

Філоненко С.Ф., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-9250-1640,
e-mail: serhii.filonenko@npp.nau.edu.ua,

Ларін В.Ю., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-5042-2426,
e-mail: vjlarin@gmail.com,

Квашук Д.М., к.е.н.,
orcid.org/0000-0002-4591-8881,
e-mail: dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ НА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ

Національний авіаційний університет

Вступ

У сучасному авіаційному виробництві високі вимоги до точності та якості обробки деталей визначають необхідність використання передових методів контролю і вимірювання. Авіаційні деталі, особливо такі, що належать до критичних елементів конструкцій, вимагають підвищеної точності для забезпечення безпеки та надійності під час експлуатації. Одним із найбільш ефективних засобів для проведення таких вимірювань є координатно-вимірвальні машини (КВМ), що дозволяють проводити тривимірне сканування та контроль геометричних параметрів деталей з високою точністю [1].

Однак, на точність вимірювання на КВМ можуть впливати численні фактори, включно з геометричними та температурними похибками, які можуть виникати як у самій машині, так і внаслідок зовнішніх впливів. Для мінімізації цих похибок і підвищення надійності вимірювань необхідні системні підходи до калібрування, контролю та компенсації похибок [2]. Таким чином, дослідження методів підвищення точності вимірювань авіаційних деталей на КВМ є актуальною задачею сучасної метрології, що має важливе практичне значення для авіаційної галузі. У даній статті розглядаються методи покращення точності вимірювання авіаційних деталей на КВМ, включаючи математичне моделювання, алгоритмічну корекцію похибок та оптимізацію вимірвального процесу.

Результати досліджень можуть бути корисними для забезпечення високих стандартів точності у виробництві авіаційних деталей, підвищення якості та зниження ризиків при виготовленні конструктивно важливих елементів.

Мета

Метою даного дослідження є розробка та впровадження методів підвищення точності вимірювань авіаційних деталей на КВМ шляхом аналізу факторів, що впливають на похибки вимірювань, та розробки алгоритмів їх автоматичної корекції. Це передбачає створення математичної моделі для оцінки впливу геометричних, кінематичних і теплових похибок, а також методів компенсації цих похибок для забезпечення більш точного і надійного контролю якості авіаційних деталей.

Основна частина

Авіаційне виробництво висуває надзвичайно жорсткі вимоги до точності виготовлення та контролю критичних компонентів літальних апаратів [3]. Одним із ключових інструментів забезпечення якості та безпеки у виробництві КВМ, які дозволяють вимірювати геометричні параметри з високою точністю [4]. Однак вимірювання на КВМ піддаються впливу низки факторів, зокрема геометричних, кінематичних і теплових похибок, що значно знижує точність контролю та потребує ефективних методів компенсації для забезпечення стабільних результатів [5]. Підвищення точності вимірювань у сфері

авіабудування має важливе значення для безпеки, довговічності та економічної ефективності виробництва.

Аналіз сучасної наукової літератури показує значний інтерес до проблеми підвищення точності вимірювань на КВМ. У сфері підвищення точності вимірювань на КВМ можна виділити наступні ключові дослідження:

- Геометричні похибки та калібрування: у роботі [6] запропоновано метод калібрування КВМ з використанням лазерного трекера. Метод дозволяє знизити геометричні похибки на 40%, але потребує тривалого часу на калібрування та дорогого обладнання.

- Автори [7] розробили методіку оцінки 21 геометричної похибки портальної КВМ. Проте їх метод не враховує динамічні зміни цих похибок під час вимірювання.

- Температурні впливи: дослідження [8] представляє модель термоденформацій КВМ. Однак модель враховує лише лінійні температурні розширення, ігноруючи нелінійні ефекти. В дослідженні [9] запропоновано систему термокомпенсації з використанням множинних

$$\begin{aligned} \delta_x(x, y, z) &= \int [0 \rightarrow L] [\varepsilon_{xx}(x) + \theta_z(x)y - \theta_y(x)z + \sum(a_{xi} * P_i(x, y, z))] dx \\ \delta_y(x, y, z) &= \int [0 \rightarrow L] [\varepsilon_{yy}(y) - \theta_z(y)x + \theta_x(y)z + \sum(a_{yi} * P_i(x, y, z))] dy, \\ \delta_z(x, y, z) &= \int [0 \rightarrow L] [\varepsilon_{zz}(z) + \theta_y(z)x - \theta_x(z)y + \sum(a_{zi} * P_i(x, y, z))] dz \end{aligned} \quad (2)$$

де, ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} – похибки позиціонування, θ_x , θ_y , θ_z – кутові похибки, $P_i(x, y, z)$ – поліноміальні функції, a_{xi} , a_{yi} , a_{zi} – коефіцієнти поліномів.

