

## Результати дослідної ідентифікації геометричних параметрів верстата паралельної структури

Запропоновано та експериментально підтверджено метод обчислення положень центрів шарнірних опор верстата паралельної структури «гексапод» за результатами обміру еталонної деталі вимірювальним контактним датчиком, що дозволило підвищити точність у 3-5 разів.  
**механізм паралельної структури, гексапод, ідентифікація, контактний датчик**

Важливою задачею при розробці верстатів паралельної структури є досягнення високої точності положення робочого органа, яка залежить не лише від дискретності і точності приводів, але й від геометричної точності виготовлення шарнірних опор та інших компонентів. За умови, що шарнірні опори і гвинтові передачі є абсолютно точними, положення робочого органа верстата-гексапода [1] визначається 42 параметрами [2]: початковими довжинами штанг, векторами центрів шарнірних опор основи і робочого органа. Досягнення високої точності механізмів та маніпуляторів як послідовної, так і паралельної структури можливе шляхом ідентифікації дійсних геометричних параметрів (калібрування) [3]. При наявності одного або кількох замкнених кінематичних ланцюгів можлива автоідентифікація [4], що не потребує незалежного обладнання для вимірювання положення робочого органа.

Звичайно кількість датчиків у приводах механізму паралельної структури дорівнює кількості ступенів вільності. Ідентифікація можлива, якщо загальна кількість датчиків (включаючи вимірювальні) перевищує загальну кількість ступенів вільності робочого органа [5]. Виходячи з цього принципу, існуючі методи автоідентифікації можна розділити на дві категорії: надлишковість датчиків та обмеження рухомості. Метод надлишкових датчиків полягає у встановленні у механізмі паралельної структури одного або кількох додаткових датчиків, наприклад датчиків повороту у опорах [6], кутового положення робочого органа [7], вимірювальної штанги [8]. Метод обмеження рухомості робочого органа реалізується шляхом фіксації одного або кількох шарнірів за допомогою додаткових механізмів [9, 10], в результаті кількість ступенів вільності робочого органа зменшується, а кількість датчиків залишається незмінною.

У [2] запропоновано математичне обґрунтування ідентифікації із застосуванням вимірювального контактного датчика у шпинделі, але збіжність процесу ідентифікації

---

© А. М. Кириченко, Т.Г. Сабірзянов, 2012

із використанням такого методу недостатньо стабільна. Тому метою роботи є розробка та експериментальна апробація методу обчислення положень центрів шарнірних опор за результатами обміру еталонної деталі вимірювальним контактним датчиком.

Якщо розглядати поверхню еталонної деталі при її торканні вимірювальним датчиком як вимірювальну штангу із відомою довжиною, розміщення кульки вимірювального щупа відносно рухомої платформи визначене у напрямку, перпендикулярному до поверхні оправки, можна вважати, що в момент доторку платформа має 5 ступенів вільності, тоді наявність 6 датчиків у приводах задовольняє умові надлишковості датчиків.

Для заданої орієнтації платформи у момент торкання можна визначити залежність між положенням рухомої платформи та довжинами ланок. Для циліндричної поверхні зручно представити вектор координат рухомої платформи у вигляді

$$\mathbf{X}_ц = [\alpha_ц, c, R]^T, \quad (1)$$

де  $\alpha_ц$  – кут;

$c$  – відносна висота точки торкання (рис. 1).

