УДК 531.7:62-2:629.7 (043.3) DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.52-60

В.П. Квасніков, проф., д-р техн. наук, **Д.А. Катаєв,** асп.
Національний авіаційний університет, Київ, Україна
e-mail: 627627@stud.nau.edu.ua

Методи підвищення точності вимірюваннь за допомогою координатно-вимірювальної руки

В статті розроблено алгоритми програмного забезпечення контролю вимірювань координатно-вимірювальної руки для проведення дистанційних вимірювань. Запропоновано алгоритми оцінки точності проведення дистанційних вимірювань деталей із складною геометричною формою. Описано принцип роботи V-образних щупів. Проведено критичний аналіз специфікації вимог до точності для вимірювань деталей із складною геометричною формою. Досліджено основні джерела похибок вимірювань за допомогою координатно-вимірювальної руки.

координатна вимірювальна техніка, координатно-вимірювальна рука, геометричні допуски, безконтактний щуп, дистанційні вимірювання

Постановка проблеми. Оптичні вимірювання мають багато переваг у порівнянні зі звичайними; контактні вимірювання [1]. Координатно-вимірювальна рука, що використовуються для вимірювання деталей із складною геометричною формою, може бути оснащена жорсткими щупами, сенсорними щупами або безконтактними V-образними щупами [2-9]. Найбільшого розповсюдження в наш час набули безконтактні щупи для вимірювань деталей із складною геометричною формою через їх зручність у використанні, багатофункціональність та достатню швидкодію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найчастіше для перевірки кінцевого продукту використовуються спеціальні повірочні міри (контрольні калібри). Цей вид перевірки найбільш тісно пов'язаний з профілем будь-яких поверхневих допусків [12, 13]. Деталь відповідає вимогам, якщо вона відповідає контрольному калібру, тобто будь-яка його частина не виступає за краї контрольного калібру, а точки кріплення елемента знаходяться в певних положеннях, відповідних допуску на калібру. Контрольний калібр дозволяє перевірити, чи відповідає вимірювальна деталь вимогам, але не дає значень відхилень, які необхідні, наприклад, для дослідження у режимі статичного процесу контролю можливостей процесу.

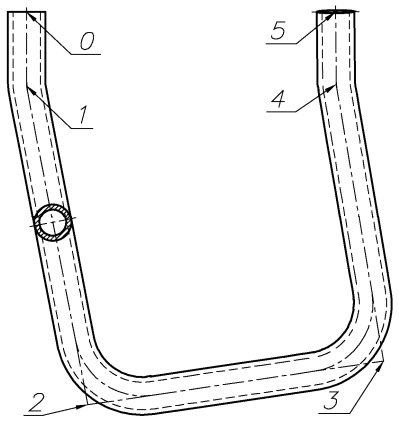
Постановка завдання. У промисловій практиці специфікація вимог до точності виготовлення деталі зі складною просторовою формою все ще недостатньо точна, що часто призводить до значних відхилень від заданої форми. Оскільки номінальна форма деталі зі складною геометрією визначається характерними точками, актуальною стає задача стандартизації допусків до положень цих точок та удосконалення процесу контролю точності вимірювань.

Виклад основного матеріалу. Автоматизація виробничих процесів та проведння метрологічних робіт зокрема, вимагає впровадження спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, G-PAD [10]). Безконтактні щупи використовуються для вимірювання деталей зі складною геометрією різного діаметру та виготовлених з будь-якого матеріалу. Наприклад, Romer пропонує безконтактні щупи 6 розмірів, що охоплюють діаметр елементів до 130 мм [11]. Результати вимірювань складних деталей, надані програмним забезпеченням, що використовується

© В.П. Квасніков, Д.А. Катаєв, 2022

з вимірювальними кронштейнами, оснащеними V-подібним щупом, складаються з довжин і кутів між прямими частинами елемента. Програмне забезпечення також може розраховувати поправки для параметрів згинальних верстатів. Завдяки системі кодування V-образні датчики можна замінювати під час вимірювання без необхідності перекваліфікації щупа [10].