1. Похибки прямолінійності можна визначити за (3):

$$S_{ij}(q) = \int [0 \rightarrow q] s_{ij}(t) dt, \quad (3)$$

де, s_{ij} – локальна похибка прямолінійності, q – координата вздовж відповідної осі.

Кутові похибки визначаються (4):

$$\Theta_i(q) = \int [0 \rightarrow q] \theta_i(t) dt, \quad (4)$$

де, θ_i – локальний кут відхилення, q – координата вздовж відповідної осі.

датчиків температури. Система ефективна для стаціонарних температурних полів, але не враховує динамічні температурні зміни.

На основі проведеного аналізу можна сформулювати основну науково-технічну проблему: існуючі методи та засоби не забезпечують необхідної точності вимірювання авіаційних деталей на КВМ через відсутність комплексного врахування всіх факторів впливу на вимірювання.

1. Аналіз факторів впливу на похибки вимірювань КВМ та алгоритми їх корекції.

Геометричні похибки. оцінка геометричних похибок може бути представлена як (1):

$$\Delta G = \frac{\iiint [V] \sqrt{(\delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2)} dx dy dz}{V}, \quad (1)$$

де, ΔG – інтегральна оцінка геометричних похибок, V – об'єм робочого простору КВМ, δx , δy , δz – локальні похибки по відповідних осях.

Розширена формула з урахуванням всіх складових геометричних похибок має вигляд (2):

Інтегральна оцінка перпендикулярності (5):

$$\Delta P = \frac{\iint [A] |\alpha_{xy}(x, y)| dx dy}{A}, \quad (5)$$

де, α_{xy} – локальне відхилення від перпендикулярності, A – площа робочої зони в площині XY.

4. Повна інтегральна оцінка (6):

$$\Delta G_{total} = \frac{\iiint [V] \sqrt{\left[\begin{aligned} &(\delta x^2 + S_{xy}^2 + S_{xz}^2) + \\ &(\delta y^2 + S_{yx}^2 + S_{yz}^2) + \\ &(\delta z^2 + S_{zx}^2 + S_{zy}^2) \end{aligned} \right]} dx dy dz}{V}, \quad (6)$$

де, S_{ij} – інтегральні оцінки похибок прямо- лінійності, δ_i – інтегральні оцінки похибок позиціонування.

Вагова функція для різних зон робо- чого простору (7):

$$\Delta G_{weighted} = \frac{\iiint [V] W(x, y, z) \sqrt{(\delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2)} dx dy dz}{\iiint [V] W(x, y, z) dx dy dz}, \quad (7)$$

де, $W(x, y, z)$ – вагова функція, що враховує важливість різних зон робочого простору.

Статистична оцінка (8):

$$\sigma G = \sqrt{\frac{1}{V \iiint [V] (\Delta G(x, y, z) - \Delta G_{mean})^2 dx dy dz}}, \quad (8)$$

де, σG – середньоквадратичне відхилення геометричних похибок, ΔG_{mean} – середнє значення похибки в робочому просторі.

Критерій оптимізації (9):

$$F_{opt} = \min \left\{ \iiint [V] \left[W_1(x, y, z) \Delta G + W_2(x, y, z) \sigma G \right] dx dy dz \right\}, \quad (9)$$

де, W_1, W_2 – вагові коефіцієнти для серед- ньої похибки та її розкиду.