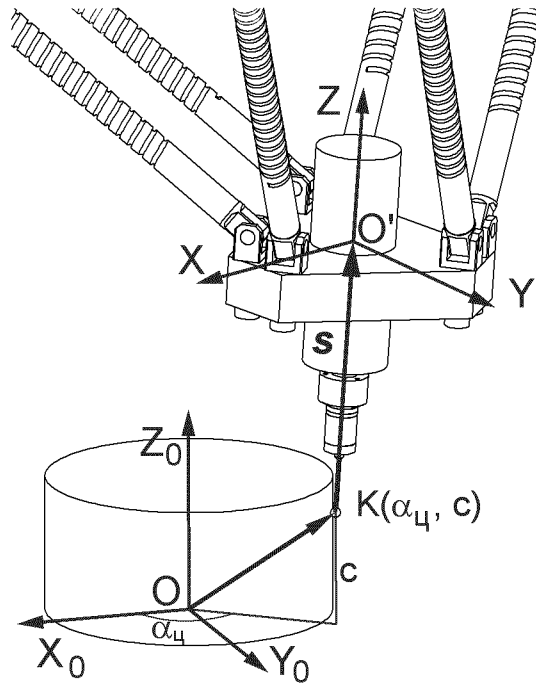


Рисунок 1 – Вимірювання сталонної деталі контактним датчиком

Тоді вектор положення рухомої платформи визначається залежністю

$$\mathbf{r}_0 = [(r_ц + r_к) \cos \alpha_ц, (r_ц + r_к) \sin \alpha_ц, c]^T + R\mathbf{s}, \quad (2)$$

де  $r_ц$  – радіус циліндра;

$r_к$  – радіус кульки вимірювального щупа;

$\mathbf{s}$  – радіус-вектор центру кульки щупа у системі координат платформи.

Оскільки відома відстань від осі циліндра до центру кульки вимірювального щупа, який лежить на осі шпинделя, довжину одної з штанг можна виразити через довжини інших, використовуючи зворотну кінематичну залежність. В якості вимірюваного параметра можна використати різницю між фактичною і номінальною довжиною обраної штанги. Тоді модель похибки для заданого положення та орієнтації платформи в момент доторку вимірювального щупа до поверхні циліндра представляє собою різницю між фактичною та номінальною довжиною штанги

$$q' - q_0' = \Delta q'. \quad (3)$$

Після перетворень та об'єднання результатів вимірювань у один вектор модель похибки приймає вигляд

$$\mathbf{D}\mathbf{D} = \Psi \cdot \mathbf{D}\mathbf{H} + M_Q \cdot \mathbf{D}\mathbf{Q}, \quad (4)$$

де  $\Delta \mathbf{H}$  – вектор відхилень параметрів ідентифікації;  
 $\Delta Q$  – вектор вимірних відхилень довжини ланок;  
 $\Psi$  – матриця похідних кінематичної функції;  
 $M_Q$  – допоміжна матриця.

Для зменшення кількості параметрів системи координат основи та платформи повернуто так, що одна з осей координат проходить через центр шарніру, що дозволило зменшити кількість параметрів до 40.

Чисельне моделювання ідентифікації виконувалося за допомогою пакету Mathcad. В якості показника похибки ідентифікації прийнято абсолютну величину вектора відхилень параметрів  $\Delta \mathbf{H}$ . В логарифмічних координатах графік збіжності процесу ідентифікації в залежності від номера ітерації (рис. 2, а) наближається до прямої лінії, перша ітерація зменшує похибку на 1,5 порядки, на кожному наступному кроці ітерації похибка зменшується майже на 3 порядки.

