

УДК 531.7

**Чалий О. В.**

аспірант,

старший викладач кафедри КЕСТ

Заклад вищої освіти «Національний авіаційний університет»

Київ, Україна

E-mail: 7769225@stud.nau.edu.ua

ORCID: 0009-0003-5429-8869

## ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОВЕРХОНЬ НА КООРДИНАТНО ВИМІРЮВАЛЬНІЙ МАШИНІ

### Анотація

Розглянуто фізично виміряні об'єкти та їхні наукові моделі, які характеризуються складними просторовими структурами. Передумовою стратегії є використання рівняння Лагранжа, для продуктивної оцінки складних деталей були проведені дослідження, з контрольованим обходом з урахуванням характеристик об'єктів зі складними просторовими поверхнями. Результат – мінімальна кількість точок, необхідна для якісної оцінки площі аналізу поверхні об'єкта. Це важливий крок у розробці точних і успішних стратегій оцінки просторових поверхневих станів зі складними та взаємопов'язаними властивостями. Ця структура не тільки дає змогу вивчати об'єкти фізичного вимірювання, але й покращує раціональне розміщення для вдосконалення КВМ у вимірюванні об'єктів зі складною просторовою формою. Це суттєво сприяє підвищенню точності та надійності оцінок у сучасних інноваційних формах і логічних дослідженнях, враховуючи такі важливі аспекти оцінки, як диференціація об'єктів і положення в просторі. Зокрема, об'єкти, що підлягають вимірюванню, можуть мати загальні або зустрічні поверхні, що ускладнює забезпечення точних геометричних параметрів. Це дослідження представляє сучасні концепції та стратегії для підвищення продуктивності вимірювання складних просторових поверхонь. Хоча ця стратегія забезпечує високу точність і також оптимізує час і ресурси, необхідні для завершення оцінки. Під стратегією розуміється стратегія вимірювання, яка дозволяє виміряти параметри з достатньою точністю та за короткий час. Найбільш оптимально вимірювати деталі методом сканування [2]. Вимірюючи деталі за допомогою цієї технології може скоротити час перевірки та підвищити точність вимірювань. Також розглянуто проблему визначення критеріїв для мінімізації помилок вимірювання та оцінки надійності результатів, що забезпечує не тільки високу точність, але й достовірність отриманих даних, що дуже важливо в процесах вимірювання, де результати можуть впливати на подальші технічні або наукові рішення. Загалом, підхід суттєво сприяє розвитку сучасних методів координатного вимірювання та їх застосуванню за високих вимог до точності та складних просторових умов.

**Ключові слова:** координатно вимірювальна машина, сканування, контрольні точки.

**Вступ.** Розвиток виробництва в галузі машинобудування, авіації, ракетно-космічної промисловості, енергетики, суднобудування та автомобілебудування висуває підвищені вимоги до забезпечення безпеки та надійності роботи обладнання. Оскільки існує залежність між характеристиками ефективності деталі та її формою, прогнозування та контроль показників ефективності деталей і машин вимагає вимірювання характеристик (параметрів) їх форми. Багато сучасних машин і механізмів різних галузей промисловості містять великогабаритні деталі. Сучасні вимоги до точності виготовлення таких деталей породили необхідність зменшення допусків на високоточні деталі великих розмірів.

У сучасному індустріальному та науковому середовищі вимірювання складних просторових поверхонь стає важливим завданням з високим ступенем відповідальності за точність та надійність результатів. Зростання складності геометричних форм об'єктів, їх взаємодія та технологічні вимоги вимагають розвитку нових методів інструментального контролю. Найважливішу роль у забезпеченні якості та конкурентоспроможності авіапромислової продукції відіграє контроль-вимірювальна техніка, в якій особливе місце займають засоби вимірювання та контролю геометричних параметрів деталей, вузлів машин і механізмів Координатно-вимірювальні машини (КВМ) забезпечують визначення координат всіх точок поверхонь деталей в просторі вимірювання та дозволяють визначити метрологічні параметри відхилення від форми та розташування поверхонь деталей особливо складної конфігурації за допомогою системи керування КВМ. КВМ використовується для вимірювання розмірів і форми виробів з високою точністю [7]. Від суміщення параметрів математичної моделі і об'єкту вимірювання на пряму залежить точність вимірювання. Робота присвячена вивченню та вдосконаленню методології вимірювання складних просторових поверхонь з використанням координатно-вимірювальних машин. Досліджуючи фізичні об'єкти вимірювання, які характеризуються складністю геометричних форм, було розроблено підхід, заснований на математичних моделях та алгоритмах, що спрямовані на оптимізацію точності та швидкості вимірювань.

