

УДК 62-231:621.9.04

А. М. Кириченко, доц., д-р техн. наук

Кіровоградський національний технічний університет

Підвищення геометричної точності гексапода

На основі кінематичних залежностей визначено вплив відхилень положення центрів шарнірних опор на точність положення робочого органа верстата. Запропоновано метод обчислення положень центрів шарнірних опор за результатами обміру еталонної деталі вимірювальним контактним датчиком.
точність, верстат паралельної структури, гексапод, ідентифікація, контактний датчик

А. Н. Кириченко

Кировоградский национальный технический университет

Повышение геометрической точности гексапода

На основе кинематических зависимостей определено влияние отклонений положения центров шарнирных опор на точность положения рабочего органа. Предложен метод вычисления положений центров шарнирных опор по результатам обмера эталонной детали измерительным контактными датчиком.

точность, механизм параллельной структуры, гексапод, идентификация, контактный датчик

Похибки виготовлення та монтажу обладнання паралельної структури спричиняють відхилення геометричних параметрів, зокрема координат центрів опорних шарнірів, що негативним чином позначається на точності положення робочого органа. Оскільки пряме вимірювання координат центрів шарнірів ускладнене, постає проблема ідентифікації дійсних геометричних параметрів механізму паралельної структури та внесення їх до системи управління для усунення впливу неточностей виготовлення [1].

Найбільш проста ідентифікація у випадку, коли є можливість безпосередньо виміряти просторове положення робочого органа з високою точністю. Оскільки таке вимірювання потребує складних технічних засобів, найчастіше використовуються непрямі методи: точне вимірювання окремих кутів орієнтації робочого органа [2], додаткова вимірювальна штанга [3], обмеження рухомості пасивних опор [4] або центру інструмента [5], вимірювання відхилень від заданої траєкторії при колових рухах за допомогою вимірювальної ланки [6]. Але для більшості згаданих методів або потрібне дороге вимірювальне обладнання, або ж точність ідентифікації окремих параметрів недостатня.

Для пошуку центрів отворів, прив'язки до заготовки, визначення довжини інструмента на верстатах досить широко використовується вимірювальні контактні датчики [7], яким властива висока точність (розкид спрацювання складає 1-2 мкм). Подібні контактні датчики оснащені вимірювальним щупом з високоточною рубіновою кулькою відомого діаметру, при торканні якої до поверхні деталі розмикається електричне коло і датчик подає сигнал до системи ЧПУ.

Метою роботи є підвищення геометричної точності верстата паралельної структури «гексапод» шляхом ідентифікації положень центрів шарнірних опор за результатами обміру еталонної деталі вимірювальним контактним датчиком.

Зворотна кінематична залежність механізму «гексапод» (платформа Стюарта-Гауфа) з шістьма ступенями вільності робочого органа визначає довжину штанг q_i (рис. 1) при відомих положенні та орієнтації рухомої платформи

$$q_i = \overline{A_i B_i} = |R \mathbf{r}_{B_i} + \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{A_i}|, \quad (1)$$

де \mathbf{r}_{B_i} – радіус-вектор центру шарніра платформи в системі координат рухомої платформи;

\mathbf{r}_0 – радіус-вектор початку координат рухомої платформи в системі координат основи;

\mathbf{r}_{A_i} – радіус-вектор центру шарніра основи в системі координат основи;

R – матриця відносного повороту, яка визначає орієнтацію платформи, $i \in 1 \dots 6$.

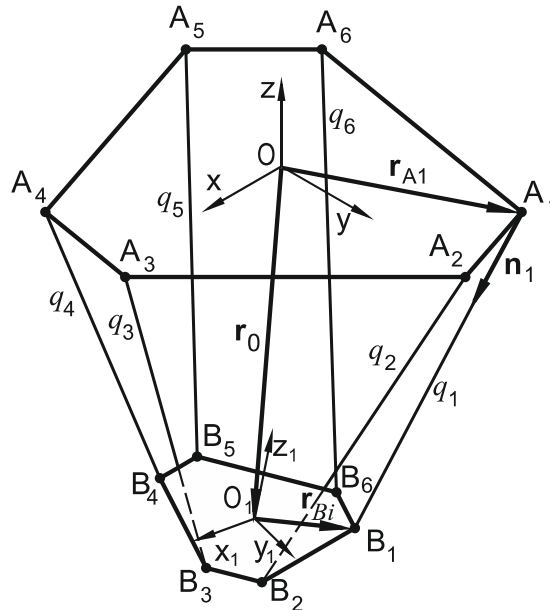


Рисунок 1 – Розрахункова схема механізму паралельної структури «гексапод»