Стандартний спосіб визначення розмірів деталі зі складною просторовою формою полягає в наданні координат вимірювальних точок (ВТ) в системі координат деталі і радіусів вигину (рис.1).



ВТ	X	Y	Z
0	0000	0000	0000
1	0000	-43 309	0000
2	35 931	-230 369	1189
3	209 192	-204 843	6924
4	180 963	-42 409	20 049
5	180 434	0,128	23 628

Рисунок 1 – Розміри гнутих елементів; простий приклад креслення з таблицею координат
Джерело: розроблено автором

На рис. 2 представлена схема V-образного щупа що оснащений двома лазерними системами, що складаються з випромінювача лазерного променю і детектора.

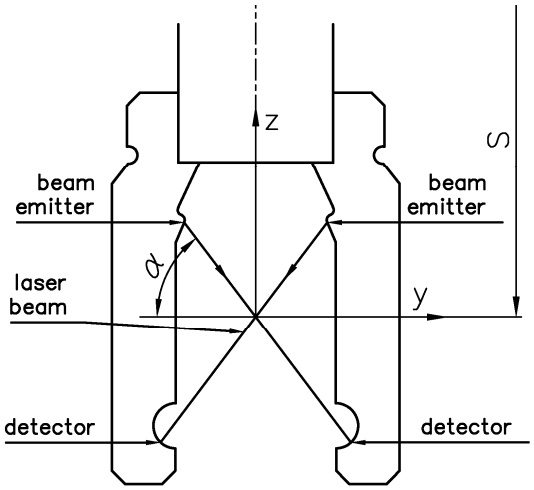


Рисунок 2 – Схема V-образного щупа з розрахунковими параметрами S і α
Джерело: розроблено автором

Конструктивними параметрами V-образного щупа є: відстань S точки перетину балок від останнього з'єднання вимірювального кронштейна та кут α. Орієнтація щупа характеризується вектором його осі у системі координат щупа $u = [0, 0, 1]$ і вектором нормалі площини променів у системі координат щупа $v = [1, 0, 0]$. Вектори напряму для окремих променів у системі координат щупа: $w_1 = [0, \cos\alpha, \sin\alpha]$, $w_2 = [0, \cos\alpha, -\sin\alpha]$.

Відповідна модель, що дозволяє розрахувати положення та орієнтацію щупа під час зондування в системі координат координатно-вимірювальної руки, заснована на моделі прямої кінематики (рис. 3) за допомогою конвенції Денавіта-Гартенберга (1) [14-17].

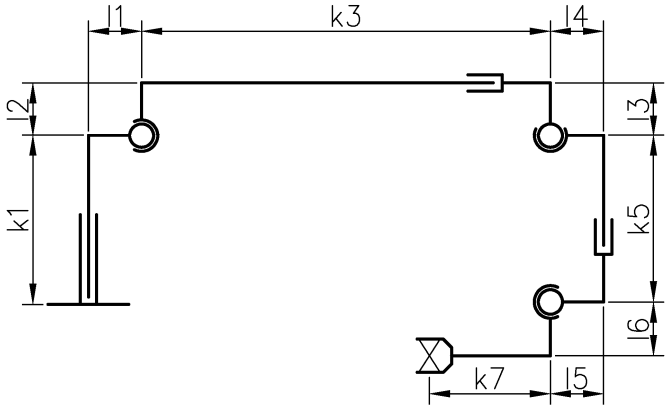


Рисунок 3 – Кінематична модель вимірювального плеча, що використовується для аналізу похибок вимірювань елементів

Джерело: розроблено автором

Матриця координатного положення одного суглоба має вигляд:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & l_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & l_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & k_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Положення та орієнтація V-щупа наведено в матриці T моделі Денавіта-Гартенберга (необхідній для моделювання), що є результатом матриць перетворення [18-20]:

$$T = A_1 \cdot \ldots \cdot A_n. \quad (2)$$

Координати характерної точки щупа (точка перетину балок для V-образного щупа) наведені в елементах T_{14}, T_{24}, T_{34}, а орієнтація щупа (вектори напрямку осей) – у таких елементах: X вектор осі – (T_{11}, T_{21}, T_{31}), вектор осі Y – (T_{12}, T_{22}, T_{32}), вектор осі Z – (T_{13}, T_{23}, T_{33}).