**Метою роботи.** Розробка методики для вимірювання складних просторових поверхонь за допомогою КВМ. Важливі аспекти включають визначення ідеального наукового підходу для аналізу складної форми вимірюваних процесів, створення обчислень, які поєднують точність оцінки та навички, а також мінімізацію помилок

оцінки. Сюди входять такі подальші розробки, як: точки дослідження для досягнення конкретних цілей, зокрема: подальший розвиток числових моделей, визначення числового підходу для точного представлення контексту оцінки шляхом розміщення вимірювальних точок, розробка розрахунків для успішної оцінки об'єктів складної форми з урахуванням відхилень просторової поверхні. Попередньо визначені варіанти та критерії мінімізації помилок для забезпечення високої точності досягнутих результатів. При вимірюваннях положення осей об'єкту оцінка точності базування повинна формуватися як на основі вимірювання баз, так і з урахуванням необхідної та достатньої кількості точок контрольованої поверхні. Поряд з рішенням задачі базування поверхонь повинна бути також вирішена проблема базування контрольних обходів (перетинів і характерних ліній на поверхні) при різних використовуваних способах подання інформації.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Необхідність розв'язання задач управління КВМ в реальному часі висуває певні вимоги як до самих алгоритмів управління та програмно-математичного забезпечення системи, так і до технічних засобів, що їх реалізують [2]. При вимірюванні положення осі об'єкта (фізичної моделі та її елементів) після його розміщення на поворотній платформі зазвичай не збігається з віссю КВМ. Ця різниця визначає основну похибку. Фундаментальні похибки повинні бути усунені до того, як результати вимірювань будуть об'єднані з вихідною математичною моделлю об'єкта. Тому оцінка базової точності повинна ґрунтуватися як на базових вимірюваннях, так і на вимірюваннях, які враховують кількість необхідних і достатніх точок контрольної поверхні. На додаток до вирішення проблем на основі регіону, проблеми на основі позиції шляхів керування (перетину на області та характеристичних кривих) також необхідно розв'язувати для різних методів подання інформації, що використовуються [3]. Розміщення об'єктів необхідно оцінювати на основі математичної моделі, яка описує фактичну форму отриманої поверхні. математичної та вимірюваної фізичної моделі. Початок власних систем координат моделі  $O$  та  $O^1$  зміщується до вектора  $P$ . Крім того, повернуто систему  $(XYZO)^1$  на кути,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  відносно осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  системи  $(XYZO)$ . На математичній моделі встановлюються контрольні точки. Вимірюються відповідні точки на фізичній моделі. Кількість точок  $N$  і їх розташування залежать від конкретної геометрії моделі і визначаються точністю вимірювань. Необхідно знайти перетворення  $R$ , яке перетворює систему  $(XYZO)^1$  в систему  $(XYZO)$  так, щоб сума квадратів відстаней від перетворених вимірюваних точок  $c^1 = R(b)$  до відповідних їм точок математичної моделі була мінімальною [1]:

$$\sum_{i=1}^N [(a_x^i - c_x^i)^2 + (a_y^i - c_y^i)^2 + (a_z^i - c_z^i)^2] \Rightarrow \min. \quad (1)$$

Для вимірюваної точки  $b_i$  в координатній формі перетворення має вигляд:

$$C = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x + b_x - b_y\gamma + b_z\beta \\ P_y + b_x\gamma + b_y + b_z\alpha \\ P_z - b_x\beta + b_y\alpha + b_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Для суми квадратів відстаней підставивши значення  $c_x$ ,  $c_y$  і  $c_z$  у виразі (1), отримаємо вигляд для функції Лагранжа:

$$J = \sum_{i=1}^N (a_x^i - b_x^i - P_x + b_y\gamma - a_z^i\beta)^2 + \sum_{i=1}^N (a_y^i - b_y^i - P_y + b_z^i\alpha - b_z^i\gamma)^2 + \sum_{i=1}^N (a_z^i - b_z^i - P_z + b_y^i\alpha + b_x^i\beta)^2. \quad (3)$$

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

$$[D] \times [P_x \ P_y \ P_z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T = [H], \quad (4)$$