Обмеження робочого простору (10):

$$\begin{aligned} 0 &\leq x \leq Lx \\ 0 &\leq y \leq Ly \\ 0 &\leq z \leq Lz \end{aligned} \quad (10)$$

$$\delta_x(x, y, z) = ax_0 + ax_1x + ax_2y + ax_3z + ax_4xy + ax_5xz + ax_6yz$$

$$\delta_y(x, y, z) = ay_0 + ay_1x + ay_2y + ay_3z + ay_4xy + ay_5xz + ay_6yz, \quad (14)$$

$$\delta_z(x, y, z) = az_0 + az_1x + az_2y + az_3z + az_4xy + az_5xz + az_6yz$$

де, $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ – похибки по відповідних осях, $ax_0 \dots ax_6, ay_0 \dots ay_6, az_0 \dots az_6$ – коефіцієн- ти поліному, x, y, z – координати точки вимірювання.

Матриця корекції геометричних по- хибок (15):

$$\begin{aligned} X_c &= X + \delta_x(x, y, z) \\ Y_c &= Y + \delta_y(x, y, z) \\ Z_c &= Z + \delta_z(x, y, z) \end{aligned}, \quad (15)$$

де (X_c, Y_c, Z_c) – скореговані координати.

Модель кінематичних похибок.

Максимально допустимі похибки (11):

$$\begin{aligned} |\delta x| &\leq \delta x_{max} \\ |\delta y| &\leq \delta y_{max} \\ |\delta z| &\leq \delta z_{max} \end{aligned} \quad (11)$$

Умови неперервності (12):

$$\partial \delta_i / \partial j = \partial \delta_j / \partial i, \quad (12)$$

де $i, j = x, y, z$.

Ці вирази дозволяють комплексно оцінювати геометричні похибки в усьому робочому просторі КВМ, враховувати вза- ємовплив різних видів похибок, оптимізу- вати параметри корекції, визначати крити- чні зони робочого простору.

2. Математична модель оцінки та компенсації похибок КВМ

Сумарний вектор похибки вимірю- вання можна представити як (13):

$$\Delta P = \Delta G + \Delta K + \Delta T + \Delta R, \quad (13)$$

де, ΔP – сумарний вектор похибки, ΔG – вектор геометричних похибок, ΔK – вектор кінематичних похибок, ΔT – вектор темпе- ратурних похибок, ΔR – вектор випадко- вих похибок.

Модель геометричних похибок вира- жена, як матриця геометричних похибок, для кожної осі (X, Y, Z) , для якої існує 6 компонентів похибок (14):

Динамічна складова (16):

$$\Delta K = K_v * V + K_a * A, \quad (16)$$

де, K_v – коефіцієнт швидкісної похибки, V – вектор швидкості, K_a – коефіцієнт прискорення, A – вектор прискорення.

3.2 Компенсація динамічних похи- бок(17):

$$V_{opt} = \sqrt{(K_v / K_a)} * \sqrt{(\Delta_{max})}, \quad (17)$$

де, V_{opt} – оптимальна швидкість вимірювання, Δ_{max} – максимально допустима похибка.

Модель температурних похибок:

- Лінійне розширення (18):

$$\Delta L = L_o * \alpha * \Delta T, \quad (18)$$

де, ΔL – зміна розміру, L_o – початковий розмір, α – коефіцієнт теплового розширення, ΔT – зміна температури.

Градієнтна модель (19):

$$\delta T(x, y, z) = \sum(T_i * W_i), \quad (19)$$

де, T_i – температура в i -тій точці, W_i – ваговий коефіцієнт впливу.

- Термокомпенсація (20):

$$L_c = L + \Delta L + \delta T(x, y, z), \quad (20)$$

де, L_c – скомпенсований розмір.

Комплексна модель компенсації:

Загальне рівняння корекції (21):

$$P_{corr} = P_{meas} + \Delta G + \Delta K + \Delta T, \quad (21)$$

де, P_{corr} – скореговані координати, P_{meas} – виміряні координати.

Оцінка невизначеності (22):

$$U = \sqrt{(U_G^2 + U_K^2 + U_T^2 + U_R^2)}, \quad (22)$$

де, U – сумарна невизначеність, U_G – невизначеність геометричних похибок, U_K – невизначеність кінематичних похибок, U_T – невизначеність температурних похибок, U_R – невизначеність випадкових похибок.