V-щуп генерує вимірювальні сигнали, коли будь-який з лазерних променів переривається, а також коли промінь повторно з'єднує випромінювач і детектор. У той же момент програмне забезпечення записує положення та орієнтацію датчика, а також номер променю, який генерував сигнал.

Під час руху щупа по відношенню до вимірюваної деталі, як у напрямку до деталі, так і у зворотному, послідовно мають місце наступні ситуації (рис. 4):

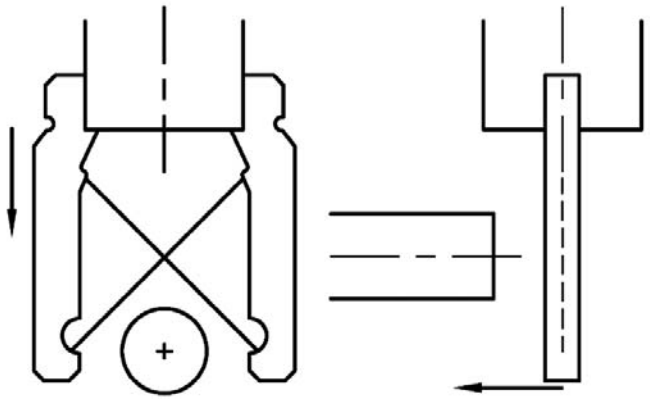
поступає сигнал від обох детекторів;

поступає сигнал лише від першого детектора;

від обох детекторів не поступає сигналу;

поступає сигнал лише від другого детектора;

поступає сигнал від обох детекторів при початку зворотного руху.



а) б)

а) вимірювання точки осі, б) визначення кінцевої точки елемента

Рисунок 4 – Відносне положення та орієнтація щупа та зігнутого елемента під час

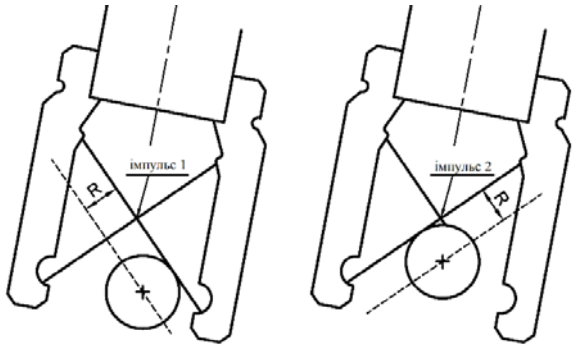
Джерело: розроблено автором

Під час вимірювання точок осі деталі оператор має вирівняти щуп перпендикулярно осі вимірюваного елемента і вести датчик уздовж прямої лінії, не змінюючи його орієнтацію (рис. 4,а). Крім того, для визначення положення кінцевих точок деталі необхідно перемістити щуп до кінця елемента, зберігаючи його правильну орієнтацію щодо осі вимірювальної деталі (площина балок, перпендикулярна до осі елемента) (рис. 4,б). Оскільки виконання цих вимог у виробничих вимогах з достатньою точністю неможливо, з'являється невизначеність вимірювання.

Для зменшення невизначеності та підвищення точності вимірювань запропоновано наступний метод: припустимо, що V-образний датчик можна переміщати точно вздовж прямої лінії в площині, перпендикулярній осі елемента, і що діаметр деталі відомий (діаметр вимірюваного елемента вводиться користувачем перед вимірюванням), то для визначення координат точки осі деталі достатньо переміщати щуп до тих пір, поки послідовно обидва променю не будуть порушені.

