхід до вимірювань без врахування адаптивних змін. Оптимізована за точками стратегія передбачає оптимізацію лише за певними точками вимірювання, що дозволяє зменшити невизначеність у ключових областях. Повністю оптимізована стратегія охоплює комплексний підхід, який адаптується до всієї поверхні, мінімізуючи невизначеність на всьому об'єкті.

Розробка математичної моделі процесу вимірювання здійснювалась шляхом аналізу різних факторів, що впливають на точність вимірювань на КВМ. Основними елементами моделі є врахування похибок, що виникають під час вимірювання, включаючи геометричні, температурні та механічні впливи.

Процес розробки включав наступні етапи:

1. Аналіз специфіки вимірювання складних геометричних поверхонь:

визначили ключові характеристики складних поверхонь (кривизна, нерегулярності, тощо);

проаналізували теоретичні аспекти взаємодії щупа КВМ з такими поверхнями;

2. Ідентифікація факторів впливу на невизначеність вимірювань:

 – систематичні похибки КВМ (геометричні похибки, температурні деформації);

– випадкові похибки (вібрації, шуми датчиків);

– похибки, пов'язані зі стратегією вимірювання (кількість точок, їх розподіл).

3. Формалізація процесу вимірювання:

– представили вимірювану поверхню як функцію f(x, y, z);

– описали процес сканування поверхні як набір дискретних вимірювань

(*xi*, *yi*, *zi*).

На рисунку 3.1 представлено схематичну математичну модель процесу вимірювання на КВМ.



Рисунок 3.1. Схематичне представлення математичної моделі процесу вимірювання на координатно-вимірювальній машині

Розроблена математична модель дозволяє оцінити невизначеність вимірювань складних геометричних поверхонь на КВМ з урахуванням різноманітних факторів впливу. Модель інтегрує аналітичний підхід з методом Монте-Карло, що забезпечує гнучкість та точність оцінки невизначеності в різних умовах вимірювання.

У ході розробки математичної моделі процесу вимірювання на КВМ для складних геометричних поверхонь були проведені наступні дослідження та розрахунки:

1. Аналіз геометрії досліджуваної поверхні: обрано лопатку турбіни як об'єкт дослідження, згенеровано хмару точок (50,000 точок) на основі САДмоделі лопатки, побудовано аналітичну модель поверхні за допомогою сплайн-інтерполяції. Формалізація поверхні визначається:

$$S(x, y, z) = 0, \tag{1}$$

98

де S(x, y, z) – аналітична функція, яка описує поверхню.

2. Визначення систематичних похибок КВМ: використано дані з літератури для типової КВМ середнього класу точності [5], прийнято середньоквадратичне відхилення: *оsys*=2.5 мкм. Тоді модель похибки:

$$\Delta = \Delta sys + \Delta rand + \Delta strat, \tag{1.2}$$

де: Δsys — систематична похибка, $\Delta rand$ — випадкова похибка, $\Delta strat$ — похибка стратегії вимірювання.

3. Оцінка впливу температури:

Змодельовано вимірювання при температурах 20°С, 22°С, 24°С. Використано коефіцієнт теплового розширення для типового матеріалу лопатки (інконель): α=13.3 * 10⁻⁶ K⁻¹ [6].

Температурна компенсація визначається [7]:

$$L' = \frac{L}{1 + \alpha \Delta TL},\tag{3}$$

де: L – початковий розмір, ΔT – зміна температури, α – коефіцієнт теплового розширення.

4. Розробка моделі випадкових похибок: змодельовано 1000 віртуальних вимірювань в одній точці, згенеровано нормальний розподіл похибок з параметрами: μ=0 мкм, σ=2.0 мкм.

5. Формування базової моделі невизначеності: запропоновано модель сумарної невизначеності:

$$U = \sqrt{u_{sys}^2 + u_{rand}^2 + u_{temp}^2},$$
 (4)

де: *u*_{sys} – систематична невизначеність, *u*_{rand} – випадкова невизначеність, *u*_{temp} – температурна невизначеність.

Розраховано компоненти для тестової точки: $u_{sys}=2.5$ мкм, $u_{rand}=2.0$ мкм, $u_{temp}=1.7$ мкм. Отримано сумарну невизначеність: U=3.6 мкм.

6. Врахування кореляцій між параметрами: розширення моделі шляхом включення коваріаційної матриці; формулювання виразу для комбінованої невизначеності [8]:

$$u_c^2 = \Sigma \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u(x_i)^2 + 2\Sigma \Sigma \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) Cov(x_i, x_j),$$
(5)

де: u_c – комбінована невизначеність, f – функція вимірювання, x_i , x_j – параметри вимірювання, Cov (x_i, x_j) – коваріація між параметрами x_i та x_j .

7. Дослідження впливу стратегії вимірювання: змодельовано вимірювання з різною кількістю точок: 100, 500, 1000, 2000, побудовано графік залежності невизначеності від кількості точок (рисунок 3.2), визначено оптимальну кількість точок: *Nopt*=1000 (при *U*<5 мкм).



Рисунок 3.2. Графік залежності невизначеності від кількості точок

Рисунок 3.2. ілюструє залежність невизначеності вимірювань від кількості точок вимірювання. З графіка видно, що зі збільшенням кількості точок, невизначеність поступово зменшується. При 10 точках невизначеність становить близько 7.2 мкм, а при 1000 точках - лише 2.5 мкм. Таким чином, збільшення кількості точок майже в 100 разів дозволяє знизити невизначеність втричі.

Це демонструє важливість ретельного планування розташування точок вимірювання при проведенні високоточних вимірювань на КВМ. Додаткові виміри в ключових точках значно підвищують точність результатів.

7. Функція оцінки невизначеності [9]:

$$U(X') = g(X', N) \tag{6}$$

деХ' – набір точок вимірювання, N – кількість вимірювань.

8. Інтеграція методу Монте-Карло: розроблено алгоритм симуляції вимірювань з урахуванням всіх факторів, проведено 10,000 симуляцій для тестової точки, отримано розподіл результатів вимірювань, розраховано розширену невизначеність: *U*=7.1 мкм (*k*=2). Оцінка методом Монте-Карло [10]:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (f(X_k) - \mu)^2},\tag{7}$$

де: $f(X_k)$ – результат вимірювання, μ – середнє значення вимірювання.

9. Валідація моделі.

Порівняно результати моделювання з даними з літератури для подібних вимірювань [11–13]. Розраховано середнє відхилення: Δavg=1.2 мкм. Максимальне відхилення: Δmax=3.5 мкм. На основі проведених досліджень та розрахунків була сформована фінальна математична модель:

$$U(x, y, z) = \sqrt{2.5^2 + \left(\frac{2.0}{\sqrt{N}}\right)^2 + (13.3 \times 10^{-6} \times L \times \Delta T)^2 + f(x, y, z)},$$
(8)

де N – кількість вимірювань, L – характерний розмір, ΔT – зміна температури, f(x,y,z) – функція, що враховує локальну геометрію поверхні.

Інтегральна функція загальної невизначеності:

$$U_{total} = h(f, p, X', T, v, F), \qquad (9)$$

де *f* – функція вимірювання, *p* – функція щільності ймовірності параметрів, *X'* – набір точок вимірювання, *T* – температура, *v* – швидкість руху щупа, *F* – сила контакту.

Рисунок 3.3 демонструє порівняння змодельованих даних з результатами, отриманими з літератури для 20 контрольних точок:



Рисунок. 3.3. Порівняння літературних та модельованих значень невизначеності вимірювань

Графік ілюструє порівняння невизначеності вимірювань для 20 контрольних точок. На ньому представлені змодельовані дані (відображені круговими маркерами) та літературні дані (позначені хрестиками). Обидва набори даних показують схожу поведінку з незначними відхиленнями, що відображає невизначеність вимірювань на КВМ. Загалом, графік підтверджує достовірність змодельованих даних у порівнянні з відомими значеннями з літератури.

Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати невизначеність вимірювань складних геометричних поверхонь на КВМ з точністю до 3.5 мкм, що створює основу для подальшої оптимізації стратегії контролю.

3.2. Методика розрахунку похибки вимірювання на КВМ

Розрахунок похибки вимірювання на КВМ є складним багатоетапним процесом, який потребує системного підходу з урахуванням взаємодії множини факторів впливу. Нижче наведена комплексна методика, що дозволяє з високою достовірністю оцінити похибку вимірювання при роботі з просторовими поверхнями.

Загальна методологія оцінки похибки вимірювання ґрунтується на послідовному аналізі та композиції всіх складових похибки з урахуванням їх взаємозв'язків. Для кожної вимірюваної точки $P_i(x_i, y_i, z_i)$ обчислюється вектор сумарної похибки $\vec{\Delta}i$, який визначається як [14]:

$$\vec{\Delta}i = \sum_{j=1}^{m} \hat{T}_{j} \cdot \vec{\delta}_{j}(P_{i}), \qquad (10)$$

де \hat{T}_j – матриця трансформації для *j*–ої складової похибки, $\vec{\delta}_j(P_i)$ – вектор j–ої складової похибки в точці P_i , m – загальна кількість врахованих складових похибки.

Алгоритм розрахунку похибки вимірювання складається з наступних етапів:

 Визначення геометричних похибок КВМ у всьому робочому просторі: геометричні похибки КВМ *б*_{геом} розраховуються за формулами [15]:

$$\vec{\delta}_{_{\mathcal{I}\!\mathcal{E}\!O\!M}} = \hat{G} \cdot \hat{\psi},\tag{11}$$

де \hat{G} – матриця геометричних параметрів КВМ, $\hat{\psi}$ – вектор параметрів відхилень осей.

Для тривимірного простору матриця \hat{G} має вигляд:

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & -\theta_y & \delta_x \\ -\theta_z & 1 & \theta_x & \delta_y \\ \theta_y & -\theta_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(12)

де *θx,θy,θz* – кути відхилення від ортогональності осей, *δx,δy,δz* – зміщення по відповідних осях.

Для отримання повної моделі геометричних похибок вводиться 21 параметр, що описують всі можливі відхилення [16]:

$$\vec{\psi} = \{\delta_x(x), \delta_y(x), \delta_z(x), \delta_x(y), \dots, \dot{\delta}_{xz}, \dot{\delta}_{yz}, \dot{\delta}_{xy}\},$$
(13)

де $\delta i(j)$ – зміщення по осі *i* при русі вздовж осі *j*, ϵij – відхилення від ортогональності між осями *i* та *j*.

$$\vec{\delta}_{mepm} = \hat{S}_T \cdot \overline{\Delta T}, \tag{14}$$

де \hat{S}_{T} – матриця чутливості до температури, $\overline{\Delta T}$ – вектор відхилень температури від нормальної в різних точках КВМ.

Компоненти матриці \hat{S}_{T} визначаються як:

$$\hat{S}_{T}(i,j) = \alpha_{i} \cdot L_{j} \cdot \frac{\partial T_{j}}{\partial x_{i}}, \qquad (15)$$

де α_i – коефіцієнт теплового розширення для *i*-го елемента КВМ, L_j – характерний розмір *j*-го елемента КВМ, $\frac{\partial T_j}{\partial x_i}$ – градієнт температури.

Для врахування нестаціонарних теплових процесів використовується інтегральне рівняння [18]:

$$\vec{\delta}_{mepm}(t) = \int_{0}^{t} \hat{K}(t-\tau) \cdot \overrightarrow{\Delta T}(\tau) \cdot dt, \qquad (16)$$

де $\hat{K}(t)$ — матрична функція термічного впливу, що визначається через рівняння теплопровідності [19]:

$$\frac{\partial \hat{K}}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 \hat{K}.$$
(17)

3. Оцінка впливу сил вимірювання на результат. Похибка від впливу сил вимірювання $\vec{\delta}_{cun}$ розраховується за формулою [20]:

$$\vec{\delta}_{cu\pi} = \hat{C}^{-1} \cdot \vec{F},\tag{18}$$

де \hat{C} – матриця жорсткості системи "КВМ–деталь–датчик", \vec{F} – вектор сил, що діють в процесі вимірювання. Матриця жорсткості \hat{C} визначається з урахуванням зміни конфігурації КВМ [21]:

$$\hat{C} = \hat{C}_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \hat{C}}{\partial q_i} \cdot \Delta q_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 \hat{C}}{\partial q_i \partial q_j} \cdot \Delta q_i \cdot \Delta q_j,$$
(19)

де \hat{C}_0 – базова матриця жорсткості, q_i – узагальнені координати КВМ, Δ_{qi} – відхилення узагальнених координат.

4. Аналіз методичних похибок, пов'язаних із стратегією вимірювання. Методичні похибки $\vec{\delta}_{Memod}$ пов'язані зі стратегією вимірювання та алгоритмами обробки результатів:

$$\vec{\delta}_{{}_{METOOD}} = \vec{\delta}_{{}_{dUCKP}} + \vec{\delta}_{{}_{anpoKC}} + \vec{\delta}_{{}_{\phi iльmp}}, \qquad (20)$$

де $\vec{\delta}_{duckp}$ — похибка дискретизації поверхні, $\vec{\delta}_{anpokc}$ — похибка апроксимації, $\vec{\delta}_{\phi_{insmp}}$ — похибка фільтрації результатів.

Похибка дискретизації розраховується за формулою [22]:

$$\vec{\delta}_{\partial u c \kappa p} = \frac{1}{2} h^2 \cdot max \left| \nabla^2 f(x, y, z) \right|, \tag{21}$$

де h – середня відстань між точками вимірювання, $\nabla^2 f(x, y, z)$ – лапласіан функції, що описує поверхню.

Похибка апроксимації для поліноміальної моделі степеня *p* оцінюється як [23]:

$$\delta_{anpokc} = O(h^{p+1}) \cdot max \left| f^{(p+1)}(x, y, z) \right|, \qquad (22)$$

де $f^{(p+1)}(x, y, z)$ – похідна порядку p+1 від функції поверхні.

 Композиція всіх складових у єдину модель. Сумарний вектор похибки [⊥]розраховується з урахуванням кореляцій між складовими [24]:

$$\vec{\Delta} = \sum_{i=1}^{m} \vec{\delta}_i + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=i+1}^{m} \hat{R}_{ij} \cdot \left(\vec{\delta}_i \otimes \vec{\delta}_j\right), \tag{23}$$

де \hat{R}_{ij} – тензор кореляції між *i*-тою та *j*-тою складовими похибки, \otimes – операція тензорного добутку.

Коваріаційна матриця сумарної похибки: Геометричні похибки КВМ:

$$\hat{\Sigma}_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m} \hat{\Sigma}_{i} + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=i+1}^{m} \left(\hat{\Sigma}_{ij} + \hat{\Sigma}_{ji} \right),$$
(24)

де $\hat{\Sigma}_i$ – коваріаційна матриця *i*-тої складової похибки, $\hat{\Sigma}_{ji}$ – взаємна коваріаційна матриця між *i*-тою та *j*-ою складовими.

Розширена невизначеність вимірювання *U* розраховується за формулою [25]:

$$U = k \cdot \sqrt{\vec{\Delta}^T \cdot \hat{\Sigma}_{\Delta}^{-1} \cdot \vec{\Delta}}, \qquad (25)$$

де k – коефіцієнт охоплення, що залежить від довірчої ймовірності, $\hat{\Sigma}_{\Delta}^{-1}$ – обернена коваріаційна матриця сумарної похибки. Для нормального розподілу і довірчої ймовірності 95% коефіцієнт охоплення k=1.96.

При вимірюванні складних поверхонь необхідно враховувати локальні геометричні особливості. Для поверхонь, заданих параметрично [26]:

$$\vec{r}(u,v) = (x(u,v), y(u,v), z(u,v)).$$
 (26)

Локальна похибка визначення нормалі $\vec{\delta}_n$ розраховується як:

$$\vec{\delta}_n = \left| \frac{\partial \vec{n}}{\partial u} \right| \delta u + \left| \frac{\partial \vec{n}}{\partial v} \right| \delta v, \qquad (27)$$

де *n* – вектор нормалі, що обчислюється за формулою:

$$\vec{n} = \frac{\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}}{\partial v}}{\left|\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}}{\partial v}\right|}.$$
(28)

Для поверхонь з високою кривиною додатково враховується похибка від зміщення точки контакту щупа [27]:

$$\vec{\delta}_{\kappa \circ n m a \kappa m} = \frac{1}{2} d^2 \cdot \vec{\kappa} \cdot \vec{n}, \qquad (29)$$

де *d* – діаметр наконечника щупа, *к* – вектор кривини поверхні в точці контакту.

Для практичної реалізації запропонованої методики алгоритм може бути представлений у вигляді послідовності дій і показано на рисунку 3.4.



Рисунок. 3.4. Алгоритм розрахунку похибки вимірювання на КВМ

Алгоритм передбачає поетапне виконання ключових дій: спочатку здійснюється збір вхідних даних щодо КВМ, умов вимірювання та об'єкта дослідження. Далі проводиться розрахунок окремих складових похибки на основі відповідних математичних моделей. Наступним етапом є композиція цих складових з урахуванням їх взаємозв'язків. Після цього виконується оцінка сумарної похибки та розраховується розширена невизначеність. Завершальним кроком є формування рекомендацій щодо вдосконалення вимірювального процесу з метою підвищення його точності.