Матриця Якобі зворотної кінематичної залежності складається з нормалізованих векторів пюкерових координат ліній штанг

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 & \dots & \mathbf{n}_6 \\ \mathbf{r}_{A1} \times \mathbf{n}_1 & \dots & \mathbf{r}_{A6} \times \mathbf{n}_6 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

де $\mathbf{n}_i = \frac{|R \mathbf{r}_i + \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{A_i}|}{|R \mathbf{r}_i + \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{A_i}|}$ – одиничні вектори осей штанг.

На відміну від розрахункових кінематичних моделей, у реальному механізмі паралельної структури наявні похибки виготовлення та монтажу, що ведуть до відхилень геометричних параметрів. Якщо вважати шарнірні опори і гвинтові передачі абсолютно точними і врахувати лише похибки положення центрів опор і довжини штанг, рівняння зворотної кінематичної залежності (1) можна записати у вигляді

$$q_i + \Delta q_i = |R(\mathbf{r}_{B_i} + \Delta \mathbf{r}_{B_i}) + \mathbf{r}_0 - (\mathbf{r}_{A_i} + \Delta \mathbf{r}_{A_i})|, \quad (3)$$

де $\Delta \mathbf{r}_{A_i}$, $\Delta \mathbf{r}_{B_i}$ – вектори похибок положення центрів шарнірних опор основи та платформи відповідно. Тоді матриця Якобі зворотної кінематичної залежності (2) також представлятиме собою функцію поточного положення з врахуванням похибок $J^{-1}(\mathbf{X}_k, \mathbf{r}_{A_i} + \Delta \mathbf{r}_{A_i}, \mathbf{r}_{B_i} + \Delta \mathbf{r}_{B_i})$, а пряма кінематична залежність матиме вигляд

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + J(\mathbf{X}_k) \cdot (\mathbf{Q} + \Delta \mathbf{Q} - G(\mathbf{X}_k)), \quad (4)$$

де \mathbf{X}_{k+1} – вектор шостого порядку наступного розрахункового положення платформи;

$\Delta \mathbf{Q}$ – вектор шостого порядку похибок довжини ланок;
 $G(\mathbf{X}_k)$ – результати розрахунку довжини ланок для поточного положення згідно (1).

Положення рухомої платформи визначається 42 параметрами, зосередженими у (3): довжинами штанг q_i і трійками координат векторів центрів шарнірних опор основи \mathbf{r}_{Ai} і платформи \mathbf{r}_{Bi} , які можна об'єднати у вектор \mathbf{H} . Вплив похибок параметрів на положення платформи можна оцінити коефіцієнтом чутливості

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{H}_i} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\mathbf{X}(\mathbf{H}_i + \Delta) - \mathbf{X}(\mathbf{H}_i)}{\Delta} \quad (5)$$

Значення коефіцієнтів чутливості збільшуються у крайніх положеннях рухомої платформи (рис. 2), що свідчить про зменшення точності на границях робочої зони.