Координати точки осі обчислюються з перетину двох прямих, паралельних лазерним променям, і зміщуються в площині променів (у відповідному напрямку) на значення радіусу деталі (рис. 5,а). Можна довести, що можливий поворот (під час вимірювання) щупа навколо осі елемента не вносить жодної похибки (рис. 5,б).

Неправильне значення діаметра або переміщення щупа без збереження перпендикулярної орієнтації площини балок щодо осі елемента призводить до похибки виміряного положення елемента в напрямку зондування.



а) б)

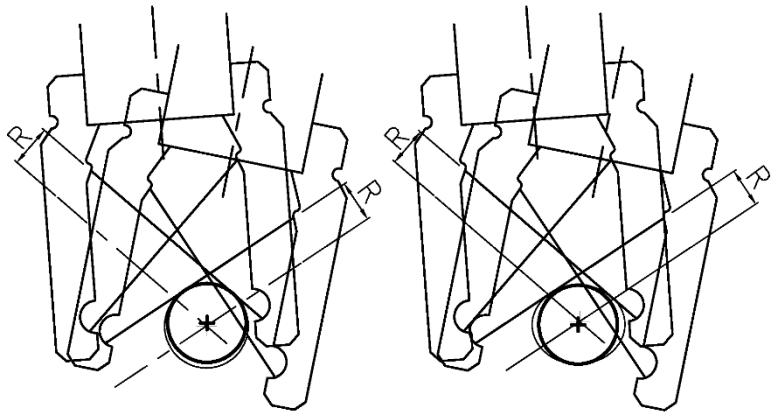
а) переривання першого променю, б) переривання другого променю

Рисунок 5 – Алгоритм визначення точки осі елемента на основі відомого радіусу елемента *R* і вимірювальних сигналів, що генеруються при перериванні 2 лазерних променів

Джерело: розроблено автором

Враховуючи той факт, що V-образний щуп не переміщується в одній площині, зазначені прямі також не лежать в одній площині, тому для обчислення точки осі необхідно обчислити площину проекції (наближення площини перпендикулярно до осі елемента), на якому точка осі повинна бути обчислена з спроектованих прямих.

На точність вимірювання за допомогою V-образного щупа впливають, серед іншого, реальне значення діаметра виміряного елемента деталі (яке вводиться користувачем) і реальна орієнтація датчика (відмінність від перпендикуляра) по відношенню до деталі вісь (рис, 6).



а) б)

а) неправильне значення діаметра елемента, б) нахил площини V-образного щупа щодо осі елемента
Рисунок 6 – Пояснення джерел похибки вимірювання

Джерело: розроблено автором

Якщо реальний діаметр елемента відрізняється від значення, введеного в програмне забезпечення, або пластина V-образного датчика не перпендикулярна до осі елемента, то вимірювана точка осі буде зміщена відносно реальної точки осі.

Наступний метод підвищення точності полягає у тому, що у повній послідовності руху в одному напрямку точку осі можна обчислити двічі, а її координати можна обчислити як середнє з двох записаних точок. У повній послідовності «вперед-назад» точку осі можна обчислити 4 рази і в якості кінцевого результату береться середнє з 4 результатів, що додатково підвищує точність.

Використовуючи один із запропонованих методів, прямий фрагмент деталі можна розрахувати на наступному кроці як пряму, побудовану з двох або більше точок. Є можливість визначити прямий фрагмент деталі за один крок, розв’язавши тривимірне рівняння.

У зв’язку з тим, що вимірювання проводяться на 2x ділянках, виходить відповідно з обраною точністю вісім або шістнадцять дотичних до елемента із заданим діаметром точок вимірювання. Визначення осі прямолінійного фрагмента деталі із складною просторовою формою передбачає розв’язування наступної математичної задачі: знайти пряму, яка віддалена від кожної з 8 або 16 прямих приблизно на однакову відстань (радіус елемента).