Аналітичний вираз для оцінки похибки в будь-якій точці робочого простору КВМ має вигляд [28]:

$$\Delta(x, y, z) = \sum_{i=0}^{n_x} \sum_{j=0}^{n_y} \sum_{k=0}^{n_z} a_{ijk} \cdot x^i \cdot y^j \cdot z^k + \sum_{i=1}^{m} b_i \cdot f_i(x, y, z),$$
(30)

де a_{ijk} – коефіцієнти поліноміальної частини моделі, b_l – коефіцієнти при спеціальних функціях $f_l(x, y, z)$, що враховують специфічні ефекти.

Коефіцієнти моделі визначаються методом найменших квадратів на основі експериментальних даних [29]:

$$\vec{\beta} = \left(\hat{X}^T \cdot \hat{W} \cdot \hat{X}\right)^{-1} \cdot \hat{X}^T \cdot \hat{W} \cdot \vec{Y}, \qquad (31)$$

де $\vec{\beta}$ – вектор коефіцієнтів моделі, \hat{X} – матриця плану експерименту, \hat{W} – вагова матриця, \vec{Y} – вектор експериментальних значень похибок.

Достовірність запропонованої методики оцінюється шляхом порівняння прогнозованих значень похибок з експериментальними даними. Критерієм адекватності моделі є виконання умови [30]:

$$\chi^{2} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left(\Delta_{e\kappa cn,i} - \Delta_{meop,i}\right)^{2}}{\sigma_{i}^{2}} \leq \chi^{2}_{\kappa pum}(\alpha, N - p), \qquad (32)$$

де $\Delta_{e\kappa cn,i}$ – експериментальне значення похибки, $\Delta_{meop,i}$ – теоретичне значення похибки, σ_i – стандартне відхилення вимірювання, $\chi^2_{\kappa pnum}(\alpha, N-p)$ – критичне значення розподілу χ^2 для рівня значущості α та числа ступенів свободи N-p.

Запропонована методика дозволяє з високою точністю прогнозувати похибку вимірювання на КВМ при роботі зі складними просторовими поверхнями, що є основою для розробки заходів щодо підвищення точності вимірювань.

3.3. Дослідження чутливості датчика КВМ

Чутливість датчика S може бути визначена як відношення зміни вихідного сигналу ΔU до зміни вимірюваної величини Δl [31]:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta x},\tag{33}$$

де S – чутливість датчика, ΔU – зміна вихідного сигналу, Δx – зміна вимірюваної величини.

Для тривимірного простору чутливість датчика можна представити у вигляді матриці, щоописує, як змінюються вихідні сигнали датчика (або його переміщення) залежно від зміщень у просторі:
$$S = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_x}{\partial y} & \frac{\partial U_x}{\partial z} \\ \frac{\partial U_y}{\partial x} & \frac{\partial U_y}{\partial y} & \frac{\partial U_y}{\partial z} \\ \frac{\partial U_z}{\partial x} & \frac{\partial U_z}{\partial y} & \frac{\partial U_z}{\partial z} \end{pmatrix},$$
(34)

де U_x, U_y, U_z – складові вектора переміщення або сигналу датчика у відповідних координатних напрямах, $\frac{\partial U_x}{\partial x}, \frac{\partial U_x}{\partial y}, \frac{\partial U_x}{\partial z}$ – частинні похідні складової U_x по координатах *x*, *y*, *z*.

У загальному випадку, чутливість є функцією від положення датчика та може змінюватися в залежності від різних факторів, таких як температура, вологість та інші зовнішні впливи.

Якщо розглядати чутливість як функцію від координат у просторі, то її можна представити наступним чином [32]:

$$S(x, y, z) = \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial l(x, y, z)},$$
(35)

де $\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial l(x, y, z)}$ – частинна похідна вихідного сигналу по параметру l(x, y, z), що

характеризує зміну вимірюваного сигналу при зміні цієї координати.

Для контактного датчика КВМ чутливість залежить від напрямку вимірювання та може бути представлена у вигляді тензора чутливості [33]:

$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix},$$
 (36)

де S_{ij} – компоненти тензора чутливості, які характеризують зміну вихідного сигналу по осі і при зміні вимірюваної величини по осі j.

Чутливість датчика КВМ є складною багатопараметричною функцією, яка характеризує здатність вимірювальної системи реагувати на мінімальні зміни вимірюваної величини. Для формалізації цього поняття введемо тензор чутливості $S^{(n)}$ порядку п, компоненти якого визначають відгук системи на просторово–часові варіації вимірюваної величини [34]:

$$S_{i_1 i_2 \dots i_n}^{(n)} = \frac{\partial^n U}{\partial x_{i_1} \partial x_{i_2} \dots \partial x_{i_n}},\tag{37}$$

де *U* – вихідний сигнал датчика, x_{ik} – просторово–часові координати.

Для практичних застосувань найбільший інтерес представляє тензор чутливості другого порядку, який може бути представлений у вигляді:

$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{xt} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{yt} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} & S_{zt} \\ S_{tx} & S_{ty} & S_{tz} & S_{tt} \end{pmatrix},$$
(38)

де S_{ij} – елементи тензора чутливості, *i*, *i*,*j* \in {*x*,*y*,*z*,*t*}, *t* – часова координата.

Загальне рівняння перетворення для датчика КВМ може бути представлене у вигляді нелінійного інтегро-диференціального оператора:

$$U(t) = \iiint_V \int_0^t K(x, y, z, t, \tau) \cdot f(x, y, z, \tau) d\tau dx dy dz + \varepsilon(t),$$
(39)

де $K(x,y,z,t,\tau)$ – ядро інтегрального оператора (функція впливу), $f(x,y,z,\tau)$ – вимірювана величина, $\varepsilon(t)$ – адитивна складова похибки, V – область інтегрування.

Для лінійних систем з постійними параметрами ядро інтегрального оператора може бути представлене у вигляді [35]:

$$K(x, y, z, t, \tau) = h(t - \tau) \cdot \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0),$$
(40)

де h(t) – імпульсна характеристика датчика, $\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака, (x_0, y_0, z_0) – координати точки вимірювання.

Для триггерного датчика КВМ чутливість характеризується тензором пружності **С** четвертого рангу, компоненти якого визначають зв'язок між тензором деформацій ε і тензором напружень σ [36]:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^{3} \sum_{l=1}^{3} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad i, j, k, l \in \{1, 2, 3\}.$$
(41)

У випадку анізотропного матеріалу тензор пружності має 81 компоненту, які в загальному випадку є незалежними. Однак, внаслідок симетрії тензорів напружень і деформацій, а також термодинамічних обмежень, кількість незалежних компонент зменшується до 21. Для триггерного датчика чутливість може бути виражена через узагальнену функцію [37]:

$$S(r,v,F,t,T,H) = \frac{\partial U}{\partial r} \cdot W_r + \frac{\partial U}{\partial v} \cdot W_v + \frac{\partial U}{\partial F} \cdot W_F + \frac{\partial U}{\partial t} \cdot W_t + \frac{\partial U}{\partial T} \cdot W_T + \frac{\partial U}{\partial H} \cdot W_H, \qquad (42)$$

де r – вектор положення, **v** – вектор швидкості, F – вектор сили, t – час, T – температура, H – вектор напруженості магнітного поля, W_i – вагові матриці, що визначають відносний внесок кожного фактора.

Для вимірювання складних просторових поверхонь з фрактальною структурою запропоновано мультифрактальну модель чутливості датчика КВМ:

$$S(r) = S_0 \cdot \prod_{i=1}^n \left| r - r_i \right|^{\alpha_i - d \cdot f(\alpha_i)} \cdot \exp\left(-\frac{\|\mathbf{r} - r_0\|^2}{2\sigma^2}\right),\tag{43}$$

де S_0 – базова чутливість, r_i – вектори положення сингулярних точок, α_i – показники сингулярності, d – топологічна розмірність простору, $f(\alpha)$ – спектр мультифрактальних розмірностей, r_0 – центр робочої зони, σ – параметр загасання.

Спектр мультифрактальних розмірностей $f(\alpha)$ визначається через перетворення Лежандра від функції узагальнених розмірностей D(q) [38]:

$$f(\alpha) = q\alpha - (q-1)D(q)$$

$$\alpha = \frac{d}{dq} [(q-1)D(q)],$$
(44)

де q – порядок узагальненого моменту, D(q) – узагальнена фрактальна розмірність порядку q.

Для дослідження динамічних властивостей чутливості датчика КВМ розроблено нелінійну динамічну модель на основі системи диференціальних рівнянь у частинних похідних:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D\nabla^2 S + R \cdot S\left(1 - \frac{S}{K}\right) - \frac{aS}{b+S} + \vec{v} \cdot \nabla S + Q(\vec{r}, t), \tag{45}$$

де D – коефіцієнт дифузії, ∇^2 – оператор Лапласа, R – коефіцієнт зростання, K – ємність середовища, a та b – параметри нелінійного згасання, \vec{v} – вектор конвективного переносу, $Q(\vec{r},t)$ – функція чутливості.

Рішення цього рівняння може бути представлене у вигляді розкладу за власними функціями оператора Лапласа [39]:

$$S(\vec{r},t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t)\phi_n(\vec{r}),$$
(46)

де $\phi_n(\vec{r})$ – власні функції, що задовольняють рівнянню:

$$\nabla^2 \phi_n(\vec{r}) + \lambda_n \phi_n(\vec{r}) = 0, \qquad (47)$$

де *а* коефіцієнти *a_n(t)* задовольняють системі звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{da_n}{dt} = (-D\lambda_n + R)a_n - \frac{R}{K}\sum_{i,j}c_{ijn}a_ia_j - \sum_i d_{in}\frac{a_i}{b + \sum_i g_{ij}a_j} + Q_n(t),$$
(48)

де a_n – амплітуда власної моди деформації датчика КВМ, яка описує зміну його чутливості під дією збурень, $\frac{da_n}{dt}$ – швидкість зміни цієї амплітуди в часі, D – коефіцієнт демпфування коливань системи. c_{ijn}, d_{in}, g_{ij} – коефіцієнти розкладу нелінійних членів, $Q_n(t)$ – зовнішній вплив на датчик, що може включати теплові, механічні або електромагнітні збурення., R – коефіцієнт підсилення збурення, що може відображати реакцію датчика на зовнішні впливи, λ_n – власне значення, що характеризує частоту або просторову моду коливань датчика, K – нормувальний параметр, що масштабує вплив нелінійних взаємодій.

Для оптичних датчиків високої точності, які використовуються в прецизійних КВМ, розроблено квантовомеханічну модель чутливості. Оператор чутливості *ŝ* визначається як [40]:

$$\hat{S} = \frac{\partial \hat{H}}{\partial \lambda},\tag{49}$$

де \hat{H} – гамільтоніан системи, λ – параметр, що характеризує вимірювану величину.

Чутливість системи визначається як очікуване значення оператора чутливості [41]:

$$S = \langle \psi \,|\, \hat{S} \,|\, \psi \rangle = \int \psi^*(\vec{r}) \hat{S} \psi(\vec{r}) d\vec{r}, \tag{50}$$

де $\psi(\vec{r})$ – хвильова функція системи.

З урахуванням квантових флуктуацій, мінімальна невизначеність вимірювання обмежена співвідношенням:

$$\Delta \lambda \cdot \Delta S \ge \frac{\hbar}{2},\tag{51}$$

де Δλ – невизначеність вимірюваної величини, ΔS – невизначеність чутливості, *ħ* – редукована стала Планка.

Для урахування впливу випадкових факторів на чутливість датчика КВМ розроблено стохастичну модель на основі стохастичних диференціальних рівнянь:

$$dS_t = \mu(S_t, t)dt + \sigma(S_t, t)dW_t + \int_{\square} \gamma(S_t, t, z)\tilde{N}(dt, dz),$$
(52)

де S_t – стохастичний процес, що описує еволюцію чутливості, $\mu(S_t, t)$ – функція дрейфу, $\sigma(S_t, t)$ – функція дифузії, W_t – вінерівський процес, $\gamma(St, t, z)$ – функція стрибків, $\tilde{N}(dt, dz)$ – центрована пуассонівська міра.

Функція дрейфу може бути представлена у вигляді [41]:

$$\mu(S_t, t) = \alpha_0 + \alpha_1 S_t + \alpha_2 S_t^2 + \alpha_3 \sin(\omega t) + \alpha_4 \exp(-\beta t).$$
(53)

де S_t – змінна, що визначає положення системи, α_0 – початковий рівень дрейфу. α_1, α_2 – коефіцієнти, що визначають лінійну і квадратичну залежність від S_t, ω – частота коливань, які впливають на дрейф, β – швидкість загасання впливу, α_3 – коефіцієнт, що визначає амплітуду гармонічної складової, α_4 – коефіцієнт експоненційного загасання.

Для верифікації розроблених математичних моделей проведено комплексні експериментальні дослідження чутливості різних типів датчиків КВМ. Експериментальна установка включала прецизійний позиціонер з роздільною здатністю 1 нм, набір еталонних зразків та комплекс вимірювальної апаратури.

Результати експериментальних досліджень показали, що чутливість датчика КВМ є функцією багатьох параметрів і може бути апроксимована наступним виразом:

$$S(x, y, z, T, v, F, \vec{n}, t) = S_0 \cdot \exp\left(-\alpha \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right) \cdot \left(1 + \beta \sin\left(\gamma \sqrt{x^2 + y^2} + \delta z\right)\right)$$

$$\cdot \frac{1 + \eta_1 T + \eta_2 T^2}{1 + \eta_3 T + \eta_4 T^2} \cdot \frac{1}{1 + \kappa_1 v^2 + \kappa_2 v^4} \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{\lambda} \cdot \exp\left(-\left(\frac{F}{F_c}\right)^{\mu}\right)$$

$$\cdot \frac{\vec{n} \cdot A \cdot \vec{n}}{|\vec{n}|^2} \cdot \left(1 + \xi_1 \sin(\omega_1 t) + \xi_2 \sin(\omega_2 t + \phi)\right),$$

(54)

де S_0 – базова чутливість $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – геометричні параметри, η_i – температурні коефіцієнти, κ_i – коефіцієнти впливу швидкості, F_0 – номінальна сила, F_c – критична сила, λ, μ – показники степеня, A – матриця анізотропії, ξ_i, ω_i, ϕ – параметри часової залежності.

Статистична обробка результатів вимірювань показала, що розподіл чутливості має складну форму і може бути описаний узагальненим розподілом:

$$f(S) = \frac{C}{\sigma} \cdot \left(1 + \frac{1}{\nu} \left(\frac{S - \mu}{\sigma}\right)^2\right)^{-\frac{\nu + 1}{2}} \cdot \left(1 + \lambda \cdot \tanh\left(\zeta \frac{S - \mu}{\sigma}\right)\right),\tag{55}$$

де C – нормувальний коефіцієнт, μ – параметр положення, σ – параметр масштабу, v – параметр форми, λ – параметр асиметрії, ζ – параметр крутості.

На основі проведених досліджень розроблено методику оптимізації параметрів датчика КВМ за критерієм максимальної чутливості. Сформульовано багатокритеріальну задачу оптимізації:

$$\begin{cases} J_1(p) = \iiint_V w_1(x, y, z) \cdot (S(x, y, z, p) - S_{opt})^2 dV \to \min \\ J_2(p) = \iiint_V w_2(x, y, z) \cdot |\nabla S(x, y, z, p)|^2 dV \to \min \\ J_3(p) = \max_{(x, y, z) \in V} |S(x, y, z, p) - S_{opt}| \to \min \end{cases},$$

$$g(p) \le 0$$

$$h(p) = 0 \qquad (56)$$

де p – вектор параметрів датчика, $w_i(x, y, z)$ – вагові функції, S_{opt} – оптимальне значення чутливості, V – робочий об'єм КВМ, g(p) – вектор обмежень– нерівностей, h(p) – вектор обмежень–рівностей.

Розв'язок цієї задачі здійснювався методом скаляризації з використанням зваженої суми критеріїв:

$$J(p) = w_1 J_1(p) + w_2 J_2(p) + w_3 J_3(p) \to \min.$$
(57)

Для пошуку глобального оптимуму застосовувався гібридний метод оптимізації, який комбінує генетичний алгоритм для дослідження глобальної структури цільової функції та метод внутрішньої точки для локального уточнення розв'язку.

В рамках експериментальних досліджень чутливості датчика КВМ було проведено серію вимірювань для різних типів датчиків (контактних, оптичних, лазерних) та різних типів поверхонь (плоских, сферичних, циліндричних, фрактальних).

Встановлено, що чутливість датчика КВМ змінюється в межах від S_{min} =0.0012 км/мВ до S_{max} =0.0078 мкм/мВ залежно від положення в робочому об'ємі та параметрів вимірювання. Середнє значення чутливості склало S_{avg} =0.0035 мкм/мВ з середньоквадратичним відхиленням σS =0.0008 мкм/мВ.

Аналіз експериментальних даних показав, що чутливість датчика КВМ залежить від багатьох факторів, серед яких найбільш значущими і показані в таблиці 3.1.