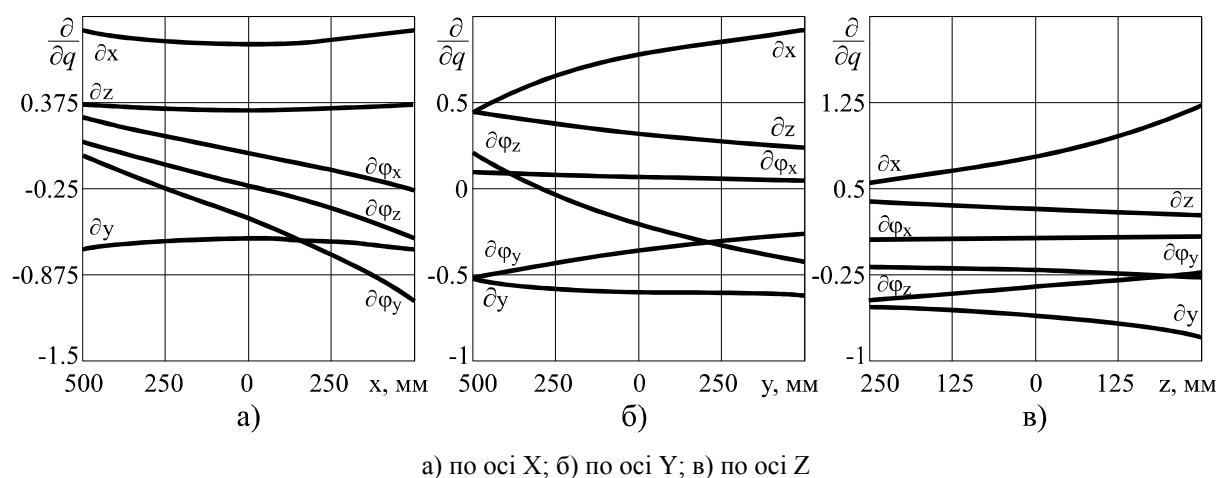


Рисунок 2 – Коефіцієнти чутливості до похибки довжини штанги в залежності від положення рухомої платформи

Оскільки точне безпосереднє вимірювання положень центрів шарнірів ускладнене, їх можна визначити непрямим шляхом за результатами вимірювання відхилень платформи від заданого положення, наприклад шляхом вимірювання встановленої на столі верстата еталонної деталі за допомогою закріпленого у шпинделі високоточного контактного датчика (рис. 3), щуп якого знаходиться на осі шпинделя.

В якості еталонної деталі можна використати паралелепіпед або куб (доступні п'ять плоских поверхонь), циліндр (циліндрична і плоска поверхні), або сферу. У цьому випадку дійсним розміром є відомий розмір еталонної деталі, а вимірним – інформація про поточне положення шпинделя від системи управління верстата.

За координатами точок дотику з урахуванням діаметра кульки щупа обчислюється вимірне значення розміру d_j ($j=1..n$) і його відхилення від відомого розміру d_{0j} еталонної деталі. Вимірний розмір можна виразити як функцію

$$d_j = F(d_{0j}, \mathbf{H}), \quad (6)$$

яка описує залежність виміряного розміру у заданій точці від вектора \mathbf{H} параметрів ідентифікації. Тоді відхилення $\Delta d_j = d_j - d_{0j}$ від відомого розміру у точці вимірювання можна визначити як суму частинних похідних функції F , які визначають вплив кожного з параметрів

$$\Delta d_j = \sum_k \frac{\partial F(d_{0j}, \mathbf{H})}{\partial h_k} \Delta h_k \quad (7)$$