Відстань d між прямою k, визначеною точкою K і вектором u, і прямою l, визначеною точкою L і вектором v, можна виразити наступною формулою

$$d = \left| \frac{(K - L) \cdot (u \times v)}{|u \times v|} \right|. \qquad (SEQ\,rown \setminus * ARABIC 3)$$

Невідомі параметри L і $\mathbf{v}$ прямої l, що представляє прямий відрізок осі деталі, можна обчислити шляхом мінімізації суми квадратів відстаней 8 (або 16) прямих K_i від прямої l (рис. 7).

$$\sum_{i=1}^{8(16)}\left(\frac{(K-L)\cdot(u\times v)}{|u\times v|}\right)^2 \to \min. \qquad (4)$$

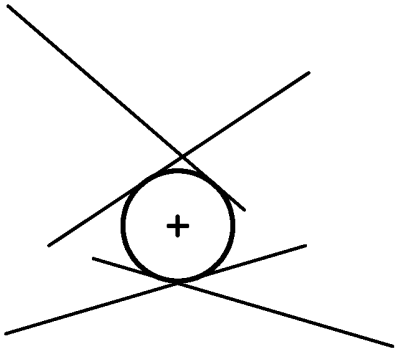


Рисунок 7 – Моделювання результатів вимірювань (тангенціальних прямих) для однієї вимірювальної ділянки в режимі вимірювання «одинарна точність»

Джерело: розроблено автором

Завдяки відомим параметрам V-образного щупа (кут променів і вектор нормалі площини балок) прямі k_i можуть бути визначені за показаннями шарнірних датчиків і характеристичними точками V-образного щупа K_i (перетин променів) та вектори визначення V-образного щупа (напрямки променів) у момент генерації вимірювальних сигналів.

Для вимірювання гнутих елементів найчастіше використовується наступний алгоритм. Після визначення прямих відрізків осі зігнутого елемента розраховуються точки перетину окремих відрізків. Оскільки дійсні осі прямих відрізків не перетинаються, програмні алгоритми в результаті перетину зазвичай дають середню точку найкоротшої лінії, що з'єднує осі.

Для визначення кінцевих точок вимірюваного елемента необхідно перемістити V-образний щуп у напрямку до торців деталі вздовж її осі, щоб балки перетнули торець вимірювального елемента. Але даний алгоритм має цілий ряд недоліків, основним серед яких є точність позиціювання щупа відносно координат деталі.

Запропоновано наступний алгоритм вимірювання деталей складної геометричної форми за допомогою координатно-вимірювальної руки (рис.8):

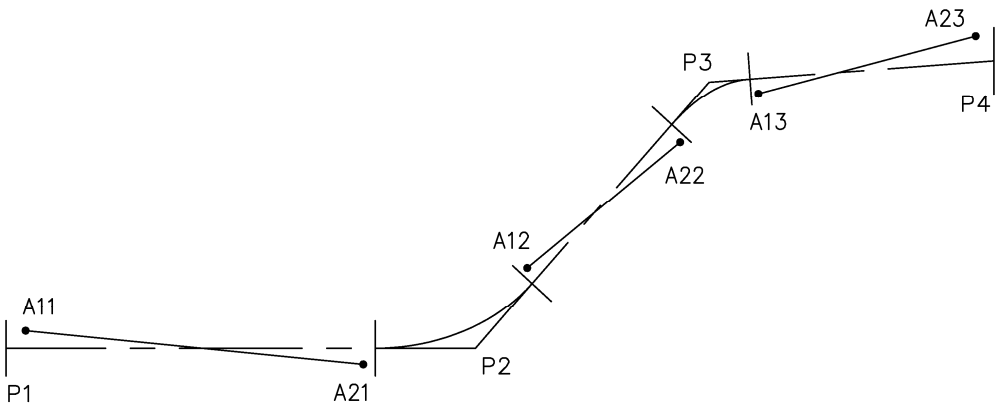


Рисунок 8 – Графічне пояснення алгоритму розрахунку відхилення

Джерело: розроблено автором

1. вимірювання осі прямих відрізків деталі за допомогою запропонованого методу;