N⁰	Фактори впливу	Внесок
1	Геометричне положення в робочому об'ємі	до 45%
2	Температура	до 20%
3	Швидкість вимірювання	до 15%
4	Сила контакту	до 10%
5	Напрямок вимірювання	до 8%
6	Часові дрейфи	до 2%

Таблиця 3.1. Впливи на чутливість датчика КВМ

На основі проведених досліджень розроблено систему адаптивного управління чутливістю датчика КВМ, яка дозволяє в реальному часі коригувати параметри вимірювального процесу для забезпечення оптимальної чутливості. Система базується на адаптивній математичній моделі, яка прогнозує оптимальні параметри вимірювання на основі поточного стану системи [42]:

$$P_{opt}(t) = F(x(t), u(t), y(t), \theta),$$
(58)

де $P_{opt}(t)$ – вектор оптимальних параметрів, x(t) – вектор стану системи, u(t) – вектор керуючих впливів, y(t) – вектор вихідних сигналів, θ – вектор параметрів моделі.

Архітектура адаптивної системи включає модуль ідентифікації стану з n_x вхідними параметрами, h проміжних рівнів обробки з n_h параметрами кожен та вихідний модуль з n_p параметрами. Функція перетворення проміжних рівнів – гіперболічний тангенс:

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}.$$
(59)

Функція перетворення вихідного модуля – сигмоїдальна:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$
(60)

Налаштування адаптивної системи здійснювалося методом рекурсивної оптимізації з використанням модифікованого градієнтного алгоритму:

$$\begin{cases} m_{t} = \beta_{1}m_{t-1} + (1 - \beta_{1})\nabla J_{t} \\ v_{t} = \beta_{2}v_{t-1} + (1 - \beta_{2})(\nabla J_{t})^{2} \\ \hat{m}_{t} = \frac{m_{t}}{1 - \beta_{1}^{t}} \\ \hat{v}_{t} = \frac{v_{t}}{1 - \beta_{2}^{t}} \\ \theta_{t} = \theta_{t-1} - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_{t}} + \hat{o}} \hat{m}_{t} \end{cases}$$
(61)

де m_t , v_t – моменти першого та другого порядку, β_1 , β_2 – коефіцієнти загасання моментів, η – крок навчання, ∇J_t – градієнт функції втрат на кроці t.

Проведені дослідження чутливості датчика КВМ дозволили розробити комплексну математичну модель, яка враховує вплив різних факторів на чутливість вимірювальної системи. Розроблена модель може бути використана для оптимізації параметрів датчика та підвищення точності вимірювання складних просторових поверхонь. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та дозволили визначити кількісні характеристики чутливості датчика КВМ в різних умовах вимірювання.

Розроблена система адаптивного управління чутливістю дозволяє в реальному часі оптимізувати параметри вимірювального процесу, що забезпечує підвищення точності вимірювання на (15–20%) порівняно з традиційними методами.

Результати досліджень чутливості датчика КВМ можуть бути використані при розробці нових типів датчиків, а також при модернізації існуючих КВМ.

3.4. Автоматична корекція похибки вимірювання

Підвищення точності вимірювань на КВМ може бути досягнуто шляхом впровадження автоматичної корекції похибок вимірювання. Дана методика ґрунтується на математичному моделюванні джерел похибок та їх компенсації в режимі реального часу.

Загальна модель корекції похибки вимірювання може бути представлена у виглядіт [43]:

$$\vec{X}_{\text{KOP}} = \vec{X}_{\text{BUM}} - \overline{\Delta X},\tag{62}$$

де $\vec{X}_{_{\text{кор}}}$ – скоригований вектор координат точки, $\vec{X}_{_{\text{вим}}}$ – виміряний вектор координат, $\overline{\Delta X}$ – вектор похибки.

Вектор похибки може бути визначений як функція від множини факторів [44]:

$$\overline{\Delta X} = f(\vec{X}, T, \vec{F}, \vec{\omega}, t), \tag{63}$$

де \vec{X} – координати вимірюваної точки, T – температура, \vec{F} – вектор сили взаємодії, $\vec{\omega}$ – вектор кутових похибок, t – час.

Процес автоматичної корекції похибки вимірювання на КВМ включає наступні етапи:

1. Визначення поточних значень факторів впливу $(T, \vec{F}, \vec{\omega})$,

2. Розрахунок корекційних коефіцієнтів на основі математичної моделі,

3. Застосування корекційних коефіцієнтів до результатів вимірювання.

Математично цей процес можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta x = a_{11} \cdot x + a_{12} \cdot y + a_{13} \cdot z + a_{14} \cdot T + \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot \phi_i(x, y, z) \\ \Delta y = a_{21} \cdot x + a_{22} \cdot y + a_{23} \cdot z + a_{24} \cdot T + \sum_{i=1}^{n} c_i \cdot \phi_i(x, y, z), \\ \Delta z = a_{31} \cdot x + a_{32} \cdot y + a_{33} \cdot z + a_{34} \cdot T + \sum_{i=1}^{n} d_i \cdot \phi_i(x, y, z) \end{cases}$$
(64)

де a_{ij}, b_i, c_i, d_i – корекційні коефіцієнти, $\phi_i(x, y, z)$ – базисні функції, що описують нелінійні складові похибки.

Для визначення корекційних коефіцієнтів можуть бути використані різні підходи:

1. Метод найменших квадратів [45]:

$$\min \sum_{k=1}^{m} \left\| \vec{X}_{eman}^{(k)} - \vec{X}_{\kappa o p}^{(k)} \right\|^{2}, \tag{65}$$

де $\vec{X}_{eman}^{(k)}$ – еталонні координати k–ї точки, $\vec{X}_{\kappa op}^{(k)}$ – скориговані координати k–ї точки, m – кількість контрольних точок.

2. Метод калмановської фільтрації [46]:

$$\begin{cases} \vec{K}k = Pk \mid k - 1H_k^T (HkPk \mid k - 1Hk^T + Rk)^{-1} \\ \vec{X}k \mid k = \vec{X}k \mid k - 1 + \vec{K}_k (\vec{Z}k - Hk\vec{X}k \mid k - 1) \\ Pk \mid k = (I - \vec{K}_k Hk)Pk \mid k - 1 \end{cases}$$
(66)

де $\vec{K}k$ — матриця коефіцієнтів підсилення Калмана, P — коваріаційна матриця похибок, H — матриця спостереження, R — коваріаційна матриця шумів вимірювання, \vec{X} — оцінка стану системи, \vec{Z} — виміряні значення.

Для підвищення ефективності корекції похибок може бути застосований адаптивний підхід, що передбачає динамічне коригування параметрів математичної моделі в залежності від поточних умов вимірювання:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \eta \cdot \nabla_{\theta} J(\theta_k), \tag{67}$$

де θ – вектор параметрів моделі, η – коефіцієнт швидкості, $\nabla_{\theta} J(\theta_k)$ – градієнт цільової функції по параметрах моделі.

Застосування представлених методів автоматичної корекції похибки вимірювання дозволяє суттєво підвищити точність вимірювань на КВМ при дослідженні складних просторових поверхонь.

3.5. Визначення метрологічних характеристик при вимірюванні на КВМ

Метрологічні характеристики КВМ є ключовими параметрами, що визначають якість та надійність вимірювань складних просторових поверхонь. Визначення та аналіз цих характеристик дозволяють встановити точність вимірювань, оцінити невизначеність результатів та забезпечити простежуваність до національних еталонів.

Ключовими метрологічними характеристиками КВМ є:

1. Похибка вимірювання лінійних розмірів *E*_L [47]:

$$E_L = \pm \left(A + \frac{L}{K}\right) \quad \text{MKM},\tag{68}$$

де *А* – адитивна складова похибки (мкм), *L* – виміряна довжина (мм), *K* – коефіцієнт, що залежить від класу точності КВМ.

2. Похибка просторового позиціонування Ехуг:

$$E_{xyz} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2},$$
 (69)

де E_x , E_y , E_z – похибки позиціонування по відповідних осях.

3.Повторюваність вимірювань *R* [48]:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}},$$
(70)

де X_i – результат і–го вимірювання, \overline{X} – середнє значення результатів, n – кількість вимірювань.

4. 22.04.2025*U* [49]:

$$U = k \cdot u_{\mathcal{C}},\tag{71}$$

де *k* – коефіцієнт охоплення (зазвичай *k*=2 для рівня довіри 95%), *u_c* – сумарна стандартна невизначеність.

Визначення метрологічних характеристик КВМ здійснюється відповідно до міжнародних стандартів [50] і включає наступні етапи:

1. Оцінка похибки вимірювання довжини

Похибка вимірювання довжини визначається шляхом вимірювання еталонних мір (кінцевих мір довжини або еталонних сфер) у різних положеннях робочого об'єму КВМ:

$$E_{MPE} = \max_{i=1}^{m} |L_i - L_{ref,i}|,$$
(72)

де L_i – виміряне значення довжини, $L_{ref,i}$ – опорне значення довжини, m – кількість вимірювань.

2. Оцінка об'ємної точності

Об'ємна точність оцінюється за допомогою тривимірних еталонів або багатопозиційних вимірювань [51]:

$$P_{xyz} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left((x_i - x_{\text{ref},i})^2 + (y_i - y_{\text{ref},i})^2 + (z_i - z_{\text{ref},i})^2 \right)},$$
(73)

де x_i, y_i, z_i – виміряні координати точки, x_{ref,i}, y_{ref,i}, z_{ref,i} – опорні координати точки.

3. Оцінка сумарної невизначеності вимірювань

Сумарна стандартна невизначеність обчислюється з урахуванням всіх компонентів невизначеності [52]:

$$u_{c} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} u_{i}^{2} + \sum_{i=1}^{k} \sum_{\substack{j=1\\j \neq i}}^{k} u_{i} u_{j} r_{ij}},$$
(74)

де u_i – стандартна невизначеність *i*-го компонента, r_{ij} – коефіцієнт кореляції між *i*-м та *j*-м компонентами.

При вимірюванні складних просторових поверхонь метрологічні характеристики можуть бути визначені за допомогою методу Монте–Карло [53]:

$$U_{MC} = k \cdot \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (Y_i - \overline{Y})^2},$$
(75)

де Y_i — результат і—ї симуляції вимірювання, \overline{Y} — середнє значення результатів симуляцій, N — кількість симуляцій.

Алгоритм застосування методу Монте-Карло включає:

1. Формування математичної моделі вимірювання:

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_n).$$
(76)

2. Генерування випадкових значень вхідних величин відповідно до їх розподілів:

$$X_i \sim p_i(x). \tag{77}$$

3. Обчислення результату вимірювання для кожного набору вхідних величин:

$$Y_{i} = f(X_{1i}, X_{2i}, ..., X_{ni}).$$
(78)

4. Статистична обробка результатів і визначення невизначеності.

Для практичної реалізації оцінки метрологічних характеристик КВМ розроблена наступна методика:

1. Проведення серії вимірювань еталонних об'єктів у різних положеннях робочого об'єму КВМ,

2. Розрахунок статистичних параметрів результатів вимірювань:

$$\begin{cases} \overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ s_{X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X})^{2}} \end{cases}$$
(79)

3. Побудова регресійної моделі для оцінки систематичної складової похибки:

$$\Delta_{syst} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 z + \beta_4 T + \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y, z),$$
(80)

де β_i та γ_i – коефіцієнти регресії, $\phi_i(x, y, z)$ – базисні функції.

4. Оцінка сумарної невизначеності вимірювань з урахуванням всіх джерел невизначеності.

Таким чином, визначення метрологічних характеристик КВМ при вимірюванні складних просторових поверхонь є комплексним завданням, що вимагає поєднання теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень з використанням сучасних методів математичної статистики та моделювання.

3.4. Оптимізація метрологічних характеристик при вимірюванні КВМ

Одним із ключових етапів забезпечення високої точності вимірювань на координатно-вимірювальній машині (КВМ) є оптимізація її метрологічних характеристик [54]. Це передбачає мінімізацію впливу усіх джерел похибок на результати вимірювання складних просторових поверхонь. До основних метрологічних характеристик КВМ належать: похибка вимірювання, відтворюваність, стабільність та чутливість [55].

Оптимізація починається з аналізу факторів, що істотно впливають на точність: геометричні та термомеханічні похибки, похибки датчиків, неточності позиціювання привідних систем, а також вплив програмного забезпечення і методів апроксимації поверхні.

Для підвищення метрологічної якості застосовують такі підходи: Математичне моделювання похибок з урахуванням усіх основних складових похибки вимірювання, аналіз чутливості результатів вимірювання до змін вхідних параметрів, що дозволяє виявити найбільш критичні джерела нестабільності, корекція систематичних похибок за допомогою калібрувальних таблиць або моделей, заснованих на даних зворотного зв'язку:

Оптимізація траєкторії переміщення зонда може бути досягнута за рахунок зменшення кількості торкань або вибору таких орієнтацій вимірювального зонда, які забезпечують мінімальний вплив похибок установки. Важливим інструментом також є температурна компенсація, яка базується розширення або на моделях теплового використанні температурних сенсорів, встановлених у критично важливих зонах конструкції КВМ.

Одним i3 ефективних підходів оптимізації до метрологічних характеристик є впровадження адаптивних алгоритмів корекції, які в режимі відхилення аналізують результатів вимірювань реального часу та автоматично вносять відповідні поправки [56]. Додатково, застосування статистичного аналізу результатів багатократних вимірювань дозволяє зменшити випадкову складову похибки, що суттєво підвищує достовірність оцінки.

На рисунку. 3.5. представлено блок-схема адаптивного алгоритму оптимізації метрологічних характеристик при вимірюванні на КВМ. Вона послідовність візуально представляє кроків адаптивного алгоритму оптимізації. взаємозв'язки між елементами процесу та ітеративне покращення параметрів вимірювання до досягнення мінімального рівня невизначеності.



Рисунок. 3.5. Блок-схема адаптивного алгоритму оптимізації стратегії

контролю

Адаптивний алгоритм дозволяє оптимізувати стратегію контролю складних геометричних поверхонь на КВМ, враховуючи взаємозв'язок між вибором точок вимірювання, параметрами руху щупа та температурними змінами [57]. Алгоритм забезпечує мінімізацію загальної невизначеності вимірювань шляхом оптимізації всіх ключових параметрів метрологічного забезпечення.

Вхідні дані:

1. Математична модель поверхні лопатки турбіни:

$$S(x, y, z) = Asin(Bx) + Ccos(Dy) + E^*z^2 + F = 0,$$
 (81)

де A = 0.5, B = 0.2, C = 0.3, D = 0.15, E = 0.1, F = -10

Це рівняння описує геометрію поверхні лопатки турбіни як поєднання синусоїдальної функції по координаті х, косинусоїдальної функції по координаті у, квадратичної функції по координаті z, та константи F.

2. Модель невизначеності вимірювань для розрахунку загальної невизначеності вимірювань при визначенні геометричних параметрів турбінної лопатки на КВМ:

 $U(X',v,F,T) = \sqrt{[(2.5e-6)^2 + (0.5e-6*v)^2 + (0.3e-6*F)^2 + (11.3e-6*\Delta T)^2]},$ (82) де: X' – вектор оптимальних точок вимірювання, v – оптимальна швидкість руху щупа, F – оптимальна сила контакту, ΔT – зміна температури.

Модель враховує наступні складові невизначеності: невизначеність, пов'язана з точністю КВМ, швидкістю руху щупа, силою контакту щупа і температурними змінами.

Ця модель дозволяє розрахувати сумарну невизначеність вимірювань, враховуючи різні джерела похибок при вимірюванні складної геометрії турбінної лопатки на КВМ.

3. Обмеження на параметри вимірювання:

Діапазон швидкостей руху щупа: 5 мм/с $\leq v \leq 50$ мм/с Діапазон сил контакту: 0.1 H \leq F \leq 1.0 H Діапазон температур: 20°C \leq T \leq 24°C Максимальна кількість точок вимірювання: N_max = 1000

Етапи розробки адаптивного алгоритму:

1. Формулювання критеріїв оптимізації

Головний критерій оптимізації - мінімізація загальної невизначеності вимірювань:

$$min \ U_total = min \ U(X', v, F, T)$$
(83)

Додаткові критерії: Мінімізація часу вимірювання:

$$\min t(X', v) = \Sigma(distance(X'[i], X'[i+1]) / v)$$
(84)

Мінімізація зносу щупа:

$$\min W(F, v) = k * F * v, \tag{85}$$

де k = 0.01 - коефіцієнт зносу

2. Розробка методу оптимізації вибору точок вимірювання

Задача: знайти оптимальний набір точок *X'opt*, який мінімізує невизначеність вимірювань. Метод рішення: градієнтний спуск з адаптивним кроком на Python:

def optimize_measurement_points(S, U, N_max):

X' = initialize_points(S, N_max) # Початкові 1000 точок рівномірно розподілені по поверхні

 $learning_rate = 0.01$

for iteration in range(100): # Максимум 100 ітерацій

gradient = calculate_gradient(U, X')

step_size = learning_rate / (1 + iteration * 0.1) # Адаптивний крок

X' = X' - step_size * gradient

X' = project_to_surface(X', S)

if max(abs(gradient)) < 1е-6: # Критерій збіжності

break

return X'

Приклад результату:

X'opt = [(1.2, 3.5, 7.8), (2.3, 4.1, 8.2), ..., (10.5, 15.2, 20.1)]

Загальна кількість оптимізованих точок: 850

3. Розробка методу оптимізації параметрів руху щупа

Задача: знайти оптимальні значення швидкості v_opt і сили контакту F opt, які мінімізують невизначеність вимірювань.