де  $[D]$  – матриця розміром  $6 \times 6$ ,  $[H]$  – стовпець вільних членів,  $T$  транспонування:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{61} & \dots & d_{66} \end{bmatrix}; \quad [H] = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_6 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned} d_{11} &= -N; d_{12} = 0; d_{13} = 0; d_{14} = 0; d_{15} = -S_z; d_{16} = S_y; \\ d_{21} &= 0; d_{22} = -N; d_{23} = 0; d_{24} = S_z; d_{25} = 0; d_{26} = -S_x; \\ d_{31} &= 0; d_{32} = 0; d_{33} = -N; d_{34} = -S_y; d_{35} = S_x; d_{36} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_{41} &= 0; d_{42} = -S_z; d_{43} = S_y; d_{44} = S_y^2 + S_z^2; d_{45} = -S_{xy}; d_{46} = -S_{xz}; \\
 d_{51} &= S_z; d_{52} = 0; d_{53} = -S_x; d_{54} = -S_{xy}; d_{55} = S_x^2 + S_z^2; d_{56} = -S_{yz}; \\
 d_{61} &= -S_y; d_{62} = S_x; d_{63} = 0; d_{64} = -S_{xz}; d_{65} = -S_{yz}; d_{66} = S_x^2 + S_y^2; \\
 h_1 &= -\sum_{i=1}^N (a_x^i - b_x^i); \quad h_2 = -\sum_{i=1}^N (a_y^i - b_y^i); \\
 h_3 &= -\sum_{i=1}^N (a_z^i - b_z^i); \quad h_4 = -\sum_{i=1}^N (a_y^i b_z^i - a_z^i b_y^i); \\
 h_5 &= -\sum_{i=1}^N (a_z^i b_x^i - a_x^i b_z^i); \quad h_6 = -\sum_{i=1}^N (a_x^i b_y^i - a_y^i b_x^i).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Розв'язавши (4), визначимо потрібні значення  $P_x P_y P_z \alpha \beta \gamma$ , які визначають перетворення. Отримані результати лінійних і кутових зсувів  $P_x P_y P_z \alpha \beta \gamma$  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 [4]. На рис. 1 приведені сполучення контрольних обводів вимірюваного об'єкта і математичної моделі.

Кількість точок у перетині  $M$  залежить від конкретної геометрії перетину. Кожен вимірний перетин необхідно порівняти з відповідним йому перетином математичної моделі. Для цього його потрібно повернути на кут  $\alpha$ , і зсунути на вектор  $P$  в площині перетину [4, 5].

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 вимірні точки  $b^i$  так, що відстань від точок  $a^i$  до точки  $c^{i(0)}$  мінімально. Послідовно розраховуються розміри від точки  $a^i$  до кожного з відрізків  $[b^j, b^{j+1}]$ ,  $j = 1, \dots, M = 1$ . 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:

$$d(t) = b^i + (b^{i+1} - b^i)t, \quad t \in [-\infty, \infty]. \tag{7}$$

Умова перпендикулярності

$$(b^{i+1} - b^i) (a^i - d(t^*)) \tag{8}$$

Після чого визначається значення параметра  $t^*$

$$t^* = \frac{(b_x^{j+1} - b_x^j)(a_x^i - b_x^j) + (b_y^{j+1} - b_y^j)(a_y^i - b_y^j)}{(b_x^{j+1} - b_x^j)^2 + (b_y^{j+1} - b_y^j)^2}. \tag{9}$$

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

$$d = \begin{cases} b^j, & t \leq 0; \\ d(t^*), & 0 \leq t \leq 1 \\ b^{j+1}, & t \geq 1. \end{cases} \tag{10}$$

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  $b^k$ ,  $k = j-L, \dots, j+L$ , що розташований в межах знайденої точки  $c^{i(0)}$ , апроксимуються. Так само визначається точка  $c^i$ , що відповідає точці  $a^i$ . В результаті, маємо  $N$  точок  $a^i$  контрольного перетину математичної моделі і сумісні їм  $N$  точок  $c^i$  обмірюваного перетину. Необхідно розрахувати вектор  $P$ , на який треба зсунути точки, і кут  $\alpha$ , на який їх необхідно повернути до повного збігу. Мінімізуємо функція Лагранжа:

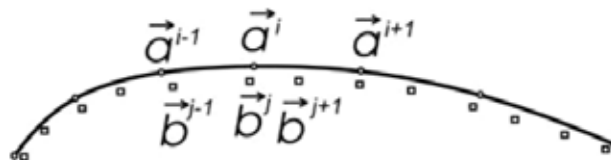


Рис. 1. Суміщення контрольних обводів вимірюваної складної просторової поверхні і математичної моделі

$$j = \sum_{i=1}^N (a_x^i - c_x^i)^2 + (a_y^i - c_y^i)^2, \quad (11)$$

$c^i$  – зсунута на вектор  $P$  і повернута на кут  $\alpha$  точка  $c^i$

$$c^i = \begin{bmatrix} c_x^i \\ c_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x^i + P_x - c_y^i \alpha \\ c_y^i + P_y + c_x^i \alpha \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Умовами мінімуму функції Лагранжа є

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial P_x} &= -2 \left[ -P_x N + \alpha \sum_{i=1}^N c_y^i + \sum_{i=1}^N (a_x^i - c_x^i) \right] = 0; \\ \frac{\partial J}{\partial P_y} &= -2 \left[ -P_y N + \alpha \sum_{i=1}^N c_x^i + \sum_{i=1}^N (a_y^i - c_y^i) \right] = 0; \\ \frac{\partial J}{\partial \alpha} &= 2 \left[ -P_x \sum_{i=1}^N c_y^i + P_y \sum_{i=1}^N c_x^i + \alpha \sum_{i=1}^N ((c_x^i)^2 + (c_y^i)^2) + \sum_{i=1}^N (a_x^i c_y^i - a_y^i c_x^i) \right] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Вирішив систему з трьох лінійних рівнянь (13), отримаємо значення  $P_x, P_y$  і  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{h_1 + d_{13}\alpha}{N}; \quad P_y = \frac{h_2 + d_{32}\alpha}{N} \\ \alpha &= \frac{Nh_3 + h_1 d_{13} - h_2 d_{32}}{Nd_{33} - (d_{13})^2 - (d_{32})^2} \end{aligned} \quad (14)$$

де

$$\begin{aligned} d_{13} &= \sum_{i=1}^N c_y^i; \quad d_{32} = \sum_{i=1}^N c_x^i; \quad d_{33} = \sum_{i=1}^N ((c_x^i)^2 + (c_y^i)^2); \\ h_1 &= \sum_{i=1}^N (a_x^i - c_x^i); \quad h_2 = \sum_{i=1}^N (a_y^i - c_y^i); \quad h_3 = \sum_{i=1}^N (a_x^i c_y^i - a_y^i c_x^i). \end{aligned} \quad (15)$$

Розрахнок довжини кроку залежить від використаної схеми інтерполяції та від поверхні об'єкту [2, 7]. При використанні лінійної інтерполяції, взагалі встановлюють допуск на максимальне відхилення  $\delta$  дійсної кривої від хорди по нормалі, що з'єднують дві послідовні точки вимірювання [6].

Використовується апроксимація кривої її спряженої сфери, так що кривизну перетину в даному місці можна використати для отримання розміру кроку:

$$L^2 = 4\delta(2p - \delta), \quad (16)$$

Де  $L$  – довжина кроку,  $\delta$  – 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 [5]

де  $R$  – радіус наконечника,  $\alpha$  – кут між вектором швидкості та горизонтальною віссю

$$\Delta_{\text{сф}} = R \cdot \frac{1 - \sin \alpha}{\sin \alpha}, \quad (17)$$

На рис. 2. показана точка дотику однозначної гладкої поверхні із сферою вимірювального наконечника радіуса  $R$

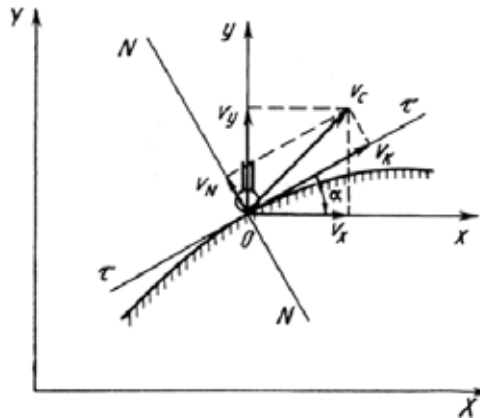


Рис. 2. Геометрія дотику сфери вимірювального наконечника та поверхні

Сумарна похибка вимірювань датчика буде складатися з трьох похибок [4]:

$$D_e = D_n + D_k + D_z \quad (18)$$

де  $D_n = \delta \cdot \max\left(\frac{\partial z}{\partial n}\right)$  – похибка позиціонування,  $D_k$  – 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 [7, 8].