2. обчислення точки A_{ij} (i = 1 ... 2; j – залежно від кількості прямих відрізків) осі біля кінців прямих відрізків деталі;

3. розрахунок матриці перетворення системи координат, що є результатом найкращого прилягання множини точок A_{ij} до номінальної осі криволінійної ділянки деталі, визначеної характерними точками, причому критерієм підгонки є сума квадратів відстаней α_{ij} між точками A_{ij} і прямими лініями, що визначаються сусідніми вимірювальними точками P_j і P_j+1

$$\sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{2}\frac{a_{ij}^2+b_{ij}^2+c_{ij}^2}{l_{ij}^2}\to\min, \qquad (SEQ\,rown\setminus *ARABIC5)$$

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \left(y_{Pj}-y_{Aij}\right)\left(z_{P(j+1)}-z_{Pj}\right)-\left(z_{Pj}-z_{Aij}\right)\left(y_{P(j+1)}-y_{Pj}\right),\\ b_{ij} &= \left(z_{Pj}-z_{Aij}\right)\left(x_{P(j+1)}-x_{Pj}\right)-\left(x_{Pj}-x_{Aij}\right)\left(z_{P(j+1)}-z_{Pj}\right),\\ c_{ij} &= \left(x_{Pj}-x_{Aij}\right)\left(y_{P(j+1)}-y_{Pj}\right)-\left(y_{Pj}-y_{Aij}\right)\left(x_{P(j+1)}-x_{Pj}\right), \end{aligned} \qquad (6)$$

$$l_j^2=\left(x_{P(j+1)}-x_{Pj}\right)^2+\left(y_{P(j+1)}-y_{Pj}\right)^2+\left(z_{P(j+1)}-z_{Pj}\right)^2. \qquad (7)$$

4. обчислення відстані d_{ij} усіх розрахованих точок осей і номінальної осі

$$d_{ij}=\frac{\sqrt{a_{ij}^2+b_{ij}^2+c_{ij}^2}}{l_j}. \qquad (SEQ\,rown\setminus *ARABIC8)$$

5. розрахунок відхилення поверхні як подвоєну найбільшу відстань d_{ij}

$$\Delta=2\cdot\max(d_{ij}). \qquad (3)$$

6. визначення координати кінцевих точок і проектування їх на номінальну вісь;

7. розрахунок відхилення положення кінцевих точок (приблизно розглядається як положення торців) за допомогою подвоєного значення відстані цих точок до їх відповідного номінального положення.

Висновки. Були представлені алгоритми, що використовуються в програмному забезпеченні координатно-вимірювальної руки з V-образними щупами. Було запропоновано методи підвищення точності метрологічних робіт при виготовленні деталей складної геометричної форми будь-якого допуску поверхні без системи прив'язки до координат деталі.

Розроблено методи вимірювання для координатно-вимірювальної руки, оснащених безконтактними щупами, та декілька варіантів оцінки результатів вимірювань для деталей складної просторової форми. На основі результатів дослідження визначено найважливіші джерела похибки вимірювань.