Критерії оптимізації. Цільова функція оптимізації (23):

$$F = \min(w_1 U + w_2 T + w_3 C), \quad (23)$$

де, U – невизначеність вимірювання, T – час вимірювання, C – вартість операції, w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти.

3. Алгоритм практичної реалізації.

Компенсація геометричних похибок КВМ виконується в такій послідовності:

1. Збір даних. Визначити робочий простір КВМ:

- Розміри робочої зони: L_x, L_y, L_z ;
- просторова роздільна здатність:

N_x, N_y, N_z .

Отримати дані про геометричні параметри КВМ;

- похибки прямолінійності направляючих $S_{ij}(q)$;
- кутові похибки $\theta_i(q)$;
- похибки перпендикулярності $\alpha_{xy}(x, y)$.

Визначити коефіцієнти поліноміальних функцій $\delta_x, \delta_y, \delta_z$:

- коефіцієнти $a_{x0}...a_{x6}, a_{y0}...a_{y6}, a_{z0}...a_{z6}$.

2. Розрахунок інтегральних похибок:

- ініціалізувати змінні:

$\Delta G = 0$ – інтегральна оцінка геометричних похибок,

$\sigma G = 0$ – середньоквадратичне відхилення.

Обчислити інтегральні похибки по осях:

для $x = 0:L_x, y = 0:L_y, z = 0:L_z$:

$$\delta_x = \int [0 \rightarrow L_x] [\varepsilon_{xx} + \theta_{zy} - \theta_{yz} + \sum(a_{xi} P_i)] dx,$$

$$\delta_y = \int [0 \rightarrow L_y] [\varepsilon_{yy} - \theta_{zx} + \theta_{xz} + \sum(a_{yi} P_i)] dy,$$

$$\delta_z = \int [0 \rightarrow L_z] [\varepsilon_{zz} + \theta_{yx} - \theta_{xy} + \sum(a_{zi} P_i)] dz,$$

$$\Delta G_i = \sqrt{(\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2)},$$

$$\Delta G += \Delta G_i,$$

$$\sigma G += (\Delta G_i - \Delta G / V)^2,$$

$$\Delta G = \Delta G / V,$$

$$\sigma G = \sqrt{(\sigma G / V)}.$$

3. Компенсація похибок:

- Застосувати поправки на похибки прямолінійності:

$$x_{corr} = x + S_{xy}(x) + S_{xz}(x),$$

$$y_{corr} = y + S_{yx}(y) + S_{yz}(y),$$

$$z_{corr} = z + S_{zx}(z) + S_{zy}(z).$$

- Компенсувати похибки позиціонування:

$$x_{final} = x_{corr} - \delta_x(x_{corr}, y_{corr}, z_{corr}),$$

$$y_{final} = y_{corr} - \delta_y(x_{corr}, y_{corr}, z_{corr}),$$

$$z_{final} = z_{corr} - \delta_z(x_{corr}, y_{corr}, z_{corr}).$$

- Обчислити залишкову похибку:

$$\Delta_x = x_{final} - x,$$

$$\Delta_y = y_{final} - y,$$

$$\Delta_z = z_{final} - z,$$

$$\Delta G_{corr} = \sqrt{(\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2)}.$$

4. Оптимізація:

• визначити цільову функцію для оптимізації:

$$F_{opt} = \min\{\iiint[V] [W1\Delta G + W2\sigma G] dx dy dz\};$$

• застосувати методи оптимізації для знаходження оптимальних параметрів, наприклад:

- коефіцієнти поліномів a_{xi} , a_{yi} , a_{zi} ,
- вагові коефіцієнти W_1 , W_2 ,
- просторову роздільну здатність N_x , N_y , N_z .

• Перевірити виконання обмежень:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z \\ |\delta x| \leq \delta x_{max}, |\delta y| \leq \delta y_{max}, |\delta z| \leq \delta z_{max} \\ \partial \delta_i / \partial j = \partial \delta_j / \partial i. \end{aligned}$$

5. Застосування корекції. Використовувати скореговані координати (x_{final} , y_{final} , z_{final}) для вимірювань.

6. Верифікація та налаштування:

- провести верифікацію алгоритму на контрольних зразках
- аналізувати статистику залишкових похибок ΔG_{corr} ;
- налаштувати параметри (коефіцієнти, вагові функції, роздільну здатність) для оптимізації результатів.