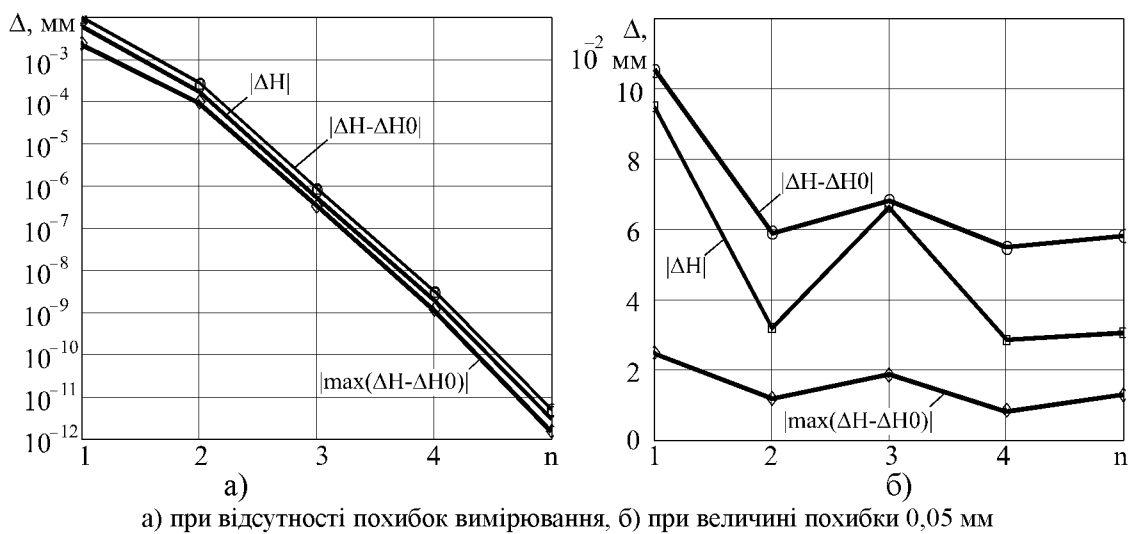


Рисунок 2 – Зміна абсолютної величини вектора відхилень

Нааявні у реальному механізмі похибки вимірювання, виготовлення еталонної деталі, руху центрів шарнірних опор при моделюванні ідентифікації можна врахувати введенням випадкових відхилень у «виміряні значення». Результати моделювання свідчать, що за наявності похибок збіжність нестабільна (рис. 2, б), при максимальній похибці вимірювання 0,05 мм абсолютна величина вектора відхилень параметрів ідентифікації складає близько 0,5 мм. Для зменшення похибки ідентифікації необхідно мінімізувати похибку вимірювання. Оскільки точність спрацювання контактного датчика достатня (1...2 мкм), слід максимально збільшувати точність шарнірних опор, кулькогвинтових передач, датчиків зворотного зв'язку приводів.

Для експериментальної перевірки розроблених методів ідентифікації геометричних параметрів обрано найбільш доступний з технологічної точки зору варіант і виготовлено циліндричну еталонну деталь діаметром  $270 \pm 0,1$  мм і висотою  $165 \pm 0,1$  мм. Процес вимірювання (рис. 3) на верстаті-гексаподі [1] виконано по програмі ЧПУ за допомогою команди G38, виміряні координати збережено у файл.