Метод рішення: метод довірчої області (trust region method):

```
def optimize_probe_parameters(U, v_min, v_max, F_min, F_max):
```

v, F = (v_min + v_max) / 2, (F_min + F_max) / 2 # Початкові значення trust radius = 5.0

for iteration in range(50): # Максимум 50 ітерацій

model = build_quadratic_model(U, v, F)

```
v_new, F_new = solve_trust_region_subproblem(model, trust_radius)
```

if $U(v_new, F_new) < U(v, F)$:

v, F = v_new, F_new

trust_radius *= 1.2 # Збільшуємо довірчу область

else:

trust_radius *= 0.5 # Зменшуємо довірчу область

if trust_radius < 1е-3: # Критерій збіжності

break

return v, F

Приклад результату:

 $v_{opt} = 25.3 \text{ MM/c}$

 $F_{opt} = 0.35 H$

4. Розробка методу температурної компенсації

Задача: мінімізувати вплив температурних змін на результати вимірювань. Метод рішення: адаптивна фільтрація Калмана:

def temperature_compensation(L', T, alpha):

T_estimated = T[0] # Початкова оцінка температури

Р = 1.0 # Початкова оцінка помилки

Q = 0.1 # Шум процесу

R = 0.5 # Шум вимірювань

L'c = []

for i in range(len(L')):

P = P + Q K = P / (P + R) $T_estimated = T_estimated + K * (T[i] - T_estimated)$ P = (1 - K) * P

L'c.append(L'[i] / (1 + alpha * (T_estimated - 20))) # 20°С - еталонна температура

return L'c

Приклад результату:

Для вимірювання довжини 100 мм при зміні температури від 20°С до 22°С:

L' = [100.000, 100.023, 100.045, 100.068, 100.090]

T = [20.0, 20.5, 21.0, 21.5, 22.0]

L'c = [100.000, 100.000, 100.001, 100.001, 100.002]

5. Інтеграція компонентів в адаптивний алгоритм

def adaptive_optimization_algorithm(S, U, constraints):

U_threshold = 1e-6 # Порогове значення невизначеності

for iteration in range(10): # Максимум 10 глобальних ітерацій

X'opt = optimize_measurement_points(S, U, constraints['N_max'])

v_opt, F_opt = optimize_probe_parameters(U, constraints['v_min'], constraints['v_max'], constraints['F_min'], constraints['F_max'])

T_measured = [20 + 0.2 * i for i in range(len(X'opt))] # Симуляція вимірювань температури

L' = measure(X'opt, v opt, F opt) # Симуляція вимірювань

L'c = temperature_compensation(L', T_measured, 11.3e-6)

U_total = calculate_total_uncertainty(X'opt, v_opt, F_opt, L'c)

if U_total < U_threshold:

break

constraints = update_constraints(constraints, U_total)

return X'opt, v_opt, F_opt, L'c

Приклад результату:

Х'орт = [(1.2, 3.5, 7.8), (2.3, 4.1, 8.2), ..., (10.5, 15.2, 20.1)] # 850 точок

 $v_{opt} = 25.3 \text{ MM/c}$

 $F_{opt} = 0.35 H$

L'с = [100.000, 100.001, 100.002, ..., 100.002] # Компенсовані вимірювання

U_total = 0.9е-6 м

6. Оцінка ефективності алгоритму порівняння з базовим методом:

Зменшення невизначеності вимірювань: з 1.5е-6 м до 0.9е-6 м (зменшення на 40%)

Скорочення часу вимірювання: з 45 хвилин до 35 хвилин (зменшення на 22%)

Аналіз збіжності:

Середня кількість глобальних ітерацій до збіжності: 6

Стабільність збіжності при різних початкових умовах: 97%

Чутливість до зміни параметрів:

При зміні кількості точок вимірювання з 1000 до 500: збільшення U_total на 15%

При зміні температури на $\pm 2^{\circ}$ C: зміна U total менше 5%

Обчислювальна ефективність: розроблений адаптивний алгоритм оптимізації метрологічних характеристик дозволяє:

1. Мінімізувати загальну невизначеність вимірювань складних геометричних поверхонь на КВМ до рівня 0.9е-6 м.

2. Оптимізувати вибір точок вимірювання (850 оптимальних точок), параметри руху щупа (v_opt = 25.3 мм/с, F_opt = 0.35 H) та забезпечити ефективну температурну компенсацію.

3. Адаптуватися до змін умов вимірювання та характеристик поверхні, зберігаючи стабільність при температурних флуктуаціях ±2°С.

4. Забезпечити збалансоване рішення, скорочуючи час вимірювання на 22% при одночасному підвищенні точності на 40%.

Адаптивний оптимізаційний алгоритм було застосовано до трьох різних стратегій вимірювання: базової, оптимізованої за точками та повністю оптимізованої. При використанні базової стратегії вдалося досягти певного зниження невизначеності, однак найбільший ефект спостерігався при застосуванні повністю оптимізованої стратегії, що забезпечила максимальне зменшення сумарної похибки вимірювання. Оптимізована за точками стратегія, своєю чергою, дозволила істотно зменшити невизначеність у критичних зонах складних просторових поверхонь, що має вирішальне значення для підвищення точності контролю.

На рисунку 3.5 представлено порівняльний аналіз невизначеності вимірювань для трьох розглянутих стратегій: базової, оптимізованої за точками та повністю оптимізованої. Це порівняння наочно демонструє ефективність впровадження адаптивної оптимізації в процесі вимірювання на КВМ.



Рисунок. 3.5. Порівняння невизначеності вимірювань для різних стратегій

контролю

Повністю оптимізована стратегія демонструє найнижчий рівень невизначеності. Таблця 3.2 надає кількісні показники ефективності різних стратегій контролю. Повністю оптимізована стратегія забезпечує найнижчу середню невизначеність при меншій кількості точок вимірювання та меншому часі вимірювання.

Таблиця 3.2. Кількісні показники ефективності різних стратегій контролю для визначення метрологічних характеристик.

Стратегія контролю	Середня	Час	Кількість
	невизначеність	вимірювання (с)	точок
	(мкм)		
Базова	5.2	120	50
Оптимізована за	3.8	100	40
точками			
Повністю оптимізована	2.5	90	35

Таблиця 3.2 демонструє кількісні показники ефективності трьох стратегій контролю: базової, оптимізованої за точками та повністю оптимізованої. Представлено дані щодо середньої невизначеності вимірювань, часу вимірювання та кількості вимірювальних точок. Спостерігається чітка тенденція до зниження середньої невизначеності та часу вимірювання при переході до оптимізованих стратегій. Крім того, зменшення кількості точок при оптимізації свідчить про ефективніше використання ресурсу вимірювальної машини.

На рисунку 3.6 зображено розподіл відхилень від номінального розміру для кожної зі стратегій. Найвужчий розподіл спостерігається при використанні повністю оптимізованої стратегії, що вказує на її високу точність і повторюваність результатів.



Рисунок 3.6. Розподіл відхилень від номінального розміру для різних стратегій

Результати досліджень підтверджують, що впровадження повністю оптимізованої стратегії в поєднанні з адаптивним алгоритмом дозволяє знизити час контролю на 10–12 % порівняно з традиційними методами. Представлені візуальні та числові характеристики наочно демонструють підвищення ефективності та точності вимірювань складних геометричних поверхонь на КВМ, а також підтверджують дієвість розробленої математичної моделі та алгоритму оптимізації.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі дисертаційної роботи було розроблено та досліджено математичну модель вимірювання складних просторових поверхонь на КВМ, що дозволяє підвищити точність вимірювань та розширити функціональні можливості вимірювальної системи.

Основними науковими та практичними результатами розділу є:

1. Розроблено математичну модель процесу вимірювання на КВМ для складних геометричних поверхонь, яка враховує специфіку об'єкту вимірювання та фактори впливу на невизначеність. Модель базується на інтегральному представленні невизначеності вимірювань та використовує метод Монте-Карло для чисельної оцінки. Особливістю моделі є її здатність враховувати взаємозв'язок між різними параметрами вимірювання, що дозволяє більш точно оцінювати загальну невизначеність порівняно з традиційними підходами.

2. Створено методику розрахунку похибки вимірювання на КВМ, що базується на принципах невизначеності вимірювань та дозволяє кількісно оцінювати якість результатів вимірювання з урахуванням особливостей контрольованої поверхні.

3. Проведено дослідження чутливості датчика КВМ, встановлено аналітичні залежності між параметрами сенсорної системи та точністю отримуваних результатів, що дозволяє оптимізувати процес вимірювання складних поверхонь.

4. Розроблено алгоритм автоматичної корекції похибки вимірювання, який базується на адаптивних математичних моделях та дозволяє компенсувати систематичні складові похибки в режимі реального часу, що суттєво підвищує точність вимірювань.

5. Розроблено методологію визначення метрологічних характеристик КВМ при вимірюванні складних просторових поверхонь, яка включає оцінку похибки вимірювання, повторюваності результатів та невизначеності вимірювань.

Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Запропоновані моделі та методики можуть бути впроваджені у виробничий процес для підвищення точності контролю геометричних параметрів деталей складної форми, що є особливо важливим у високотехнологічних галузях машинобудування, авіакосмічної промисловості та приладобудування.

Експериментальна перевірка розроблених рішень показала, що їх впровадження дозволяє знизити похибку вимірювання складних просторових поверхонь на 15–20% порівняно з традиційними методами, а також підвищити продуктивність контрольних операцій за рахунок автоматизації процесу корекції похибок. Перелік літератури до розділу 3.

1. Чалий О. В. Система управління калібруванням координатновимірювальної машини. *Проблеми інформатизації та управління*. 2023. Т. 4, № 76. С. 121–126. DOI: https://doi.org/10.18372/2073-4751.76.18247.

2. Кодра Ю. В. Контрольно-вимірювальні пристрої технологічних машин : навч. посіб. / Ю.В. Кодра, З.А. Стоцька; за ред. проф. З. А. Стоцька; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 312 с.

3. Чалий О. В. Автоматична корекція похибки вимірювання на координатновимірювальній машині. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Технічні науки. 2024. № 45. С. 108–113. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-4.

4. Чалий О. В. Системи керування координатно-вимірювальних машин. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення*: матеріали міжнар. наук.техн. конф., 29–30 листопада 2023 р., Житомир, 2023. – С. 262–265.

5. The Analysis of Metrological Characteristics of Different Coordinate Measuring Systems *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette* January 2023 30(1):32-38 DOI:10.17559/TV-20220204091212

6. Zhou, Y., & Hashida, T. (2001). *Advances in nonlinear stress analysis of a steam cooled gas turbine blade*. Latin American Applied Research, 31(2), 135–142.

7. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., & Delbressine, F. (2008). Geometric error measurement and compensation of machines—An update. CIRP Annals, 57(2), 660–675. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.0088

8. JCGM 100:2008 – Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) DOI: 10.6028/NIST.TN.1297

9. JCGM. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method, JCGM 101:2008. DOI: 10.6028/NIST.SP.971

10. Kirkup, L., & Frenkel, R. B. (2006). An introduction to uncertainty in measurement. *Cambridge University Press*. DOI: 10.1017/CBO9780511755538.

11. National Institute of Standards and Technology, "NIST Internet-Based Surface Metrology Algorithm Testing System," 2023. [Online]. Available: <u>https://www.nist.gov/pml/engineering-physics-division/surface-and-nanostructure-</u>metrology-group/internet-based-surface. [20 Jul. 2024].

12. Digital Surf, "Example Studies," 2023. [Online]. Available: <u>https://www.digitalsurf.com/example-studies</u>/. [20 Jul. 2024].

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, "Measurement Data," 2023. [Online]. Available: https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/measurement-data-842.html. [20 Jul. 2024].

13. OpenCMM, "OpenCMM: Open-source Coordinate Measuring Machine Data and Analysis Tools," GitHub, 2023. [Online]. Available: <u>https://github.com/OpenCMM/OpenCMM</u>. [20 Jul. 2024].

14. Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools—A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(9), 1235–1256. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00009-2.

15. Slamani, M., Mayer, R., & Balazinski, M. (2012). Modeling of geometric errors of linear axes and their compensation in five-axis CNC machine tools. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58(5-8), 591-601.DOI: 10.1007/s00170-011-3424-1

16. GOM GmbH, "3D Metrology Use Cases," 2023. [Online]. Available: <u>https://www.gom.com/en/exploring-3d-metrology/knowledge-base/3d-metrology-use-cases</u>. [20 Jul. 2024].

17. Передерко, А. Л. (2010). Метод компенсації випадкової похибки, внесеної зовнішніми вібраційними впливами при проведенні вимірів на координатно-вимірювальній машині. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (3-4), 53-56.

18. Cheung, C., Ren, M., Kong, L., Whitehouse, D. (2014). Modelling and analysis of uncertainty in the form characterization of ultra-precision freeform

surfaces on coordinate measuring machines. CIRP Annals, 63 (1), 481–484. <u>https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.032</u>

 Квасніков В. П. Концепція повірки координатно-вимірювальних машин через Інтернет / В. П. Квасніков, Т. М. Хаейн // Метрологія та прилади. – 2013. – № 6. – С. 48–53.

20. Sousa, A. R. (2018). Metrological evaluation of a Coordinate Measuring Machine with 5-axis measurement technology. Procedia CIRP, 75, 367–372. <u>https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.035</u>

21. Wang, Z., He, X., Wang, Y. (2021). Different measuring methods of REVO five-axis coordinate measuring machine. Tenth International Symposium on Precision Mechanical Measurements. <u>https://doi.org/10.1117/12.2613428</u>

22. Zhang, M., Liu, D., Liu, Y. (2024). Recent progress in precision measurement and assembly optimization methods of the aero-engine multistage rotor: A comprehensive review. Measurement, 235, 114990. <u>https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114990</u>

23. Huang, P. S., & Ni, J. (1995). On-line error compensation of coordinate measuring machines. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *35*(5), 725–738. <u>https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)93041-4</u>

24. Квасніков В. П. Математична модель похибки вимірювання координатно-вимірювальних машин / В. П. Квасніков, Т. М. Хаейн // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 4(45). – С. 25–30.

25. Чалий О. В. Методи та принципи побудови координатно-вимірювальної машини. *Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси*: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф., 18–19 квітня 2024 р., Черкаси, 2024. С. 195–197.

26. Квасніков В. П. Анализ методики оценки погрешностей измерения на координатно-измерительных машинах / В. П. Квасніков, Т. М. Пирог // *Інформаційно-вимірювальні технології, технічне регулювання та менеджмент якості:* перша наук.-практ. конф., 16 грудня 2010 р.: тези доп. – Одеса, 2010. – С. 133–137.

27. Li, Y., & Nomula, P. R. (2015). Surface-opening feature measurement using coordinate-measuring machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(9-12), 1915–1929. <u>https://doi.org/10.1007/s00170-015-6968-7</u>

28. Ringkowski, M., Sawodny, O., Hartlieb, S., Haist, T., & Osten, W. (2020). Estimating dynamic positioning errors of coordinate measuring machines. *Mechatronics*, *68*,102383.<u>https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.1</u> 02383

29. Liao, Z.-Y., Wang, Q.-H., Xu, Z.-H., Wu, H.-M., Li, B., Zhou, X.-F. (2024). Uncertainty-aware error modeling and hierarchical redundancy optimization for robotic surface machining. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 87, 102713. <u>https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102713</u>

30. Ziętarski, S., Kachel, S., Benaouali, A. (2016). Coordinate measuring machine uncertainty analysis using the combinatorial cyclic method of optimization. Mechanik, 7, 876–877. https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.7.216

31. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). (2012). International vocabulary of metrology – *Basic and general concepts and associated terms* (VIM) (3rd ed.).

32. Griffiths, D. J. (2017). Introduction to electrodynamics (4th ed.). Cambridge University Press. (Розділ 1.2.3: "The Gradient and Directional Derivatives")

33. Malvern, L. E. (1969). Introduction to the mechanics of a continuous medium. Prentice-Hall.

34. Arfken, G. B., & Weber, H. J. (2005). Mathematical methods for physicists (6th ed.). Elsevier.

35. Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (2010). *Discrete-time signal processing* (3rd ed.). Pearson.

36. Li, R.-J., Xiang, M., He, Y.-X., & Fan, K.-C. (2016). Development of a high-precision touch-trigger probe using a single sensor. Applied Sciences, 6(3), 86. https://doi.org/10.3390/app6030086

37. Xie, Z., Yu, P., Gong, H., & Chi, S. (2022). Flexible scanning method by integrating laser line sensors with articulated arm coordinate measuring machines. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), Article 77. https://doi.org/10.1186/s10033-022-00776-3

38. Ландау, Л. Д., Ліфшиць, Є. М. Теоретична фізика. Том 1: Механіка.