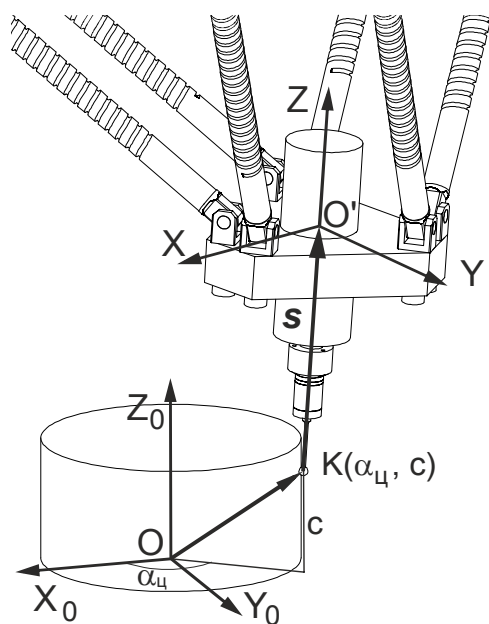


Рисунок 3 – Вимірювання еталонної деталі контактним датчиком

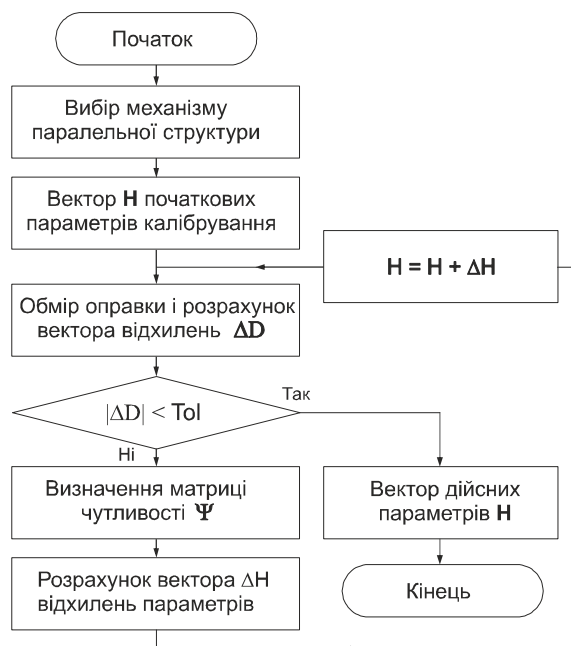


Рисунок 4 – Алгоритм ідентифікації геометричних параметрів

Об'єднавши дані про виміряні відхилення у вектор ΔD з n елементами, можна представити (7) у вигляді

$$\Delta D = \Psi \cdot \Delta H, \quad (8)$$

де Ψ – матриця чутливості, елементи якої являють собою частинні похідні кінематичної функції $\frac{\partial F(d_{0j}, \mathbf{H})}{\partial h_k}$. Використовуючи метод найменших квадратів [8], можна знайти вектор відхилень параметрів ΔH , який мінімізує похибку у рівнянні (8)

$$\Delta H = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \Delta D. \quad (9)$$

За обчисленими величинами відхилень визначаються наближення ідентифікованих параметрів, які вводяться до модуля кінематики верстата, після чого вимірювання відхилень повторюють. При досягненні заданої абсолютної величини вектора виміряних відхилень ΔD процес припиняється (рис. 4).

Компоненти матриці чутливості Ψ , приклад візуалізації елементів якої наведений на рис. 5, визначаються як проекція вектора $\partial X_j / \partial H_i$ відхилення положення платформи внаслідок зміни параметру H_i на нормаль u_j до поверхні еталонної деталі у j -й точці вимірювання. Чутливість у поточній позиції можна оцінити абсолютною величиною вектора, складеного з усіх коефіцієнтів, а загальну чутливість – абсолютною величиною вектора \mathbf{P} , компоненти якого визначаються як $p_k = |\partial \mathbf{X}| / \partial H_k$. Загальна чутливість може збільшуватися у 1,5-2 рази при наближенні платформи до границь робочого простору та нахилі відносно осей координат (рис. 6).