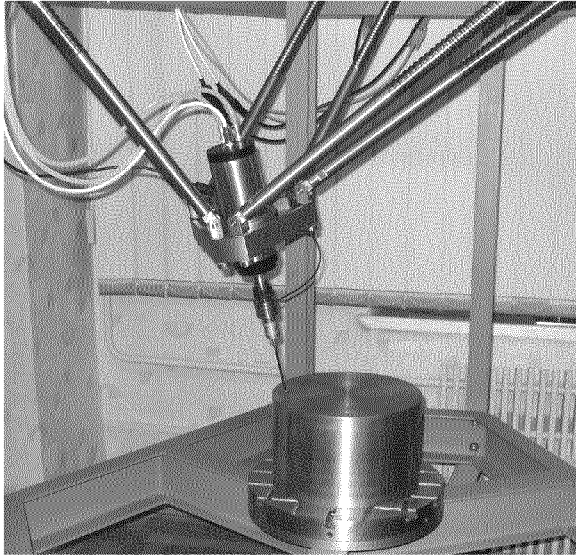


Рисунок 3 – Вимірювання оправки на верстаті

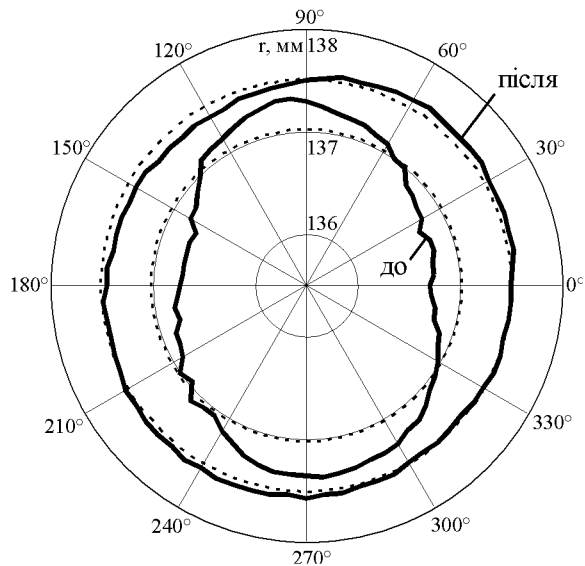


Рисунок 4 – Відхилення при вимірюванні круглої оправки до і після ідентифікації

До ідентифікації середнє значення виміряного радіуса 137,02 мм, середньоквадратичне відхилення 0,223 мм, максимальнє відхилення 0,357 мм (рис. 4). Після внесення обчислених координат центрів шарнірів і довжини ланок до системи управління верстата середнє значення радіуса склало 137,521 мм, середньоквадратичне відхилення 0,062 мм, максимальнє відхилення 0,13 мм.

#### Висновки:

1. Запропоновано метод ідентифікації геометричних параметрів для підвищення точності верстата паралельної структури, розроблено математичне обґрунтування методу обчислення положень центрів шарнірних опор за результатами обміру еталонної деталі вимірювальним контактним датчиком.

2. За результатами обміру еталонної деталі закріпленім у шпинделі верстата контактним датчиком визначені наближення координат центрів шарнірних опор, внесення яких до системи управління дозволило зменшити похибки положення платформ у 3-5 разів.

#### Список літератури

1. Струтинський В. Б. Ідентифікація геометричних параметрів механізмів паралельної структури з ланками змінної довжини / В. Б. Струтинський, А. М. Кириченко // Технологічні комплекси. – Луцьк : Вид-во ЛНТУ, 2011. – № 2(4). – С. 62-67.
2. Mooring B. W. Fundamentals of Manipulator Calibration / B.W. Mooring, Z.S. Roth, M.R. Driels. – New York : John Wiley & Sons, 1991. – 329 p.
3. Everett L. J. Forward calibration of closed-loop jointed manipulators / L. J. Everett // International Journal of Robotics Research. – 1989. – Vol. 8(4). – P. 85-91.
4. Hollerbach J. M. The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods / J. M. Hollerbach, C. W. Wampler // International Journal of Robotics Research 15 (6). – 1996. – 573-591.
5. Daney D. Kinematic calibration of Gough Platform / D. Daney // Robotica. – 2003. – Vol. 21. – P. 677-690.
6. Besnard S. Calibration of parallel robots using two inclinometers / S. Besnard, W. Khalil // Robotics and Automation. – 1999. – Vol. 3. – P. 1758-1763.
7. Patel A. Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg / A. Patel, K. Ehmann // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2000. – Vol. 40, Issue: 4. – P. 489-512.
8. Chiu Y.-J. Self-calibration of a general hexapod manipulator with enhanced precision in 5-DOF motions / Y.-J. Chiu, M. H. Perng // Mechanism and Machine Theory. – 2004. – Vol. 29. – P. 1-23.

9. Abtahi M. Calibration of parallel kinematic machine tools using mobility constraint on the tool center point / M. Abtahi, H. Pendar, A. Alasty, G.H. Vossough // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 45 (5-6). – P. 531-539.
10. Новіков М. Розроблення верстата-гексапода з шестикоординатною системою ЧПК і результати його дослідницького застосування / М. Новіков, В. Струтинський, А. Кириченко // Машинознавство. – Львів : ТЗОВ «КІНПАТРИ ЛТД», 2011. – №5-6 (167-168). – С. 3-10.

*A. H. Kyrychenko, T. Sabirjanov*

**Результаты идентификации геометрических параметров станка параллельной структуры**

Предложен и экспериментально подтвержден метод вычисления положений центров шарнирных опор станка параллельной структуры «гексапод» по результатам обмера эталонной детали измерительным контактным датчиком, что позволило повысить точность в 3-5 раз.

*A. Kyrychenko, T. Sabirjanov*

**Spatial rigidity of machine tool with parallel manipulator «pentapod»**

The mathematics for computing the joint center positions of by measuring the mandrel with touch probe is proved for hexapod parallel machine tool, resulting in accuracy 3-5 times improved.

Одержано 01.10.12