Список літератури

1. Технологические основы контроля на координатно-измерительных машинах / Б. С. Бражкин, Н. И. Исаев, А. А. Кудинов, В. С. Миротворский; под общ. ред. А. А. Кудинова. М.: Миттель Пресс, 2014. 149 с.
2. Gao H, Zhang ML and Zhang XJ. Review on key technology of manipulator absolute positioning accuracy calibration. *Application Research of Computers* . 2017; 34(9): 2570–2576.
3. Гречихин С. В. Разработка процесса приемочного контроля с использованием координатно-измерительной машины детали «Корпус редуктора»: выпускная квалификационная работа . Рос. гос. проф.-пед. ун-т, Ин-т инж.-пед. образования, Каф. технологии машиностроения, сертификации и методики проф. обучения. Екатеринбург, 2017. 68 с.
4. Li L, Yang H, Jiang L, et al. Optimal measurement area determination algorithm of articulated arm measuring machine based on improved FOA. *Measurement and Control.* 2020; 53(9–10): 2146–2158.
5. Мурачёв Д. А., Черепанов М. А. Методика измерения параметров на координатно-измерительной машине GLOBAL CLASSIC 05.05.05 . *Молодой ученый*. 2016. No12.3. С. 53-58
6. Lu Y, YuLMandGuoB.Calibration of industrial robot structure parameters based on closed dimensional chain. *Chinese Journal of Scientific Instrument* . 2018; 39(02): 3846. (in Chinese)
7. Чапала О.В. Координатно-измерительные машины и их применение . Новаинфо. 2016. No 57. URL: http://novainfo.ru/article/10054 (дата обращения: 14.08.2022).
8. Li RJ, Fan KC and Huang QX. A long-stroke 3D contact scanning probe for micro/nano coordinate measuring machine. *Precision Engineering.* 2016; 43: 220–229.
9. Зубарев Ю.М., Косаревский С.В. Автоматизация координатных измерений в машиностроении: учебное пособие . Изд. 3-е, стер. Санкт-Петербург :Лань, 2017. 159
10. Гречников Ф.В., Захаров О.В., Королев А.А. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах . Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. Москва: ИПУ РАН, 2016. С. 223-225.
11. Graham T. Smith . Machine Tool Metrology . An Industrial Handbook Springer International Publishing . Switzerland. 2016.
12. Этингоф М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках . М.: АПР, 2016. 336 с.

References

1. Brazhkin B.S., Isaev, N.I., Kudinov, A.A. & Mirotvorskij, V.S. (2014). *Tehnologicheskie osnovy kontrolja na koordinatno-izmeritel'nyh mashinah* [*Technological foundations of control on coordinate measuring machines]* . A. A. Kudinova (Ed.). Moskow: Mittel' Press [in Russian].
2. Gao, H, Zhang, ML & Zhang, XJ. (2017). Review on key technology of manipulator absolute positioning accuracy calibration. *Application Research of Computers, 34(9):* 2570–2576 [in English].
3. Grechihin, S.V. (2017). Razrabotka processa priemochnogo kontrolja s ispol'zovaniem koordinatno-izmeritel'noj mashiny detali «Korpus reduktora»: vypusknaja kvalifikacionnaja rabota [Development of an acceptance control process using a coordinate measuring machine for the “Reducer Housing” part: final qualification work]. Ros. gos. prof.-ped. un-t, In-t inzh.-ped. obrazovanija, Kaf. tehnologii mashinostroenija, sertifikacii i metodiki prof. obuchenija. Ekaterinburg [in Russian].
4. Li L, Yang H, Jiang L, et al. (2020). Optimal measurement area determination algorithm of articulated arm measuring machine based on improved FOA. *Measurement and Control*; 53(9–10): 2146–2158 [in English].
5. Murachjov, D.A. & Cherepanov, M.A. (2016). Metodika izmerenija parametrov na koordinatno-izmeritel'noj mashine GLOBAL CLASSIC 05.05.05 [Technique for measuring parameters on coordinate measuring machine GLOBAL CLASSIC 05.05.05]. *Molodoj uchenyj – Young scientist*, *12.3,* 53-58 [in Russian].
6. Lu Y, YuLMandGuoB.Calibration of industrial robot structure parameters based on closed dimensional chain. Chinese Journal of Scientific Instrument 2018; 39(02): 3846. [in Chinese].
7. Chapala, O.V. (2016). Koordinatno-izmeritel'nye mashiny i ih primenenie [. Coordinate measuring machines and their applications]. Novainfo. No 57. Retrieved from http://novainfo.ru/article/10054 [in Russian].
8. Li RJ, Fan KC & Huang QX. (2016). A long-stroke 3D contact scanning probe for micro/nano coordinate measuring machine. *Precision Engineering*; *43*: 220–229 [in English].
9. Zubarev, Ju.M. & Kosarevskij, S.V. 2017. *Avtomatizacija koordinatnyh izmerenij v mashinostroenii: uchebnoe posobie* [*Automation of coordinate measurements in mechanical engineering*]. 3d ed, . Sankt-Peterburg :Lan' [in Russian].
10. Grechnikov, F.V., Zaharov, O.V. & Korolev, A.A. (2016). Napravlenija povyshenija proizvoditel'nosti i tochnosti kontrolja slozhnyh poverhnostej na koordinatno-izmeritel'nyh mashinah [Directions for improving