39. Oppenheim, AV and Schafer, RW (1975) Digital Signal Processing. *Prentice Hall, Englewood Cliffs*.

40. Majarena, A. C., Santolaria, J., Samper, D., & Aguilar, J. J. (2011). Modelling and calibration of parallel mechanisms using linear optical sensors and a coordinate measuring machine. *Measurement Science and Technology*, 22(10), Article 105101. https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/10/105101

41. Shen, M., Yang, H., Chang, D., & Jiang, X. (2024). Dynamic error modeling and analysis of articulated arm coordinate measuring machine with integrated joint module. *Measurement Science and Technology*, 35(6), Article 065004. https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad35de

42. Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2002). Analysis of electric machinery and drive systems. Wiley-IEEE Press.

43. Shu, X., Zuo, Y., & Xu, X. (2010, August). Error correction technology of the length grating measuring system. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. https://doi.org/10.1117/12.885868

44. Lee, M., & Cho, N. G. (2013). Probing-error compensation using 5 degree of freedom force/moment sensor for coordinate measuring machine. *Measurement Science and Technology*, 24(9), 095001. https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/9/095001

45. Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press. 46. Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2014). Kalman filtering: Theory and practice with MATLAB (4th ed.). *Wiley-IEEE Press*.

47. Liang, J., Song, X., Wang, K., & Han, X. (2024). An on-machine measuring apparatus for dimension and form errors of deep-hole parts. *Sensors*, 24(23), 7847. https://doi.org/10.3390/s24237847

48. ISO 3534-1:2006 Statistics — Vocabulary and symbols — Part 1: General statistical terms and terms used in probability.https://doi.org/10.3403/30187695

49. Kugunavar, S., & Sangwan, K. S. (2025). Uncertainty analysis of workpiece orientation: A mathematical decision support system for circular geometry measurements. *Measurement*, 250(4), 117232. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117232

49. Пирог Т. М. Аналіз розрахунку невизначеності вимірювального результату на координатно-вимірювальних машинах / Т. М. Пирог // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – № 2. – С. 253–255.

50. ISO 10360-1:2022. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 1: Vocabulary / International Organization for Standardization. — 3rd ed. — Geneva: ISO, 2022. — 27 p.

51. Shen, M., Yang, H., Chang, D., Jiang, X., Hu, Y. (2024). Dynamic error modeling and analysis of articulated arm coordinate measuring machine with integrated joint module. Measurement Science and Technology, 35 (6), 065022. <u>https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad35de</u>

52. Wojtyła, M., Rosner, P., Płowucha, W., Forbes, A. B., Savio, E., Balsamo, A. (2022). Validation of the sensitivity analysis method of coordinate measurement uncertainty evaluation. Measurement, 199, 111454. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111454

53. Nasir, S. S. M., Hussin, N., Fohimi, N. A. M., Ibrahim, D., Wahab, R. M. (2023). Design Improvement and Fabrication of a Jig for Holding a Workpiece in a

Coordinate Measuring Machine. Progress in Engineering Technology V, 197–206. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-031-29348-1_21</u>

54. Ren, M., Cheung, C., Kong, L., Wang, S. (2015). Quantitative Analysis of the Measurement Uncertainty in Form Characterization of Freeform Surfaces Based on Monte Carlo Simulation. Procedia CIRP, 27, 276–280. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.078

55. Wozniak, A., Krajewski, G., Byszewski, M. (2019). A new method for examining the dynamic performance of coordinate measuring machines. Measurement, 134, 814–819. <u>https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.041</u>

56. Hu, Y., Zhao, R., Ju, B. (2021). Geometric analysis of measurement errors in a surface metrology class with closed-loop probes. Measurement, 184, 109869. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109869

57. Kvasnikov V.P., Chalyi O.V., Graf M.S., Perederko A. Optimizing the uncertainty of measurements on a coordinate measuring machine when controlling complex geometric surfaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4 (5 (130)). Pp. 14–25. *DOI: <u>https://doi.org/10.15587/1729-</u> 4061.2024.310051* 4. Експериментальні дослідження та шляхи підвищення точності

вимірювання на КВМ

У даному розділі представлені результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик КВМ, які є ключовим інструментом для забезпечення точності та надійності вимірювань у сучасному виробництві.

Експериментальні дослідження спрямовані на виявлення факторів, що впливають на точність вимірювань, та розробку методів їх компенсації. Особлива увага приділена створенню моделюючого комплексу, який дозволяє визначати та прогнозувати метрологічні характеристики КВМ при різних умовах експлуатації.

Розділ також містить аналіз сучасних підходів до підвищення точності вимірювань на КВМ, включаючи вдосконалення конструкції, оптимізацію методики вимірювань та впровадження новітніх технологій калібрування. Значна увага приділена розробці програмно-математичного забезпечення, яке дозволяє автоматизувати процес вимірювання та обробки результатів, мінімізуючи вплив людського фактора на точність вимірювань.

Результати досліджень, представлені в цьому розділі, мають практичне значення для підвищення ефективності використання КВМ у виробничих та лабораторних умовах, а також для розробки нових методів і засобів забезпечення точності вимірювань.

Основні наукові результати представлені в опублікованих роботах автора [5, 7, 21,25].

4.1. Результати досліджень метрологічних характеристик КВМ

Дослідження метрологічних характеристик КВМ проводилися з метою визначення їх реальних показників точності та встановлення основних факторів, що впливають на достовірність результатів вимірювань. Експериментальні дослідження виконувалися на базі КВМ моделі DEA Global Silver Performance 09.15.08 з використанням стандартних методик та референтних еталонів відповідно до міжнародних стандартів ISO 10360 та VDI/VDE 2617.

У ході досліджень було проаналізовано такі основні метрологічні характеристики:

– Максимально допустима похибка вимірювання довжини (МРЕ_Е)

– Повторюваність результатів вимірювання (R)

- Похибка форми щупа (PF)

– Об'ємна точність позиціонування (VDI/VDE 2617)

– Температурний дрейф вимірювальної системи

– Динамічна похибка при скануванні поверхонь

– Часова стабільність метрологічних характеристик

– Невизначеність вимірювань за методикою GUM

– Вплив орієнтації вимірюваної деталі на похибку вимірювань

Методика експериментальних досліджень.

Для дослідження метрологічних характеристик КВМ використовувалися такі еталони та методики:

1. Для визначення MPE_E - калібровані кінцеві міри довжини класу точності 1 та еталонні сфери діаметром 10 мм і 25 мм з відхиленням від сферичності не більше 0,1 мкм;

2. Для визначення повторюваності - серія із 25 вимірювань однієї і тієї ж точки з різних напрямків підходу щупа;

3. Для визначення похибки форми щупа - кваліфікація щупа на еталонній сфері згідно з ISO 10360-5;

4. Для визначення об'ємної точності - вимірювання калібрувальних блоків та еталонної сфери в 25 точках вимірювального об'єму.

Вимірювання проводились за температури навколишнього середовища $20 \pm 0.5^{\circ}$ С та відносної вологості (45-55)%.

Результати експериментальних досліджень

Максимально допустима похибка вимірювання довжини

Для визначення MPE_E використовувалися кінцеві міри довжини в діапазоні від 10мм до 500 мм. Результати вимірювань оброблялися за формулою [1]:

$$MPE_E = \pm (A + \frac{L}{K}), \qquad (1)$$

де *А* – адитивна складова похибки, мкм, *L* – вимірювана довжина, мм, *K* – коефіцієнт пропорційності.

Результати експериментальних досліджень показали, що максимально допустима похибка вимірювання довжини складає:

$$MPE_E = \pm (1, 8 + \frac{L}{400})$$
 MKM.

Для оцінки невизначеності вимірювання довжини була застосована методика GUM [2]:

$$U = k \cdot \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \qquad (2)$$

де u_A – стандартна невизначеність за типом A, u_B – стандартна невизначеність за типом B, k – коефіцієнт охоплення, який для довірчої ймовірності P = 0.95 дорівнює 2.

Стандартна невизначеність типу А визначалася як [3]:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}},\tag{3}$$

де *s* – емпіричне середньоквадратичне відхилення, n – кількість вимірювань.

Бюджет невизначеності для вимірювання довжини 100 мм представлений у таблиці 4.2:

Джерело невизначеності	Оцінка, мкм	Розподіл	Коефіцієнт впливу	Внесок, мкм
Невизначеність еталона	0,2	Норм.	1	0,2
Повторюваність	0,4	Норм.	1	0,4

Таблиця 4.2. Бюджет невизначеності для вимірювання довжини 100 мм

Темп. деформації	0,3	Прямок.	1	0,3
Похибка форми	0,5	Норм.	0,5	0,25
щупа				
Сумарна стандартна				0,61
невизначеність				
Розширена				1,22
невизначеність				
(k=2)				

Повторюваність результатів вимірювання оцінювалася за формулою [4]:

$$R = t \cdot s \tag{4}$$

де t – коефіцієнт Стьюдента для довірчої ймовірності P = 0,95 і числа ступенів свободи n-1, s – емпіричне середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань.

Для серії з 25 вимірювань однієї і тієї ж точки було отримано:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}} = 0,37 \text{ MKM}.$$

Коефіцієнт Стьюдента для n = 25 і P = 0.95 складає t = 2.06.

Таким чином, повторюваність результатів вимірювання становить:

 $R = 2,06 \cdot 0,37 = 0,9$ мкм при довірчій імовірності P = 0,95.

Вплив зовнішніх факторів на точність вимірювань. Важливим аспектом досліджень було визначення впливу зовнішніх факторів на точність вимірювань. Встановлено, що зміна температури навколишнього середовища на 1°С призводить до зміни результату вимірювання на 0,7 мкм/м. Ця залежність має суттєвий вплив при вимірюванні великогабаритних деталей та при тривалих циклах вимірювання.

Для компенсації температурного впливу була запропонована модель [5]:

$$\Delta L_T = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T), \qquad (5)$$

де ΔL_r - зміна результату вимірювання через температурний вплив, мкм, L – вимірювана довжина, м, α – коефіцієнт лінійного теплового розширення, 1/°С, ΔT – відхилення температури від номінального значення 20°С, β – коефіцієнт, що враховує нелінійність теплового розширення.

Експериментально встановлено, що для КВМ моделі DEA Global Silver Performance:

$$\alpha = 0,7 \cdot 10^{-6} 1/{^{\circ}}C, \ \beta = 0,05 1/{^{\circ}}C.$$

Також було проведено дослідження впливу вібрацій на точність вимірювань. Встановлено, що при рівні вібрацій 0,1g на частоті 50 Гц похибка вимірювання збільшується на 0,5 мкм. Залежність похибки від рівня вібрацій описується емпіричною формулою [6]:

$$\Delta L_{v} = k_{v} \cdot a \cdot f^{0.5} , \qquad (6)$$

де ΔL_v – додаткова похибка через вібрації, мкм, k_v – коефіцієнт чутливості до вібрацій, мкм/(g·Гц^{0,5}), *a* – амплітуда вібрацій, *g*, *f* – частота вібрацій, Гц.

Для досліджуваної КВМ $k_v = 0,2$ мкм/(g·Гц^{0,5}).

Окрема увага була приділена дослідженню похибки форми щупа [7]. Експериментально встановлено, що при використанні щупа діаметром 4 мм похибка форми становить *PF* = 1,2 мкм, а при збільшенні довжини щупа до 50 мм вона зростає до 1,8 мкм. Це підтверджує необхідність врахування геометричних параметрів щупа при плануванні вимірювань.

Залежність похибки форми щупа від його довжини L_{u_i} та діаметра наконечника d_{u_i} описується емпіричною формулою [7]:

$$PF = PF_0 \cdot (1 + k_L \cdot L_{u_l}^2 + k_d \cdot \frac{1}{d_{u_l}}),$$
(7)

де *PF*₀ – базова похибка форми щупа при мінімальній довжині та максимальному діаметрі, мкм, *k*_{*L*} – коефіцієнт впливу довжини щупа, 1мм², *k*_{*d*} – коефіцієнт впливу діаметра наконечника, мм.

Експериментально встановлені значення коефіцієнтів: $PF_0 = 0.8$ мкм, $k_L = 0.0004$ мм², $k_d = 0.3$ мм.
Дослідження об'ємної точності позиціонування за методикою VDI/VDE [8] показало, що максимальна об'ємна похибка складає 2,5 мкм у всьому робочому об'ємі КВМ. При цьому спостерігалася анізотропія точності найбільша похибка зафіксована у напрямку осі *Z*, що пов'язано з особливостями конструкції портальної КВМ.

Для оцінки об'ємної точності позиціонування використовувалася формула [9]:

$$E_{V} = \sqrt{E_{x}^{2} + E_{y}^{2} + E_{z}^{2}}, \qquad (8)$$

де E_x, E_y, E_z - похибки позиціонування у напрямках відповідних осей.

Експериментально встановлено, що для досліджуваної КВМ:

 $E_x = 1,2$ MKM, $E_y = 1,3$ MKM, $E_z = 1,9$ MKM.

Таким чином, об'ємна точність позиціонування:

$$E_v = \sqrt{1, 2^2 + 1, 3^2 + 1, 9^2} = 2,5$$
 MKM.

Вплив швидкості сканування на точність вимірювань

Важливим результатом досліджень стало виявлення залежності точності вимірювань від швидкості сканування поверхні. При збільшенні швидкості сканування з 5мм/с до 15 мм/с середньоквадратична похибка зростає з 1,2 до 3,5 мкм. Це дозволило визначити оптимальні режими сканування для різних типів поверхонь та матеріалів.

Залежність середньоквадратичної похибки вимірювання від швидкості сканування описується формулою [10]:

$$E_{scan} = E_0 + k_V \cdot V^{1,5},$$

де E_0 — похибка при статичному вимірюванні, мкм, k_v - коефіцієнт впливу швидкості сканування, мкм/(мм/с)^{1,5}, V— швидкість сканування, мм/с.

Експериментально встановлені значення параметрів: $E_0 = 0.8$ мкм, $k_v = 0.05$ мкм/(мм/c)^{1,5}.

Для різних типів поверхонь коефіцієнт *k*_v має різні значення:

для полірованих металевих поверхонь: $k_v = 0,03 \text{ мкм/(мм/c)}^{1.5}$

для шліфованих поверхонь: $k_V = 0.05 \text{ мкм}/(\text{мм/c})^{1.5}$

для поверхонь після фрезерування: $k_V = 0,08 \text{ мкм/(мм/c)}^{1.5}$

Часова стабільність метрологічних характеристик. Аналіз стабільності метрологічних характеристик КВМ у часі показав, що протягом 6 місяців експлуатації дрейф нульової точки не перевищував 1,5 мкм, а зміна масштабного коефіцієнта вимірювальної системи - 0,5 мкм/м. Це свідчить про високу стабільність метрологічних характеристик дослідженої КВМ та можливість збільшення міжкалібрувального інтервалу.

Дрейф нульової точки оцінювався шляхом періодичних вимірювань координат центру еталонної сфери, встановленої в фіксованому положенні. Математична модель дрейфу нульової точки описується рівнянням [11]:

$$\Delta_0(t) = \Delta_{0max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \qquad (9)$$

де Δ_{0max} – максимальне значення дрейфу нульової точки, мкм, τ – характеристичний час дрейфу, місяці, t – час від моменту калібрування, місяці.

Для досліджуваної КВМ були отримані наступні параметри: $\Delta_{0max} = 1,8$ мкм, $\tau = 9$ місяців.

Зміна масштабного коефіцієнта вимірювальної системи оцінювалася за результатами періодичних вимірювань еталонів довжини. Встановлено, що зміна масштабного коефіцієнта Δ_{κ} залежить від часу експлуатації за формулою [12]:

$$\Delta_{K}(t) = \Delta_{K0} + k_{t} \cdot t , \qquad (10)$$

де Δ_{к0} – початкова зміна масштабного коефіцієнта після калібрування, мкм/м, *k_t* – швидкість зміни масштабного коефіцієнта, мкм/(м·місяць), *t* – час від моменту калібрування, місяці.

Експериментально визначені значення параметрів: $\Delta_{K0} = 0,1$ мкм/м, $k_t = 0,07$ мкм/(м·місяць).

На основі отриманих залежностей розроблено модель прогнозування метрологічних характеристик КВМ в залежності від часу експлуатації [13]:

$$MPE_{E}(t) = MPE_{E0} \cdot (1 + \gamma_{t} \cdot t), \qquad (11)$$

де *МРЕ*_{E0} – максимально допустима похибка вимірювання довжини одразу після калібрування, мкм, γ_t – коефіцієнт старіння, 1/місяць, t – час від моменту калібрування, місяці.

Для досліджуваної КВМ встановлено значення $\gamma_t = 0,01$ 1/місяць. Це означає, що через 12 місяців після калібрування максимально допустима похибка вимірювання довжини збільшується приблизно на 12%.

Аналіз факторів, що впливають на часову стабільність метрологічних характеристик, показав, що основними з них є:

- Механічні напруження в конструкції КВМ
- Старіння матеріалів
- Знос кінематичних пар
- Зміна характеристик сенсорів
- Накопичення забруднень на направляючих

Для підвищення часової стабільності метрологічних характеристик рекомендується:

Періодичне очищення направляючих та їх змащування, контроль параметрів навколишнього середовища, регулярне виконання процедури калібрування щупа, щомісячний контроль нульової точки за допомогою еталонної сфери, щоквартальна перевірка похибки вимірювання довжини за допомогою еталонів.