де  $n_s$  – кількість параметрів, що описують аналітичну частину,  $l$

$n_i$  – кількість частин поверхні. Для більш точного відтворення аналітичного еталону поверхні з міркувань, що  $N$  точок необхідно для відновлення значень  $z$ ,  $N - 3$  для  $z'$ , та  $N - 3$  для  $z''$ , беруть  $N - 3 N_{min}$ . Якщо ці точки рівномірно розподілені по поверхні, то можна стверджувати, що вони утворюють множину відновлюваної поверхні.

**Висновки.** У роботі удосконалено математичну модель процесу вимірювання механічних величин, яка враховує вплив факторів нестабільності та дозволяє визначати положення рухомого ланцюга системи під час експлуатації сис вимірювання. Було отримано кількість контрольних точок перетину в математичній моделі та відповідну кількість вимірних точок перетину та вектор  $P$ , на який потрібно перемістити точку, і кут  $\alpha$ , на який її потрібно повернути для ідеального суміщення. Проведено вимірювальний аналіз на основі технічних вимог до деталей зі складною формою, який служить джерелом інформації про якість авіаційних деталей і забезпечує своєчасне виявлення деталей, що відхиляються від зазначеної в конструкторській документації що дозволяє завчасно усунути виробничі порушення встановлених стандартів якості та точності.

#### Список використаних джерел

1. Дуднік А. С. Комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин : монографія / А. С. Дуднік, В. П. Квасніков. Київ : Інтерсервіс, 2018. 175 с.
2. Єжель М. О. Дослідження методів контролю геометричних характеристик об'єктів складної форми / М. О. Єжель, Н. А. Зубрецька. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг : тези доповідей II-ої Міжнар. наук.-практ. конф. (15 червня 2018 р., м. Київ) / відп. за вип. М. А. Зенкін. Київ : КНУТД, 2018. С. 124–125.
3. Орнатський Д. П. Методи та засоби підвищення метрологічних характеристик дистанційних вимірювань механічних величин : автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.01. Одес. держ. акад. техн. регулювання та якості. Одеса, 2015. 40 с.
4. Квасніков В. П. Розробка координатного методу вимірювання параметрів зубчастого колеса / В. П. Квасніков, О. В. Діхтєвський. *Вісник інженерної академії України*. 2019. № 2.
5. 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: IX Міжнародна науково-практична конференція. Черкаси, 5–10 вересня 2005 р. Черкаси: ЧДТУ, 2005. С. 155–157.
6. 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.-практ. конф., 26–29 квітня 2016 р.: матеріали доп. Чернівці: ЧНТУ, 2016. С. 310–311.
7. Чалий О. В. Дослідження можливостей координатно-вимірювальних машин, та характеристик датчиків, Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2023). Шістнадцята міжнародна науково-практична конференція 23–24 травня 2023 р., Київ, Україна. К.: НАУ, 2023. 402 с.
8. Bosch J. A. *Coordinate Measuring Machines and Systems* (Boca Raton, FL: CRC Press). 1995. pp. 24 p. 496.
9. Sladek J. A. *Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements*. 2016. (Berlin: Springer)
10. Sztendel M., Papananias C. Pislaru, "Improving the dynamic performance of five-axis CNC machine tool by using the software-in-the-loop (SIL) platform," in *Laser Metrology and Machine Performance XI*, LAM DAMAP, Huddersfield, UK, 2015, pp. 170–180.

**Chalyi O. V.**

Postgraduate Student

Assistant Professor at the Department of Computerized Electrical Engineering Systems and Technologies  
Higher Educational Institution "National Aviation University"