the productivity and accuracy of control of complex surfaces on coordinate measuring machines]. *Sistemy proektirovanija, tehnologicheskoj podgotovki proizvodstva i upravlenija jetapami zhiznennogo cikla promyshlennogo produkta – Systems of design, technological preparation of production and management of the stages of the life cycle of an industrial product.* Moskva: IPU RAN, S. 223-225 [in Russian].
11. Graham, T. (2016). Smith Machine Tool Metrology. Smith An Industrial Handbook Springer International Publishing Switzerland [in English].
12. Jetingof, M.I. (2016). *Avtomaticheskij razmernyj kontrol' na metallorezhushhih stankah* [*Automatic dimensional control on metal-cutting machines*]. Moskow: APR [in Russian].

Volodymyr Kvasnikov, Prof., DSc., **Denis Kataiev**, post-graduate
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Methods of Increasing the Accuracy of Measuring with the Help of a Coordinate-Measuring Hand

In industrial practice, the specification of requirements for the accuracy of manufacturing a part with a complex spatial shape is still not accurate enough, which often leads to significant deviations from the given shape. Since the nominal shape of a part with a complex geometry is determined by characteristic points, the task of standardizing the tolerances to the positions of these points and improving the measurement accuracy control process becomes urgent.

The article has developed algorithms for the control of measuring measuring measures of the measuring and measuring hand for remote measurements. Algorithms for assessing the accuracy of remote measurements of parts with complex geometric shape are proposed.

The principle of operation of V-shaped probes is described. A critical analysis of the specification of requirements for accuracy for measuring parts with complex geometric shapes was carried out. The main sources of measurement errors are investigated by means of a coordinate-measuring hand.

Based on the results of the study, the most important sources of measurement error were identified.

coordinate measuring equipment, coordinate-measuring hand, geometric tolerances, contactless probe, remote measurements

Одержано (Received) 07.09.2022 *Прорецензовано (Reviewed) 16.09.2022*
Прийнято до друку (Approved) 26.09.2022

УДК 621.317 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.60-69

Д.М. Квашук, доц., канд. екон. наук**, В.М. Єгунько**
Національний авіаційний університет, Київ, Україна
e-mail: dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua, sv@nau.edu.ua

Аналіз методів корекції похибок вимірювальних приладів

В роботі проводиться аналіз шляхів забезпечення точності вимірювальних приладів з використанням методів корекції похибок. Проведено аналіз різних методів корекції похибок, що викликані статичними та динамічними факторами. Досліджено зворотні математичні моделі вимірювальних каналів, в якості яких використовуються інтерполяційні поліноми Лагранжа. Розглядаються способи застосування таких моделей у методах зразкових сигналів та у тестових методах підвищення точності. Запропоновано вдосконалення тестового методу коригування похибки. Обгрунтовано ефективність даного вдосконалення для застосування у складі інформаційно-вимірювальної системи. Показано, що найважливішими напрямками підвищення ефективності такої системи є забезпечення необхідної експериментальної бази, а також точність налаштування алгоритмів корекції.

похибка, вимірювання, корекція похибки, регулювання, перетворювач, зворотній зв'язок

© Д.М.Квашук, В.М. Єгунько, 2022