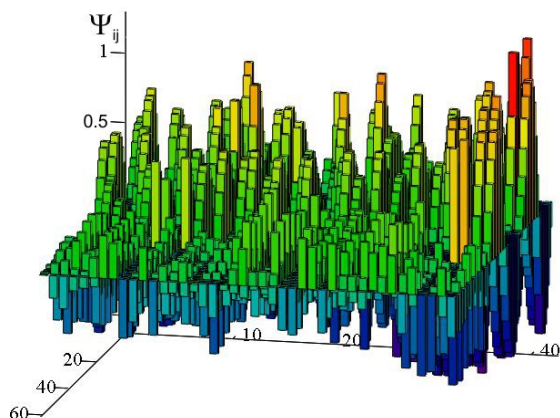


Рисунок 5 – Графічне відображення елементів матриці чутливості

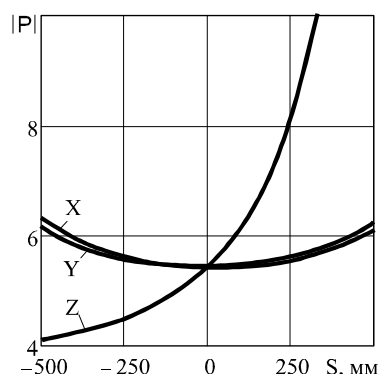
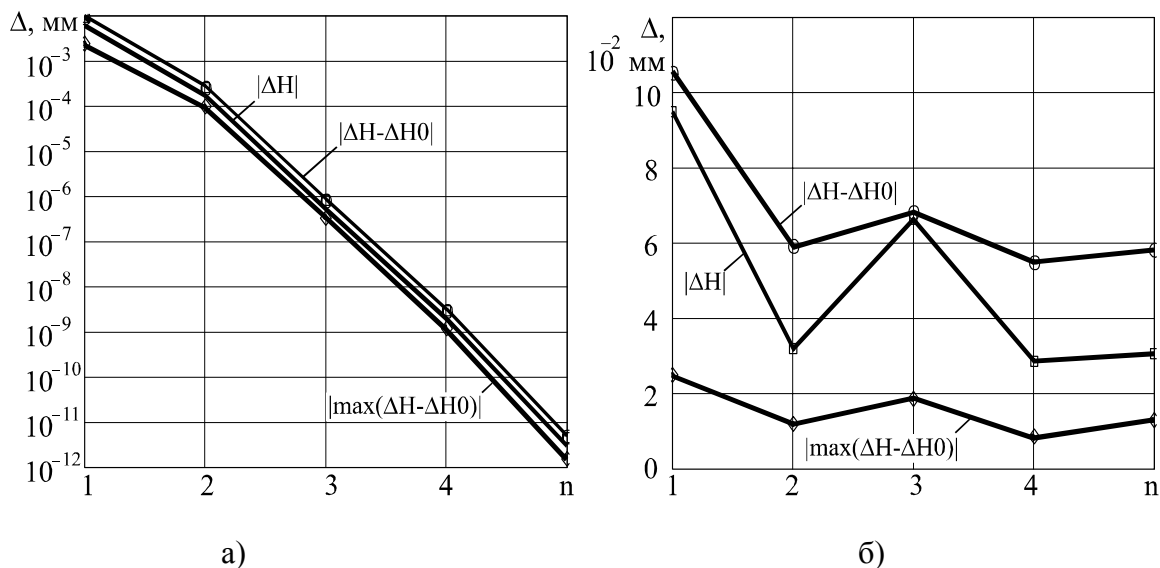


Рисунок 6 – Загальна чутливість в залежності від положення

Чисельне моделювання ідентифікації виконувалося за допомогою пакету Mathcad з використанням ітераційного алгоритму (див. рис. 4). Для зменшення кількості параметрів систему координат основи повернуто так, що вісь Y проходить через центр першого шарніру основи, а систему координат платформи так, щоб вісь координат Y проходила через центр першого шарніру платформи. Таким чином, координати X першого шарніру основи та рухомої платформи стали нульовими і їх виключено з розгляду, що дозволило зменшити кількість параметрів з 42 до 40.

В якості показника похибки ідентифікації прийнято абсолютну величину вектора відхилень параметрів ΔH . В логарифмічних координатах графік збіжності процесу ідентифікації в залежності від номера ітерації (рис. 7, а) наближається до прямої лінії, перша ітерація зменшує похибку на 1,5 порядки, на кожному наступному кроці ітерації похибка зменшується майже на 3 порядки.



а) при відсутності похибок вимірювання, б) при величині похибки 0,05 мм

Рисунок 7 – Зміна абсолютної величини вектора відхилень

Найвні 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. 7, б), при максимальній похибці вимірювання 0,05 мм абсолютна величина вектора відхилень параметрів ідентифікації складає близько 0,5 мм. Для забезпечення збіжності і зменшення похибки ідентифікації необхідно мінімізувати похибку вимірювання у реальному верстаті. Оскільки точність спрацювання контактного датчика достатня (1...2 мкм), слід максимально збільшувати точність еталонної деталі та компонентів верстата – шарнірних опор, кулькогвинтових передач, датчиків зворотного зв'язку приводів.

Експериментальні дослідження проводились на верстаті-гексаподі [9]. При обмірі контактним датчиком (рис.8) еталонної деталі діаметром 270 мм і радіусі кульки вимірювального щупа контактного датчика 2,5 мм номінальний радіус дорівнює 137,5 мм. До ідентифікації середнє квадратичне значення виміряного радіуса 137,02 мм, середньоквадратичне відхилення 0,223 мм, максимальне відхилення 0,357 мм (рис. 9). Після обчислення геометричних параметрів та внесення координат центрів шарнірів і довжини ланок до системи управління верстата середнє квадратичне значення радіуса склало 137,521 мм, середньоквадратичне відхилення 0,062 мм, максимальне відхилення 0,13 мм. Отже, ідентифікація положень центрів шарнірних опор за результатами обміру еталонної деталі контактним датчиком дозволила зменшити відхилення осі шпинделя від заданого положення у 4-5 разів.