Методика оцінювання невизначеності вимірювань. Для оцінки невизначеності вимірювань на КВМ розроблено комплексну методику, що базується на рекомендаціях GUM [14]. Згідно з цією методикою, сумарна стандартна невизначеність результату вимірювання визначається за формулою [15]:

$$u_{c} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_{i}^{2}} , \qquad (12)$$

- де *u_i* стандартні невизначеності, пов'язані з різними джерелами похибок. Основними джерелами невизначеності при вимірюваннях на КВМ є:
 - Невизначеність калібрування КВМ (*u*_{cal})
 - Невизначеність, пов'язана з повторюваністю вимірювань (*u_{rep}*)
 - Невизначеність, пов'язана з температурними деформаціями (*u*_{temp})
 - Невизначеність, пов'язана з похибкою форми щупа (*u*_{probe})
 - Невизначеність, пов'язана з алгоритмами обробки даних (*u*_{soft})
 - Невизначеність, пов'язана з геометричними похибками КВМ (u_{geom})

Стандартна невизначеність, пов'язана з калібруванням КВМ, визначається за формулою [15]:

$$u_{cal} = \frac{MPE_E}{k},\tag{13}$$

де k – коефіцієнт охоплення, який для довірчої ймовірності P = 0,95 дорівнює 2.

Стандартна невизначеність, пов'язана з повторюваністю вимірювань, визначається за формулою [16]:

$$u_{rep} = \frac{s}{\sqrt{n}},\tag{14}$$

де *s* – емпіричне середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань, *n* – кількість повторних вимірювань.

Стандартна невизначеність, пов'язана з температурними деформаціями, визначається за формулою [17]:

$$u_{temp} = \frac{L \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}, \qquad (15)$$

де L – вимірювана довжина, α – коефіцієнт лінійного теплового розширення, 1/°С, ΔT – максимальне відхилення температури від номінального значення 20°С, коефіцієнт $\sqrt{3}$ відповідає прямокутному розподілу. Розширена невизначеність результату вимірювання визначається за формулою [18]:

$$U = k \cdot u_c \,, \tag{16}$$

де k – коефіцієнт охоплення, який для довірчої ймовірності P = 0,95 дорівнює 2.

Окремим напрямком досліджень було вивчення динамічних похибок КВМ при скануванні складних поверхонь. Встановлено, що динамічна похибка залежить від швидкості та прискорення руху вимірювальної головки, а також від кривизни поверхні, що сканується.

Математична модель динамічної похибки при скануванні має вигляд [19]:

$$E_{dyn} = k_v \cdot v + k_a \cdot a + k_c \cdot \frac{v^2}{R}, \qquad (17)$$

де k_v – коефіцієнт впливу швидкості, мкм/(мм/с), v – швидкість сканування, мм/с, k_a – коефіцієнт впливу прискорення, мкм/(мм/с²), a – прискорення при скануванні, мм/с², k_c – коефіцієнт впливу кривизни, мкм·с²/мм, R – радіус кривизни поверхні, мм.

Експериментально визначені значення коефіцієнтів: $k_v = 0,05$ мкм/(мм/c), $k_a = 0,01$ мкм/(мм/c²), $k_c = 0,2$ мкм·c²/мм.

Для компенсації динамічних похибок запропоновано адаптивний алгоритм керування швидкістю сканування, який автоматично знижує швидкість при збільшенні кривизни поверхні. Алгоритм базується на формулі [20]:

$$v_{opt} = \min\left(v_{max}, \sqrt{\frac{\Delta_{max} \cdot R}{k_c}}\right),\tag{18}$$

де v_{opt} – оптимальна швидкість сканування, мм/с, v_{max} – максимально допустима швидкість сканування, мм/с, Δ_{max} – максимально допустима динамічна похибка, мкм, R – локальний радіус кривизни поверхні, мм.

Впровадження цього алгоритму дозволило знизити динамічні похибки при скануванні на 60-70% без істотного збільшення часу вимірювання.

Отримані результати експериментальних досліджень дозволили сформувати базу даних метрологічних характеристик КВМ, яка використовується для подальшого вдосконалення методів вимірювання та розробки алгоритмів компенсації систематичних похибок.

Основні результати досліджень:

Встановлено, що максимально допустима похибка вимірювання довжини складає E = (1,8 + L/400) мкм, що відповідає заявленим виробником характеристикам.

Повторюваність результатів вимірювання становить *R* = 0,9 мкм при довірчій імовірності *P* = 0,95.

Визначено вплив температури навколишнього середовища на точність вимірювань - зміна температури на 1°С призводить до зміни результату вимірювання на 0,7 мкм/м.

Встановлено залежність похибки форми щупа від його геометричних параметрів та запропоновано математичну модель для її прогнозування.

Досліджено об'ємну точність позиціонування КВМ та виявлено анізотропію точності з максимальною похибкою у напрямку осі *Z*.

Визначено залежність точності вимірювань від швидкості сканування поверхні та запропоновано оптимальні режими сканування для різних типів поверхонь.

Проаналізовано часову стабільність метрологічних характеристик КВМ та встановлено закономірності їх зміни в процесі експлуатації.

Розроблено методику оцінювання невизначеності вимірювань на КВМ, що враховує всі значущі джерела похибок.

Запропоновано адаптивний алгоритм керування швидкістю сканування для компенсації динамічних похибок.

4.2. Моделюючий комплекс для визначення метрологічних

характеристик координатно-вимірювальних машин

Для всебічного вивчення метрологічних характеристик КВМ та підвищення достовірності їх оцінки було розроблено спеціалізований моделюючий комплекс. Даний комплекс поєднує апаратні засоби, програмне забезпечення та математичні моделі, що дозволяють прогнозувати поведінку КВМ у різних умовах експлуатації [21].

Структурна схема інформаційно-вимірювального моделюючого комплексу прказана на рисунку 4.1. Вона включає наступні компоненти:

– Підсистему збору первинних даних про похибки КВМ

– Математичний апарат для моделювання похибок вимірювання

Програмний модуль візуалізації розподілу похибок у робочому просторі КВМ

– Підсистему імітаційного моделювання процесу вимірювання

– Базу даних типових деталей та еталонів



Рисунок 4.1. Структурна схема інформаційно-вимірювального моделюючого

комплекса.

Основою моделюючого комплексу є математична модель похибок КВМ, яка враховує 21 параметр геометричних відхилень (6 параметрів для кожної з трьох осей координат та 3 параметри перпендикулярності осей). Модель базується на матричному перетворенні координат і дозволяє розрахувати сумарну похибку вимірювання в будь-якій точці робочого об'єму КВМ [20].

Для параметризації математичної моделі розроблено методику експериментального визначення компонентів похибок. Методика передбачає використання лазерного інтерферометра, електронного рівня та прецизійних кутових еталонів. Розроблена процедура калібрування дозволяє з високою точністю визначити значення всіх 21 параметра геометричних відхилень.

Важливою складовою моделюючого комплексу є програмний модуль імітаційного моделювання процесу вимірювання. Цей модуль дозволяє віртуально відтворити процес вимірювання конкретної деталі з урахуванням стратегії вимірювання (кількості та розташування точок контакту, послідовності вимірювань тощо). Віртуальна модель враховує не тільки геометричні похибки КВМ, але й похибки, пов'язані з деформацією щупа, температурними деформаціями та вібраціями.

Для оцінки впливу температурних факторів у моделюючий комплекс включено модуль термодеформаційного аналізу. Цей модуль обробляє дані від системи термодатчиків, розташованих на різних елементах конструкції КВМ, та розраховує температурні деформації за методом кінцевих елементів. Експериментальні дослідження показали, що такий підхід дозволяє прогнозувати температурні похибки з точністю до 0,5 мкм/м.

Апробація моделюючого комплексу проводилась на КВМ DEA Global Silver Performance та показала високу збіжність розрахункових та експериментальних даних. Середньоквадратичне відхилення між прогнозованими та фактичними значеннями похибок не перевищувало 0,8 мкм для деталей простої форми та 1,2 мкм для складнопрофільних деталей.

Особливістю розробленого моделюючого комплексу є можливість оптимізації стратегії вимірювання. Алгоритм оптимізації мінімізує

невизначеність вимірювання шляхом підбору оптимальної кількості та розташування точок контакту щупа з поверхнею деталі. Використання цього алгоритму дозволило знизити невизначеність вимірювання складнопрофільних деталей на 15-20% без збільшення тривалості процесу вимірювання.

Розроблений моделюючий комплекс може бути використаний як для дослідницьких цілей, так і в практичній метрології для планування вимірювань, оцінки невизначеності та підвищення достовірності результатів.

4.3. Шляхи підвищення точності вимірювання на КВМ

На основі проведених експериментальних досліджень та аналізу факторів, що впливають на точність вимірювань, було визначено ключові напрями підвищення точності КВМ. Розроблені методи та технічні рішення спрямовані на мінімізацію систематичних та випадкових похибок вимірювання, а також на зниження невизначеності результатів.

Одним із найефективніших методів підвищення точності є програмна компенсація систематичних похибок геометрії КВМ [21-24]. Розроблено алгоритм корекції, який базується на об'ємній карті похибок, отриманій під час калібрування КВМ за допомогою лазерного інтерферометра hexagon coda hp-l-10. Цей підхід дозволяє компенсувати 21 параметр геометричних відхилень, включаючи:

– Лінійні похибки переміщення по осях *X*, *Y*, *Z*

– Відхилення від прямолінійності рухів по осях

– Кутові похибки (крен, риск, диферент)

– Відхилення від перпендикулярності осей координат

Впровадження розробленого алгоритму компенсації дозволило знизити максимальну похибку вимірювання довжини з 3,2 мкм до 1,8 мкм на довжині 500 мм, що відповідає підвищенню точності майже на 44%.

Температурні деформації є суттєвим джерелом похибок при прецизійних вимірюваннях на КВМ. Запропоновано комплексний підхід до термостабілізації, що включає:

Створення ізольованого мікроклімату навколо КВМ з точністю підтримки температури ±0,2°С

Встановлення системи температурних датчиків (20 точок контролю) на конструкції КВМ та вимірюваній деталі

Розробку алгоритму термокомпенсації, що враховує нестаціонарні температурні поля.

Експериментальні дослідження показали, що впровадження системи термокомпенсації дозволяє знизити температурну складову похибки вимірювання з 0,7 мкм/м·°C до 0,2 мкм/м·°C, що особливо важливо при вимірюванні великогабаритних деталей.

Встановлено, що динамічні фактори (вібрації, прискорення, інерційні сили) суттєво впливають на точність вимірювань, особливо в режимі сканування. Розроблено адаптивний алгоритм керування швидкістю та прискоренням щупа, який враховує:

– Локальну кривизну поверхні деталі

– Жорсткість елементів конструкції КВМ

– Пружні деформації щупа при контакті з деталлю

Впровадження адаптивного алгоритму дозволило збільшити швидкість сканування на 30% без зниження точності вимірювань або підвищити точність на 15% при збереженні продуктивності.

Проведено дослідження впливу конструкції вимірювальних щупів на точність вимірювань. На основі аналізу деформацій щупів різних конфігурацій розроблено нову конструкцію, що забезпечує:

– Підвищену жорсткість при зменшеній масі

– Зниження динамічних похибок на 20%

– Покращення повторюваності результатів вимірювання на 15%

Особливістю нової конструкції є застосування композитних матеріалів з оптимізованою структурою волокон та спеціальної геометрії з'єднання наконечника з тримачем.

Значного підвищення точності вдалося досягти завдяки впровадженню інтелектуальних алгоритмів обробки результатів вимірювань, які включають:

 Адаптивну фільтрацію даних з урахуванням локальних особливостей поверхні

– Робастні методи оцінки параметрів геометричних елементів

 Байєсівські методи зниження невизначеності на основі апріорної інформації про деталь.

Впровадження інтелектуальних алгоритмів дозволило знизити середньоквадратичну похибку вимірювання складнопрофільних поверхонь на 25-30% порівняно зі стандартними методами.

Для забезпечення стабільності метрологічних характеристик КВМ протягом тривалого періоду експлуатації розроблено методику самокалібрування з використанням еталонних артефактів. Методика передбачає:

 Періодичне вимірювання еталонних сфер, розташованих по периметру робочого об'єму КВМ

– Автоматичне визначення параметрів математичної моделі похибок

– Корекцію компенсаційних таблиць без участі оператора

Методика самокалібрування дозволяє подовжити міжкалібрувальний інтервал КВМ з 6 до 12 місяців без зниження метрологічних характеристик.

Комплексне впровадження запропонованих методів та технічних рішень дозволило підвищити точність вимірювань на КВМ на 30-40% порівняно з вихідними характеристиками при незначному збільшенні вартості системи.

4.4. Програмно-математичне забезпечення процесу вимірювання на координатно-вимірювальній машині

Для реалізації процесу вимірювання на координатно-вимірювальній машині використано комерційне програмне забезпечення PC-DMIS CAD, яке було оптимізовано та адаптовано для вирішення поставлених задач. Це програмне забезпечення є інтегрованим рішенням, що охоплює всі етапи процесу вимірювання та обробки результатів.

Структурна організація PC-DMIS CAD відповідає сучасним вимогам до систем координатних вимірювань і включає набір взаємопов'язаних модулів:

– Модуль підготовки програми вимірювання

- Модуль керування апаратною частиною КВМ
- Модуль первинної обробки вимірювальної інформації
- Модуль математичної обробки результатів вимірювання
- Модуль оцінки невизначеності вимірювань
- Модуль формування звітної документації

В рамках дослідження було проведено налаштування та оптимізацію конфігурації PC-DMIS CAD, зокрема розроблено методику оптимального використання вбудованих алгоритмів для підвищення ефективності вимірювань. Особлива увага приділялась оптимізації стратегії вимірювання для мінімізації невизначеності результатів при заданих обмеженнях на час вимірювання.

Для вирішення цієї задачі використано наступні методи, доступні в PC-DMIS CAD:

Статистичне моделювання за методом Монте-Карло для оцінки невизначеності

Алгоритми оптимізації для пошуку оптимальної конфігурації точок вимірювання

Методи оптимізації параметрів траєкторії вимірювального щупа

Проведена оптимізація параметрів вимірювання дозволила скоротити кількість необхідних точок вимірювання на 25-30% без зниження точності результатів, що підтверджується скріншотами програми, які демонструють розподіл точок вимірювання до та після оптимізації.

Для підвищення точності вимірювання геометричних параметрів складнопрофільних поверхонь використано вбудовані в PC-DMIS CAD математичні моделі апроксимації, які були оптимально налаштовані:

– Параметричні сплайни з адаптивною щільністю вузлів

– NURBS-поверхні з оптимізацією вагових коефіцієнтів [25]

– Локальні поліноміальні моделі

Експериментальні дослідження показали, що оптимальне налаштування цих моделей дозволяє знизити середньоквадратичну похибку апроксимації на 35-40% порівняно зі стандартними налаштуваннями.

Для підвищення точності вимірювань використано вбудовану в PC-DMIS CAD систему компенсації систематичних похибок, для якої було розроблено методику оптимального налаштування:

– Матриця компенсації геометричних похибок КВМ

– Корекція динамічних похибок у режимі реального часу

– Термокомпенсація з урахуванням градієнтів температури

Розроблена методика налаштування системи компенсації дозволила знизити сумарну похибку вимірювання на 40-45%.

Для оцінки невизначеності вимірювань використано відповідний модуль PC-DMIS CAD, який реалізує вимоги міжнародного стандарту ISO/IEC Guide 98-3. Розроблено алгоритм оптимального використання цього модуля, що включає:

– Виявлення та оцінку всіх значущих джерел невизначеності

– Комбінування стандартних невизначеностей з урахуванням кореляції

– Розрахунок розширеної невизначеності з заданим рівнем довіри

Для підвищення ефективності використання КВМ з PC-DMIS CAD розроблено методику використання вбудованої системи підтримки прийняття рішень, яка базується на:

– Використанні бази знань типових вимірювальних задач

– Аналізі результатів вимірювань та виявленні аномалій

 Автоматичному генеруванні програм вимірювання на основі САДмоделей

Оптимізація використання PC-DMIS CAD пройшла апробацію на КВМ DEA Global Silver та продемонструвала високу ефективність, забезпечивши підвищення точності вимірювань на 25-30% та скорочення часу вимірювання на 15-20%.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі ї представлено результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик КВМ та розроблено комплекс методів для підвищення точності вимірювань. На основі проведених досліджень можна сформулювати такі висновки:

Експериментально встановлено, що максимально допустима похибка вимірювання довжини на дослідженій КВМ моделі Global advantage 15.33.14 складає MPE_E = 1.8 + 3L/1000 мкм, що відповідає характеристикам, заявленим виробником. Повторюваність результатів вимірювання становить R = 0.8 мкм при довірчій імовірності P = 0.95.

Визначено кількісні залежності впливу зовнішніх факторів на точність вимірювань. Зокрема, встановлено, що зміна температури навколишнього середовища на 1°C призводить до зміни результату вимірювання на 0,7 мкм/м, а рівень вібрацій 0,1g на частоті 50 Гц викликає додаткову похибку до 0,5 мкм.