Kyiv, Ukraine

**E-mail:** 7769225@stud.nau.edu.ua

**ORCID:** 0009-0003-5429-8869

## MEASUREMENT OF COMPLEX SPATIAL SURFACES ON A CO-ORDINATE MEASURING MACHINE

### Abstract

In this section, a study of physically measured objects and their mathematical models, characterized by complex spatial structures, is carried out. The basis of the new method is to use the formulas of the Lagrange function located in a certain mathematical space. An algorithm was created that includes a mathematical model with controlled bypass for efficient measurement of complex parts. This algorithm was created taking into account the characteristics of objects with complex spatial surfaces. The result is to obtain the minimum number of points necessary for high-quality measurement of the analyzed region of the object's surface. This is an important step in developing accurate and effective measurement methods in spatial surface conditions with complex and interrelated properties. The system not only allows the analysis of physical measurement objects, but also the development of practical solutions to improve KMM when measuring objects with complex spatial geometries. This helps increase the accuracy and reliability of measurements in modern technological processes and scientific research, while taking into account important measurement aspects such as different objects and interactions them in space. In particular, cases are considered when measuring objects have common or intersecting surfaces, which complicates the accurate determination of geometric parameters. The study presents new concepts and methods to improve the efficiency of measuring complex spatial surfaces. This method not only ensures accuracy but also optimizes the measurement time and resources required to perform the measurement. We also consider the problem of determining criteria to minimize measurement errors and evaluate the reliability of results, which ensures not only high accuracy, but also reliability of the data obtained, which This is important in the measurement process, where the results can influence other factors. technical or scientific decisions. Overall, this method significantly contributes to the development of modern coordinate measurement methods and their application in complex spatial conditions and high accuracy requirements.

**Key words:** coordinate measuring machine, scanning, control points.

### References

1. Dudnik, A.S., & Kvasnikov, V.P. (2018). *Kompiuteryzovani systemy vymiriuvannia mekhanichnykh velychyn [Computerized Measurement Systems: Monograph.]* Kyiv: Interservice [in Ukrainian]
2. Yezhel, M.O., & Zubretska, N.A. (2018). Doslidzhennia metodiv kontroliu heometrychnykh kharakterystyk ob'ektivskladnoi formy [Investigation of methods for controlling geometric characteristics of objects of complex shape]. *Innovations and Engineering: Proceedings of the 2nd International Scientific-Practical Conference*. Kyiv National University of Technologies and Design, [in Ukrainian].
3. Ornatskyi, D.P. (2015). Metody ta zasoby pidvyshchennia metrolohichnykh kharakterystyk dystantsiinykh vymy-riuvan mekhanichnykh velychyn [Methods and means to improve the metrological characteristics of remote measurements of mechanical quantities]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality [in Ukrainian].
4. Kvasnikov, V.P. (2019). Rozrobka koordynatnoho metodu vymiriuvannia parametriv zubchastoho koleasa [Development of a coordinate method for measuring gear wheel parameters]. *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 2 [in Ukrainian].
5. Kvasnikov, V.P., & Osmolovskyi, O.I. (2005). Pidvyshchennia dynamichnoi tochnosti system avtomatychnoho ehuliuвання koordynatnykh vymiriuvannykh mashyn [Increasing the dynamic accuracy of automatic control systems for coordinate measuring machines]. In: *Systems and Means of Information Transmission and Processing: IX International Scientific-Practical Conference* Cherkasy State Technological University [in Ukrainian].
6. Kvasnikov, V.P., Kataeva, M.O., & Ignatenko, P.L. (2016). Metod kontroliu liniino-kutovykh parametriv detalei skladnoi heometrychnoi formy [Method for controlling linear-angular parameters of parts with complex geometric shapes]. In: *Comprehensive Quality Assurance of Technological Processes and Systems: VI International Scientific-Practical Conference*. Chernihiv National University of Technology [in Ukrainian].
7. Chalyi, O.V. (2023). Doslidzhennia mozhlyvosti koordynatno-vymiriuvannykh mashyn, ta kharakterys-tyk datchykyv [Research on the possibilities of coordinate measuring machines and characteristics of sensors]. In: *XVI International Scientific-Practical Conference "Integrated Intelligent Robotic-Technical Complexes"*. IIRTC-2023 [in Ukrainian].
8. Bosch, J.A. (1995). *Coordinate Measuring Machines and Systems* (Boca Raton, FL: CRC Press) pp. 24 p. 496 [in English].
9. Sladek, J.A. (2016). *Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements* (Berlin: Springer) [in English].
10. Sztendel, M. Papananias, & C. Pislaru, (2015). "Improving the dynamic performance of five-axis CNC machine tool by using the software-in-the-loop (SIL) platform," in *Laser Metrology and Machine Performance XI, LAMDAMAP*, Huddersfield, UK, pp. 170-180 [in English].