Рисунок 8 – Вимірювання оправки на верстаті

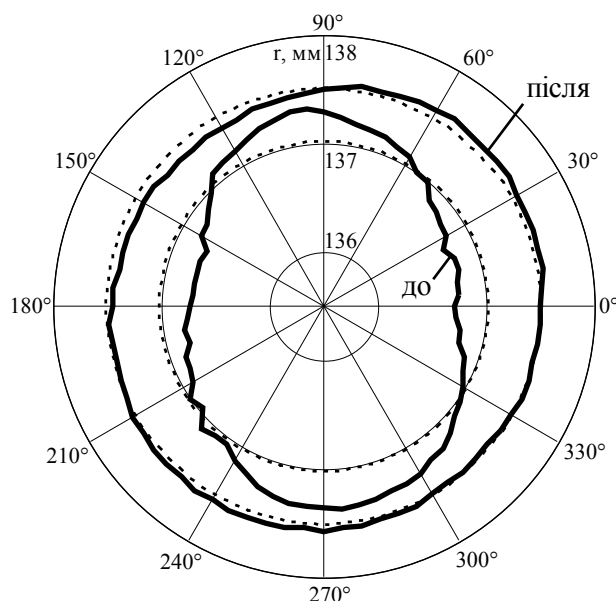


Рисунок 9 – Відхилення при вимірюванні круглої оправки до і після ідентифікації

Висновки:

1. З використанням кінематичних залежностей встановлено вплив похибок положення центрів шарнірних опор на точність положення та орієнтації робочого органа верстата паралельної структури «гексапод».

2. Запропоновано метод підвищення точності шляхом ідентифікації положень центрів шарнірних опор за результатами обміру еталонної деталі вимірювальним контактним датчиком.

3. За результатами моделювання та експериментальних вимірювань на верстаті паралельної структури «гексапод» встановлено, що розроблений метод дозволяє підвищити геометричну точність у 3-5 разів.

Список літератури

1. Merlet J.-P. *Parallel Robots* / J.-P. Merlet. – Springer-Verlag New York Inc., 2006. – 394 p.
2. Besnard, S. Calibration of parallel robots using two inclinometers / S. Besnard, W. Khalil / *Robotics and Automation*. – 1999. – Vol. 3. – P. 1758-1763.
3. 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.
4. Khalil, W. Self calibration of Stewart-Gough parallel robots without extra sensors // W. Khalil, S. Besnard // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1999. – Vol. 15. – P. 1116-1121.
5. 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.
6. Ibaraki, S. Kinematic calibration on a parallel kinematic machine tool of the Stewart platform by circular tests / S. Ibaraki, T. Yokawa, Y. Kakino, M. Nakagawa, T. Matsushita // *Proceedings of the American Control Conference*. – 2004. – Vol.2. – P. 1394-1399.
7. <http://www.renishaw.ru/>.
8. Стренг Г. *Линейная алгебра и ее применения*. – М.: Мир, 1980. – 459 с.
9. 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.

Andrey Kyrychenko

Kirovograd National Technical University

Increasing the geometric accuracy of hexapod

The purpose of article is increasing the geometric accuracy of hexapod parallel manipulator by identifying the joint center positions.

Using hexapod kinematics the influence of joint center position errors upon accuracy of the platform position and orientation is determined. A method is suggested to calculate the joint center positions from results of measurement of reference part with a touch probe. The reference part can be a cylinder, a sphere or a cube. The identification was simulated with random errors introduced to joints center positions, also considering the reference part geometry errors and measurement errors. The method was implemented for CNC hexapod machine tool, where a cylinder shaped reference part was measured with a touch probe mounted in the spindle.

According to the results of numerical simulation and experimental measurements, the method can improve the geometric accuracy of hexapod up to 3-5 times.

accuracy, parallel manipulator, hexapod, identification, contact sensor

Одержано 25.10.13