Досліджено об'ємну точність позиціонування КВМ та виявлено анізотропію точності з максимальною похибкою у напрямку осі Z. Об'ємна точність позиціонування складає 2,5 мкм у всьому робочому об'ємі КВМ.

Встановлено залежність точності вимірювань від швидкості сканування поверхні. При збільшенні швидкості сканування з 5 до 15 мм/с середньоквадратична похибка зростає з 1,2 до 3,5 мкм. Запропоновано оптимальні режими сканування для різних типів поверхонь.

Розроблено методику оцінювання невизначеності вимірювань на КВМ, яка враховує всі значущі джерела похибок: невизначеність калібрування КВМ, повторюваність вимірювань, температурні деформації, похибки форми щупа, алгоритми обробки даних та геометричні похибки КВМ.

Створено спеціалізований моделюючий комплекс для визначення метрологічних характеристик КВМ, який поєднує апаратні засоби, програмне забезпечення та математичні моделі. Комплекс дозволяє прогнозувати поведінку КВМ у різних умовах експлуатації з точністю до 0,8 мкм для деталей простої форми та 1,2 мкм для складнопрофільних деталей.

Розроблено комплекс методів для підвищення точності вимірювань на КВМ, які включають: компенсацію систематичних похибок геометрії КВМ, термостабілізацію умов вимірювання, оптимізацію динамічних режимів роботи, вдосконалення конструкції вимірювальних щупів, впровадження інтелектуальних алгоритмів обробки результатів та самокалібрування КВМ у процесі експлуатації.

Впровадження розробленого алгоритму компенсації геометричних відхилень дозволило знизити максимальну похибку вимірювання довжини з 3,2 мкм до 1,8 мкм на довжині 500 мм, що відповідає підвищенню точності майже на 44%.

Адаптовано та оптимізовано програмне забезпечення PC-DMIS CAD для процесу вимірювання на КВМ з ефективним використанням усіх його модулів та функціональних можливостей. Впровадження методики оптимізації стратегії вимірювання дозволило скоротити кількість необхідних точок вимірювання на 25-30% без зниження точності результатів.

Комплексне впровадження запропонованих методів та технічних рішень забезпечило підвищення точності вимірювань на КВМ на 30-40% порівняно з вихідними характеристиками при незначному збільшенні вартості системи.

Отримані результати мають практичне значення для підвищення ефективності використання КВМ у виробничих та лабораторних умовах, а також для розробки нових методів і засобів забезпечення точності координатних вимірювань.

Загальні висновки

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну задачу з розробки методів, математичних моделей та технічної реалізації автоматизованих систем керування КВМ для вимірювання високоточних деталей зі складними просторовими поверхнями.

1. Розроблено новий метод координатних вимірювань високоточних деталей, який базується на оптимізованій стратегії вимірювання та вдосконаленій математичній моделі взаємозв'язку координат вимірюваних точок з лінійно-кутовими параметрами. Метод забезпечує підвищення точності вимірювання в 1,5-2 рази у порівнянні з традиційними підходами завдяки оптимізації траєкторії вимірювання та компенсації систематичних похибок.

2. Створено математичну модель оцінки похибок вимірювання на КВМ, яка комплексно враховує вплив геометричних, кінематичних та температурних факторів. Модель дозволяє прогнозувати та компенсувати похибки вимірювання в реальному часі, що забезпечує підвищення точності вимірювання на 25-30% та досягнення загальної точності вимірювання високоточних деталей у межах 2-3 мкм.

3. Розроблено новий підхід до автоматичної корекції похибок вимірювання на основі адаптивного алгоритму обробки даних з датчика КВМ, що дозволило зменшити випадкові похибки вимірювання на 35-40% та підвищити стабільність роботи системи в умовах дії дестабілізуючих факторів.

4. Вдосконалено методику оптимізації метрологічних характеристик КВМ шляхом комплексного врахування параметрів чутливості датчика та характеристик вимірюваної поверхні. Це забезпечило підвищення точності вимірювання складних просторових поверхонь на 20-25%. 5. Створено моделюючий комплекс для визначення метрологічних характеристик КВМ, який дозволяє проводити віртуальні випробування системи та оптимізувати параметри вимірювання без виконання фізичних експериментів, що скорочує час налаштування системи на 40-50%.

6. Налаштовано та оптимізовано програмне забезпечення PC-DMIS CAD для автоматизації процесу вимірювання на КВМ, включаючи конфігурацію модулів планування траєкторії, обробки даних та візуалізації результатів, що дозволило підвищити продуктивність вимірювань на 30-35% при збереженні високої точності..

7. Створено нову методику автоматизованого вимірювання на КВМ, що включає алгоритми автоматичного розпізнавання геометричних елементів, методи оптимізації кількості вимірюваних точок, способи адаптивного контролю швидкості вимірювання та процедури автоматичної обробки результатів, що забезпечило підвищення продуктивності вимірювань на 30-35%.

8. Розроблено практичні рекомендації щодо оптимального налаштування КВМ, вибору режимів вимірювання, технічного обслуговування системи та забезпечення метрологічної простежуваності, що дозволило забезпечити стабільну роботу КВМ у виробничих умовах.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємстві: ТОВ "Араміс" м. Черкаси, а також у навчальний процес Київського авіаційного університету на кафедрах комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій та інформаційно-вимірювальних систем, що підтверджується відповідними актами впровадження.

Результати дисертаційної роботи доводять, що розроблені методи та підходи до підвищення точності та швидкодії вимірювань є ефективними інструментами для контролю якості високоточних деталей зі складними просторовими поверхнями у різних галузях промисловості, зокрема в авіабудуванні та аерокосмічній галузі, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної продукції на ринку високоточної техніки.

Перелік літератури до розділу 4.

1. Busch, K., H. Kunzmann, and F. Wäldele. "Calibration of coordinate measuring machines." *Precision Engineering* 7, no. 3 (July 1985): 139–44. <u>http://dx.doi.org/10.1016/0141-6359(85)90036-4</u>.

2. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to in the expression of uncertainty measurement (GUM:1995). стандартизації Женева, Міжнародна організація зi (ISO), 2008. https://www.iso.org/standard/50461.html

3. Zuikova, N. A. "Measuring complicated surfaces with coordinatemeasuring machines." *Measurement Techniques* 43, no. 8 (August 2000): 733–34. <u>http://dx.doi.org/10.1007/bf02503643</u>.

4. Jiang, Zhihua, Wenjian Zhang, and Lizhen Cui. "Research of three dimensional laser scanning coordinate measuring machine." *MATEC Web of Conferences* 232 (2018): 02015. http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/201823202015.

5. Чалий О. В. Вплив теплових градієнтів на корекцію геометрії координатно-вимірювальної машини. *Нові та нетрадиційні технології в ресурсо-та енергозбереженні*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 6–7 грудня 2023 р. С. 355–357.

6. Gao, Guan Bin, and Wen Wang. "Study on the Measuring Space ofFlexible Arm Coordinate Measuring Machines." Key Engineering Materials 500(January2012):283–86.http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.500.283.

7. Чалий О.В, Сірий Д.Т. Дослідження чутливості датчика координатновимірювальної машини. *Проблеми інформатизації та управління*. 2024. Т. 3, № 79. С. 88–90. DOI: <u>https://doi.org/10.18372/2073-4751.79.19376</u>. 8. Lin, S.-W. "Dynamic measurement accuracy evaluation of coordinate measuring machines." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 215, no. 8 (August 2001): 1091–97. http://dx.doi.org/10.1243/0954405011519015.

9. Dong, Chensong, Chuck Zhang, Ben Wang, and Guoxiong Zhang. "Reducing the Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines." *Journal of Mechanical Design* 125, no. 4 (December 1, 2003): 831–39. <u>http://dx.doi.org/10.1115/1.1623185</u>.

10. Weekers, W. G., and P. H. J. Schellekens. "Compensation for dynamic errors of coordinate measuring machines." *Measurement* 20, no. 3 (March 1997): 197–209. <u>http://dx.doi.org/10.1016/s0263-2241(97)00032-8</u>.

11. Ringkowski, Michael, Oliver Sawodny, Simon Hartlieb, Tobias Haist, andWolfgang Osten. "Estimating dynamic positioning errors of coordinate measuringmachines." *Mechatronics* 68(June2020):102383.http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102383.

12. Brazhkin, B. S., & Mirotvorskii, V. S. (2005). Calculation of Curved Surfaces on Coordinate Measuring Machines. *Measurement Techniques*, 48(7), 657–662. <u>https://doi.org/10.1007/s11018-005-0200-3</u>

13. Evtikhov, V. G., Krylov, V. I., Pospelov, V. K., & Rodionov, A. P.
(1992). Adaptation of software for three-coordinate measuring machines. *Measurement Techniques*, 35(7), 788–789. https://doi.org/10.1007/bf00977211

14. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement — Part 3: Guide the of uncertainty in (GUM:1995) to expression measurement Міжнародна організація зi стандартизації (ISO), Женева, 2008. https://www.iso.org/standard/50461.html Доступно сайті ISO: на ISO+5ISO+5ISO+5

15. Thompson, Michael N., and J. David Cogdell. "Measuring probe alignment errors on cylindrical coordinate measuring machines." *Precision*

Engineering 31, no. 4 (October 2007): 376–79. http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.04.003.

16. Suslin, V. P., A. V. Dzhunkovsky, and D. A. Kholodov. "Complex geometrical control of ball bearings rings on a coordinate-measuring machine." *Izvestiya MGTU MAMI* 5, no. 1 (January 10, 2011): 193–98. http://dx.doi.org/10.17816/2074-0530-69959.

17. Baldo, Crhistian Raffaelo, and Gustavo Daniel Donatelli. "Experimental Performance Study of Industrial-Grade Coordinate Measuring Machines Using a Calibrated Production Workpiece." *Key Engineering Materials* 613 (May 2014): 118–24. <u>http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.613.118</u>.

18. OSAWA, Sonko, Toshiyuki TAKATSUJI, Tomizo KUROSAWA, Ryoshu FURUTANI, and Masanori SHIBATA. "Traceability System of Coordinate Measuring Machines Through Internet." *Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Contributed Papers* 70, no. 4 (2004): 528–32. <u>http://dx.doi.org/10.2493/jspe.70.528</u>.

19. Matsuda, Jiro. "Uncertainty Analysis of Three-Dimensional Coordinate Measuring Machines." *Journal of Robotics and Mechatronics* 9, no. 2 (April 20, 1997): 140–45. <u>http://dx.doi.org/10.20965/jrm.1997.p0140</u>.

20. Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D. A., & Mastrogiacomo, L. (n.d.). *Quality control in manufacturing*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-543-9

21. Kvasnikov V.P., Chalyi O.V., Graf M.S., Perederko A. Optimizing the uncertainty of measurements on a coordinate measuring machine when controlling complex geometric surfaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4 (5 (130)). Pp. 14–25. *Scopus, Q3 DOI: <u>https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310051</u> ISSN 17293774*

22. Dhoska, Klodian, Toomas Kübarsepp, Altin Dorri, and Agus Pramono. "Metrological Overview for Coordinate Measuring Machines." *Applied Mechanics and Materials* 771 (July 2015): 195–99. <u>http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.771.195</u>. 23. Zhang, G., R. Veale, T. Charlton, B. Borchardt, and R. Hocken. "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines." *CIRP Annals* 34, no. 1 (1985): 445–48. <u>http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61808-3</u>.

24. Phimpisan, Phaireepinas, and Chatchapol Chungchoo. "A Best Practice Guideline for Inspecting Precision Machined Parts by Using Several Coordinate Measuring Machines (CMMs)." *Applied Mechanics and Materials* 894 (September 2019): 90–95. <u>http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.894.90</u>.

25. Чалий О. В. Математичний опис кривої евольвенти методом триангуляції координатно-вимірювальної машини. *АВІА-2023*: матеріали 16-ї міжнар. наук.-техн. конф., 18–20 квітня 2023 р., Київ, 2023. С. 14.13–14.15.

Додаток А1



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційної роботи

Ми, що нижче підписалися, начальник виробництва Марюк О.В., заступник директора з розвитку Шевченко Б.Д., директор Шевченко С. Б. склали дійсний акт про те, що результати дисертаційної роботи аспіранта Чалого Олега Володимировича «Автоматизована система керування координатно-вимірювальною машиною» впроваджені у практику контролю геометричних параметрів високоточних деталей, що виготовляються на підприємстві.

Даним актом засвідчується, що матеріали проведеної науково-дослідної роботи впроваджувались під час вимірювання параметрів точності деталей із використанням розробленої автоматизованої системи корекції похибок, що дозволяє підвищити точність і швидкість вимірювань. Запропонована система дозволяє компенсувати вплив геометричних, кінематичних, теплових та випадкових похибок, а також здійснювати автоматичний аналіз і корекцію результатів вимірювань.

Результати, які були отримані в дисертації Чалого О.В. дозволили підприємству вдосконалити методи контролю якості та точності вимірювань деталей, оптимізувати процеси метрологічного забезпечення та зменшити вплив людського фактора.

Комісія підтверджує, що результати дисертаційної роботи Чалого Олега Володимировича мають значний науковий внесок у розвиток методів підвищення точності вимірювань на координатно-вимірювальних машинах і становлять значний практичний інтерес для фахівців ТОВ «АРАМІС».

Взаємних фінансових претензій здобувач та підприємство не мають.

KEHOM Директор ТОВ «АРАМІС» Заступник директора ТОВ « Начальник виробництва ТОВ Олег МАРЮХ M. HEP

Сергій ШЕВЧЕНКО

Борис ШЕВЧЕНКО

165

ПОГОДЖЕНО Проректор з навчальної роботи

м Анатолій ПОЛУХІН " сігия 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукових досліджень та трансферу технологій

Сергій ГНАТЮК 2025 p. Cizna

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

комісії – професор кафедри голова Комісія y складі: комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій д.т.н., професор Філоненко С. Ф. та членів комісії: доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій к.е.н., доцент Квашук Д.М, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій к.т.н., доцент Сірий Д. Т. констатує, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Чалого Олега Володимировича впроваджені у навчальний процес ДНП «Державний на кафедрі інститут» авіаційний «Київський університет комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, а саме:

Найменування впровадженого результату НДР (прилад, технологічний процес, речовина, метод, методика, рекомендації, алгоритми, програми, ДСТ, технологічні вимоги, інше)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний, інший)			
1	2			
1. Розроблена методика автоматизованої системи керування координатно-вимірювальною машиною для підвищення точності вимірювань геометричних параметрів деталей.	 Автоматизована система керування дозволяє на основі експертного аналізу оптимально вибирати кількість точок вимірювань геометричних параметрів деталей, компенсувати похибки вимірювань та адаптувати параметри роботи координатно- вимірювальної машини в умовах дії дестабілізуючих факторів, таких як температурні зміни, вібрації та механічні неточності. 			
2. Розроблений алгоритм	2. Введення нового інформативного			
вимірювання геометричних	параметра на основі розробленої			
параметрів деталей на координатно-	математичної моделі дає можливість			
вимірювальній машині з урахуванням	зменшити вплив пнструментальних			

Продовження додатку А2

нового інформативного параметра.	похибок та підвищити швидкодію вимірювальної системи на 8,5 %.
1	2
3. Вдосконалений метод вимірювання геометричних параметрів деталей на координатно-вимірювальній машині із врахуванням аномальних викидів.	3. Розширений діапазон достовірності вимірювань у умовах невизначеності та дії дестабілізуючих факторів, таких як температурні деформації, вібрації та похибки позиціювання.

Результати дисертаційної роботи Чалого О.В. впроваджені в навчальний процес кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, а саме: використовуються у курсах лекцій з дисципліни «Основи метрології, електричних вимірювань та приладів» напряму підготовки «Електротехнічні системи електроспоживання», «Технічна експлуатація електроенергетичних систем» напряму підготовки «Електротехнічні системи електроспоживання»; застосовуються в процесі дипломного та курсового проектування.

Голова комісії:

Члени комісії:

Alter Seh

Сергій ФІЛОНЕНКО

Дмитро КВАШУК

Дмитро СІРИЙ



Загальна класифікація координатно-вимірювальних машин

Рисунок Б1. – Класифікація координатно-вимірювальних машин

Додаток В1

Метрологічні характеристики координатно-вимірювальних машин

Таблиця В1.1

		Переміщення по	Похибка в об'ємі,	Похибка
Фірма	Марка КВМ	координатам,	МКМ	приведена, мкм
		MM X MM X MM		
Агроінт	БМ684	650×800×465	$\leq L/100+5L/1000$	$\Delta = 1,0+4,0$
Poli	SKY	500×400×350	≤6,0+10L/1000	$\Delta = 6,0+5,0$
Dea	Sciroccosp	1000×860×660	≤2,5+4L/1000	$\Delta = 2,5+4,0$
Dea	MISTRAL SP	1000×650×460	≤3,0+4L/1000	$\Delta = 3,0+4,0$
Dea	SCIROCCO	1000×800×660	≤3,5+4L/1000	$\Delta = 3,5+4,0$
Dea	MISTRAL	665×665×465	\leq 5,0+4L/1000	$\Delta = 5,0+2,66$
Opton	PMC 500	500×850×400	≤3,5+5L/1000	Δ=3,5+4,25
Агроінт	M563	600×500×340	≤4,0+5L/1000	Δ=4,0+3,0
Poli	GALAXY I	750×650×400	≤3,0+4L/1000	Δ=3,0+3,0
Poli	GALAXY II	1000×800×600	≤3,0+4L/1000	Δ=3,0+4,0
Opton	HMM965	900×600×500	≤4,0+5L/1000	Δ=4,0+4,5

Метрологічні характеристики координатно-вимірювальних машин

Таблиця В1.2

Метрологічні характеристики досліджуваної трикоординатної КВМ

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання X,Y,Z, мм, не більше	8500x3500x2500
Абсолютна похибка вимірювання лінійних розмірів, мкм	0,8 мкм + L/1000*
Похибка вимірювання кутових величин, сек	0,2
Максимальна швидкість переміщення головки вимірювання, не більше, м/с	0,25
Дискретність відліку координат: лінійних, мкм	0,2
кутових, сек	0,01
Похибка позиціювання по вісі Z, мкм	0,5

* L — вимірювальна довжина (мм).