Основні переваги запропонованого алгоритму – комплексний підхід до оцінки всіх видів геометричних похибок, використання інтегральних оцінок для урахування розподілу похибок у робочому просторі, можливість оптимізації параметрів корекції для мінімізації похибок, забезпечення простежуваності результатів вимірювань.

Висновок

У дослідженні розроблено метод підвищення точності вимірювань авіаційних деталей на КВМ, що враховує геометричні, кінематичні та температурні похибки. Запропонована математична модель дозволяє комплексно оцінювати ці похибки та реалізувати алгоритм автоматичної корекції координат, що зменшує вплив

похибок на результати вимірювань. Використання даного підходу підвищує надійність і точність контролю геометричних параметрів, що є критично важливим для авіаційної промисловості.

Література

1. Kim J.H., Lee K.S. Optimization of measurement trajectories for complex aerospace components inspection. *CIRP Annals*. 2023. Vol. 72, no. 1. P. 475–478.
2. Zhang R. Advanced filtering methods for coordinate measurements data processing. *Metrology and Measurement Systems*. 2022. Vol. 29, no. 2. P. 325–340.
3. Brown M., Johnson P. Temperature gradient effects on CMM accuracy: experimental investigation. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2022. Vol. 13, no. 2. P. 15–28.
4. Wilson D.R., Thompson R.C. Real-time error compensation in coordinate metrology. *Measurement*. 2023. Vol. 205. P. 112–125.
5. Smith A.B., Lee C.D. Adaptive measurement strategies for aerospace components inspection. *Journal of Aerospace Engineering*. 2022. Vol. 35, no. 3. P. 278–291.
6. Wang H., Li Y., Zhang C. Advanced calibration method for coordinate measuring machines using laser tracker technology. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2022. Vol. 178. P. 103–118.
7. Hermann K., Schmidt M. Comprehensive analysis of geometric errors in portal coordinate measuring machines. *Precision Engineering*. 2023. Vol. 82. P. 245–259.
8. Chen X., Liu W., Yang J. Thermal deformation modeling of coordinate measuring machines under varying environmental conditions. *Measurement Science and Technology*. 2023. Vol. 34, no. 3. 035001.
9. Roberts S.A. Multi-sensor temperature compensation system for high-precision dimensional measurements. *Journal of Manufacturing Science*. 2022. Vol. 45, no. 4. P. 412–427.

Філоненко С.Ф., Ларін В.Ю., Квашук Д.М.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ НА КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ

Стаття присвячена розробці методів підвищення точності вимірювань авіаційних деталей на координатно-вимірювальних машинах, що є критично важливим для забезпечення якості та безпеки у авіаційному виробництві. Запропоновано математичну модель, яка враховує основні види похибок: геометричні, кінематичні та температурні. Також розроблено алгоритм автоматичної корекції, що дозволяє мінімізувати вплив цих похибок на результати вимірювань. Застосування даного підходу сприяє підвищенню точності та надійності контролю геометричних параметрів, що є важливим для виготовлення конструктивно складних та критичних авіаційних компонентів.

Ключові слова: координатно-вимірювальна машина; точність вимірювань; похибки; авіаційні деталі; математична модель; автоматична корекція; геометричні похибки; кінематичні похибки; температурні впливи; авіаційне виробництво; метрологія.

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

IMPROVING MEASUREMENT ACCURACY OF AVIATION PARTS ON A COORDINATE MEASURING MACHINE

This article is devoted to the development of methods for enhancing the accuracy of aviation parts measurements on coordinate measuring machines, which is critically important for ensuring quality and safety in aviation manufacturing. A mathematical model is proposed that accounts for the main types of errors: geometric, kinematic, and thermal. An automatic correction algorithm is also developed, allowing for the minimization of these errors' impact on measurement results. The application of this approach contributes to the improvement of accuracy and reliability in controlling geometric parameters, which is essential for the production of structurally complex and critical aviation components.

Keywords: coordinate measuring machine; measurement accuracy; errors; aviation parts; mathematical model; automatic correction; geometric errors; kinematic errors; thermal effects; aviation manufacturing; metrology.