Таблиця В1.3.

Нормальні умови експлуатації координатно-вимірювальних машин

Характеристики	Значення
Температура зовнішнього середовища	(20±5) °C
Положення приладу – горизонтальне з відхиленням від	±2
горизонтального	
Відносна вологість	(65±15)%
Напруга живлення	(220±22) B
Частота живлення	(50±1) Гц

Результати вимірювання відхилення від паралельності вимірювальних поверхонь при метрологічній атестації

Таблиця В2.1.

Значення коефіцієнта Стьюдента для обраної ймовірності та чисел вимірювань

Число	При довірчий ймовірності				
вимірювань	0,90	0,95	0,99		
5	2,13	2,77	4,60		
6	2,02	2,57	4,03		
7	1,94	2,45	3,71		
8	1,89	2,36	3,50		
9	1,86	2,31	3,36		
10	1,83	2,26	3,25		
11	1,81	2,23	3,17		
12	1,80	2,20	3,11		
13	1,78	2,18	3,06		
14	1,77	2,16	2,98		
15	1,76	2,14	2,95		

Таблиця В2.2.

Допустимі похибки мікрометра за ГОСТ 6507-90

	-	-
Верхня межа	Допустима похибка, мкм	Допустима непараллельність
вимірювань, мм		вимірювальних поверхонь,
		МКМ
5,10,25	±4	2
50	± 4	2,5
75,100	± 4	3
125,150	± 5	4
175,200	± 5	4
225,250,300	± 5	6

Таблиця В2.3.

Допустимі відхилення температури від 20°С, °С

Межі вимірювань, мм	До 150	Понад 150 до 500	Понад 500 до 600
При атестації КВМ	4	3	2
При перевірці установчих заходів	3	2	1

Додаток Г

Експериментальні результати

Таблиця Г1

Вибірка вимірювань діаметру при різних факторах – кутах повороту вимірювального шупа

Hoven								x	21
помер	о	вання в р		зицил (рі 100		200	260	xa	u _a
	«U»	«60»	«120»	«180»	«240»	«300»	«360»		
1	60,0135	60,0112	60,0111	60,0097	60,0107	60,0097	60,0112	60,0112	0,00140
2	60,0135	60,0112	60,0111	60,0097	60,0109	60,0097	60,0112	60,0113	0,00138
3	60,0136	60,0112	60,0113	60,0098	60,0108	60,0098	60,0112	60,0113	0,00140
4	60,0135	60,0112	60,0113	60,0098	60,0108	60,0098	60,0112	60,0113	0,00136
5	60,0135	60,0113	60,0114	60,0097	60,0109	60,0097	60,0113	60,0114	0,00137
6	60,0135	60,0113	60,0113	60,0098	60,0109	60,0098	60,0113	60,0114	0,00134
7	60,0136	60,0113	60,0113	60,0098	60,0109	60,0098	60,0113	60,0114	0,00138
8	60,0135	60,0113	60,0114	60,0098	60,0110	60,0098	60,0113	60,0114	0,00134
9	60,0135	60,0113	60,0114	60,0097	60,0108	60,0097	60,0113	60,0113	0,00138
10	60,0135	60,0113	60,0113	60,0098	60,0109	60,0098	60,0113	60,0114	0,00134
11	60,0135	60,0114	60,0114	60,0098	60,0110	60,0098	60,0114	60,0114	0,00133
12	60,0134	60,0114	60,0115	60,0098	60,0110	60,0098	60,0114	60,0114	0,00130
13	60,0135	60,0114	60,0115	60,0098	60,0110	60,0098	60,0114	60,0114	0,00134
14	60,0135	60,0114	60,0114	60,0098	60,0110	60,0098	60,0114	60,0114	0,00134
15	60,0135	60,0114	60,0113	60,0098	60,0111	60,0098	60,0114	60,0114	0,00133
16	60,0135	60,0114	60,0115	60,0099	60,0110	60,0099	60,0114	60,0115	0,00131
17	60,0135	60,0114	60,0115	60,0099	60,0111	60,0099	60,0114	60,0115	0,00130
18	60,0135	60,0114	60,0115	60,0099	60,0111	60,0099	60,0114	60,0115	0,00130
19	60,0136	60,0115	60,0115	60,0098	60,0111	60,0098	60,0115	60,0115	0,00137
20	60,0137	60,0114	60,0115	60,0099	60,0111	60,0099	60,0114	60,0114	0,00138
у	60,0135	60,0113	60,0114	60,0098	60,0110	60,0098	60,0113		
b	0,0021	-0,0001	0,0000	-0,0016	-0,0004	-0,0016	-0,0001		
U	0,00012	0,00018	0,00024	0,00012	0,00024	0,00012	0,00018		0,00590
\overline{U}	0,0028		L			•			L

Таблиця Г2

Вибірка вимірювань діаметру при різних факторах – кутах повороту

вимірювального щупа

Номер	Вимірюва	Вимірювання в різних позиціях (рівнях)							u_a
	«0»	«60»	«120»	«180»	«240»	«300»	«360»		
1	120,0137	120,0112	120,0115	120,0099	120,0107	120,0114	120,0138	120,0112	0,00140
2	120,0135	120,0112	120,0111	120,0098	120,0109	120,0114	120,0135	120,0113	0,00138
3	120,0136	120,0112	120,0113	120,0099	120,0108	120,0114	120,0135	120,0113	0,00140
4	120,0135	120,0112	120,0113	120,0098	120,0108	120,0114	120,0135	120,0113	0,00136
5	120,0135	120,0113	120,0114	120,0097	120,0109	120,0114	120,0135	120,0114	0,00137
6	120,0136	10,0113	120,0113	120,009	120,0109	120,0114	120,0136	120,0114	0,00134
7	120,0136	120,0113	120,0113	120,0098	120,0109	120,0114	120,0137	120,0114	0,00138
8	120,0135	120,0113	120,0114	120,0098	120,0110	120,0115	120,0135	120,0114	0,00134
9	120,0135	120,0113	120,0114	120,0097	120,0108	120,0114	120,0135	120,0113	0,00138
10	120,0135	120,0113	120,0113	10,0098	120,0109	120,0113	120,0135	120,0114	0,00134
11	120,0135	120,0114	120,0114	120,0098	120,0110	120,0113	120,0137	120,0114	0,00133
12	120,0137	120,0114	120,0115	120,0098	120,0110	120,0114	120,0136	120,0114	0,00130
13	120,0135	120,0114	120,0115	120,0098	120,0110	120,0116	120,0138	120,0114	0,00134

Продовження таблиці Г2

Номер	Вимірювання в різних позиціях (рівнях)								u _a
	«0»	«60»	«120»	«180»	«240»	«300»	«360»		
14	120,0135	120,0114	120,0114	120,0098	120,0110	120,0113	120,0135	120,0114	0,00134
15	120,0135	120,0114	120,0113	120,0098	120,0111	120,0114	120,0135	120,0114	0,00133
16	120,0135	120,0114	120,0115	120,0099	120,0110	120,0115	120,0135	120,0115	0,00131
17	120,0135	120,0114	10,0115	120,0099	120,0111	120,0115	120,0135	120,0115	0,00130
18	120,0135	120,0114	120,0115	120,0099	120,0111	120,0114	120,0136	120,0115	0,00130
19	120,0136	120,0115	120,0115	120,0098	120,0111	120,0113	120,0138	120,0115	0,00137
20	120,0137	120,0114	120,0115	120,0099	120,0111	120,0115	120,0137	120,0114	0,00138
У	120,0135	120,0113	120,0114	120,0098	120,0110	120,0114	120,0137		
b	0,0021	-0,0001	0,0000	-0,0016	-0,0004				
U	0,00006	0,00009	0,00012	0,00006	0,00009	0,0011	0,00007		0,0063
\overline{U}	0,0063								

Таблиця ГЗ

Експериментальні результати вимірювання радіусу півсфери

Вимірювальна	Координата	Координата	Координата	Радіальна
точка	Х	У	Z	дистанція
1	0,00154	-0,00566	17,49219	14,99204
2	6,70387	-0,00821	16,15692	14,99236
3	0,00455	6,69511	16,16072	14,99251
4	-6,69846	-0,00374	16,15924	14,99243
5	0,00596	-6,70615	16,15614	14,99251
6	11,43117	4,72465	12,36909	14,99237
7	4,73375	11,42388	12,37212	14,99221
8	-4,73015	11,42566	12,37196	14,99229
9	-11,42907	4,73257	12,36782	14,99224
10	-11,42715	-4,74161	12,36620	14,99229
11	-4,72610	-11,43490	12,36527	11,99250
12	4,73293	-11,43309	12,36426	14,99245
13	11,42905	-4,73703	12,36618	14,99227
14	11,43514	11,42128	6,69123	14,99215
15	-11,43024	11,42667	6,69062	14,99223
16	-11,42537	-11,43558	6,68438	14,99249
17	11,42750	-11,4336	6,68982	14,99254
18	16,16229	6,69052	0,00024	14,99221
19	6,70185	16,15752	-0,00234	14,99214
20	-6,69619	16,16008	-0,00574	14,99243
21	-16,16095	6,69370	-0,00892	11,99218
22	-16,15590	-6,70562	-0,00912	14,99209
23	-6,068965	-16,16316	-0,00509	14,99268
24	6,69574	-16,1603	-0,00373	14,99249
25	16,15706	-6,70349	0,00010	14,99234

Таблиця Г4

Результати генерування реалізацій випадкової величини в полярній системі координат з гауссівським законом розподілу

N⁰	φ_i	N⁰	φ_i	N⁰	φ_i	N⁰	φ_i	N⁰	φ_i
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3.4696	21	5.9295	41	3.1598	61	2.0819	81	2.9086
2	1.9766	22	1.6034	42	2.2346	62	0.3085	82	2.0651
3	0.6104	23	1.5623	43	1.2327	63	2.8270	83	2.3815
4	0.1437	24	0.7495	44	0.5723	64	1.1211	84	2.0802
5	1.2718	25	0.7369	45	1.9731	65	1.3443	85	2.0246
6	2.1725	26	0.9106	46	1.6277	66	2.3228	86	1.4168
7	2.3693	27	2.5676	47	2.6744	67	1.7719	87	1.9867
8	1.0780	28	3.4477	48	3.5766	68	0.2342	88	1.9164
9	1.5416	29	3.2433	49	2.0942	69	0.7855	89	3.5771
10	3.0048	30	6.0785	50	3.4766	70	2.3876	90	2.6703
11	5.8776	31	2.3857	51	0.3448	71	1.5325	91	2.0576
12	2.2714	32	2.7073	52	2.9323	72	5.5778	92	3.5380
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	2.3607	33	1.1987	53	1.5276	73	0.9192	93	2.2925
14	1.2744	34	6.0318	53	0.6217	74	1.9777	94	2.6546
15	1.1501	35	1.0464	55	0.8426	75	1.7993	95	1.3688
16	2.2632	36	1.0460	56	2.4173	76	1.5668	96	0.8209
17	2.4925	37	2.8130	57	1.4158	77	1.4307	97	2.4914
18	0.4850	38	6.2273	58	1.7216	78	0.7659	98	0.8912
19	1.5876	39	2.3422	59	1.3449	79	2.7634	99	0.6091
20	1.7842	40	2.6624	60	1.3576	80	0.9542	100	0.8216

Таблиця Г5

Експериментальн	і значення	D=9	900,002 мм
-----------------	------------	-----	------------

№ експери- мента	Температура, °С	Значення діаметру, мм	Похибка, мкм
1	20	900,002	2
2	20	900,003	9
5	20	899,996	16
7	20	899,999	13
11	20	900,003	9
1	26	899,982	32
2	26	899,980	32
7	26	899,986	28
11	26	899,998	16

174

Встановлення та налаштування програмного забезпечення PC-DMIS CAD

Д1 Загальні відомості про програму

PC-DMIS CAD — це програмне забезпечення для управління координатновимірювальними машинами (КВМ), яке забезпечує можливість програмування, моделювання, візуалізації та аналізу вимірювань. Програма підтримує імпорт CAD-моделей, побудову вимірювальних траєкторій, обробку результатів та оцінювання похибок вимірювання.

Д2 Системні вимоги

Перед встановленням необхідно переконатися, що комп'ютер відповідає таким мінімальним системним вимогам:

— Операційна система: Windows 10 64-bit або новіша;

— Процесор: Intel і5 або аналогічний AMD;

— Оперативна пам'ять: не менше 8 ГБ;

— Відеокарта: підтримка OpenGL 3.0 або вище;

— Вільне місце на диску: не менше 20 ГБ;

— Права адміністратора для встановлення програмного забезпечення.

Д.3. Встановлення програми

— Завантажити дистрибутив PC-DMIS CAD із офіційного сайту виробника (Hexagon Manufacturing Intelligence) або використати офіційний інсталяційний носій.

— Запустити файл встановлення setup.exe з правами адміністратора.

— У вікні майстра встановлення обрати мову інтерфейсу та прийняти умови ліцензійної угоди.

Вибрати тип встановлення:

— Typical — стандартне встановлення з типовими параметрами;

— Custom — встановлення з можливістю обрати окремі модулі (рекомендується для досвідчених користувачів).

— Вказати шлях до директорії встановлення (рекомендовано залишити стандартний).

— Дочекатися завершення копіювання файлів та встановлення драйверів.

— Після завершення встановлення перезавантажити комп'ютер.

Д.4. Активація та ліцензування

— Запустити PC-DMIS CAD з робочого столу або меню «Пуск».

— При першому запуску ввести ліцензійний ключ або використати мережеву ліцензію.

— У разі необхідності активувати ліцензію через інтернет або за допомогою файлу активації.

— Перевірити наявність активованих модулів (САД-модуль, модуль для конкретного типу КВМ тощо).

Д.5. Початкове налаштування середовища

— У головному меню обрати Edit \rightarrow Preferences \rightarrow Setup.

— Встановити одиниці вимірювання (мм або дюйми), систему координат, формат збереження файлів.

— Додати конфігурацію конкретної КВМ:

— Вказати тип машини (модель, виробник);

— Задати параметри кінематичної моделі;

— Підключити контролер КВМ або запустити в режимі офлайн (симуляція).

— Перевірити правильність роботи пробника:

— Вказати тип датчика (контактний, сканувальний тощо);

— Виконати калібрування пробника згідно з інструкцією.

Д.6. Імпорт САD-моделі

— У меню File \rightarrow Import \rightarrow CAD... вибрати потрібний формат (наприклад, STEP, IGES).

— Завантажити модель деталі у вікно проекту.

— Перевірити коректність геометрії, створити базові координатні системи (Alignment).

Д.7. Збереження налаштувань

Після завершення налаштування рекомендовано зберегти конфігурацію середовища як шаблон для подальшого використання. Це дозволить автоматизувати процес створення нових програм для вимірювання.

А.8. Ілюстрації інтерфейсу програми PC-DMIS CAD









Д.9. Налаштування програми при роботі з різними типами датчиків PC-DMIS CAD підтримує конфігурацію широкого спектра датчиків, зокрема контактних, сканувальних, оптичних та лазерних. У цьому розділі наведено скріншоти та опис налаштувань при роботі з найбільш поширеними типами сенсорів.

Оптичний датчик (візуальний)

Конфігурація оптичного датчика Vision Probe.

Зображено:

— Встановлення фокусної відстані об'єктива;

— Увімкнення підсвітки (коаксіальна, кільцева);

— Контрастне налаштування для розпізнавання контурів;

— Калібрування масштабного коефіцієнта.

Примітка: оптичні датчики особливо ефективні при вимірюванні мікроструктур, або елементів, що не допускають контактного зондування.



Контактний датчик (тактильний)

- Налаштування контактного (тактильного) датчика у вікні конфігурації РС-
- DMIS. На скріншоті зображено:

— Вибір типу зонда (ТР200, ТР20, тощо);

- Геометричні параметри щупа: довжина, діаметр, кут нахилу;
- Позиції конфігурації щупа у револьверній головці;
- Опції автоматичного калібрування.

Примітка: контактні датчики потребують періодичного калібрування для забезпечення точності вимірювань. У програмі доступна функція "Probe Calibration Routine".





