

УДК 621.01-621.9.06

А. Кириченко, канд. техн. наук

Кіровоградський національний технічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИМІРЮВАННЯ ЖОРСТКОСТІ МОДЕЛІ ГЕКСАПОДА

Резюме. Розроблено модель гексапода і конструкцію вимірювального стенда, запропоновано методику опрацювання результатів вимірювання, що дозволяє визначити вектор узагальненого пружного переміщення платформи гексапода при навантаженні та жорсткість, приведену до точки навантаження. Встановлено залежність приведеної жорсткості від положення рухомої платформи та координат прикладення навантаження.

Ключові слова: механізм паралельної структури, гексапод, пружні переміщення, приведена жорсткість.

A. Kyrychenko

THE EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF HEXAPOD STIFFNESS

The summary. The parallel machine tools stiffness is the most important as to their high accuracy and performance. The hexapods stiffness is considered in the article, as the hexapod is one of the effective machine tools for multiaxis processing.

The objective is to experimentally measure the elastic deformation of hexapod platform under loading by the force, to determine the spatial stiffness depending on the position of the moving platform and loading force, to calculate the reduced stiffness at the loading point.

The simplified hexapod model is developed and manufactured. The model consists of solid base and the moving platform connected to the base with six variable length struts. Each strut consists of two telescopic tubes with collet clamping device to lock its length.

The struts also have the universal joints at both ends. It is possible to change the platform position and orientation arbitrarily within certain range by changing the struts length. Then the platform position can be locked by tightening the collet clamps of each strut. The stiffness of each hexapod strut is measured and its average value is calculated.

The measuring bench is designed to measure the solely displacement of platform caused by the struts deformation and exclude the base deformation. With the manufactured equipment it is possible to apply the force to the platform at an arbitrary direction and angle, to simulate the load on the different height of the platform, from the top or the bottom of the platform. The force is created by the screw tensioner and measured with spring force gage dynamometer. The 6x1 spatial force vector is calculated with the force value and its position within the reference frame.

The platform displacement is measured by six gages placed around the platform in the particular order. The procedure of experimental data analysis is developed to obtain the generalized spatial displacement from the indicators readings and their position around the movable platform.

The 6x1 vector of spatial displacement is obtained for each load and the reduced stiffness is calculated. The relations of elastic deformations from the platform position with the reference to the base and the force position with the reference to the platform are obtained.

It is found that when the distance between the loading force and the platform is increased, the longitudinal displacement of the platform center decreases, but the angular displacement increases. This testifies that the longitudinal displacement at the load point is compensated by the displacement caused by the rotation of the moving platform relatively to the center of stiffness.

The measurements testified that the maximum stiffness is observed when the moving platform approaches the base. The maximum stiffness is observed when the load is applied at 0.05 to 0.1 m from the joints plane. In this case the stiffness approximately equals the strut stiffness.

Key words: parallel manipulator, hexapod, elastic deformation, reduced stiffness.

Постановка проблеми. Сучасна промисловість потребує нових підходів до створення верстатного обладнання для високошвидкісної обробки, одним із найперспективніших серед яких є побудова верстатів на основі механізмів паралельної структури. Такі верстати мають високу енергетичну ефективність та порівняно низьку металомісткість, а їх робочі органи завдяки малій масі можуть досягати високих швидкостей та прискорень. Важливим завданням при розробленні верстатного обладнання з механізмами паралельної структури є досягнення високої жорсткості робочого органа та мінімізації її відхилень у робочому просторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для багатокоординатної обробки є доцільним використання верстатів на основі механізму «гексапод» (платформа Стюарта-Гауфа) з шістьма ступенями вільності робочого органа [1], просторова жорсткість якого проаналізована теоретично у [2, 3]. Результати експериментальних вимірювань жорсткості верстатів-гексаподів наведено у [4, 5], проте з отриманих даних неможливо виключити жорсткість станини та інших вузлів та відокремити інформацію про жорсткість механізму. Розрахунок приведеної жорсткості робочого органа гексапода [6], що має велике значення для визначення положення інструмента відносно рухомої платформи, потребує експериментального підтвердження.

Мета роботи. Експериментальне вимірювання пружних деформацій моделі гексапода при навантаженні силою, визначення просторової жорсткості залежно від положення рухомої платформи та розміщення силового навантаження, визначення приведеної до точки навантаження жорсткості.

Основна частина. Для експериментального вимірювання просторової жорсткості розроблено модель механізму паралельної структури «гексапод» та дослідний стенд (рис. 1). Модель гексапода складається з жорсткої основи 3 діаметром 600 мм, яка за допомогою шести телескопічних розсувних штанг 4 регульованої довжини шарнірно з'єднана з рухомою платформою 9. Подвійні шарнірні опори 2, ідентичні для основи та рухомої платформи, виконані за принципом карданних шарнірів з двома ступенями вільності. В опорах використані підшипники тертя з капролоновими втулками, встановлені з натягом. Кожна зі штанг 4 складається з двох телескопічних труб, які фіксуються за допомогою цангового затиску. Осі шарнірних опор основи нахилені на 45° до площини основи за допомогою кутників, що дозволяє сумістити діапазон кутів повороту опори з необхідним діапазоном положень осей штанг моделі.

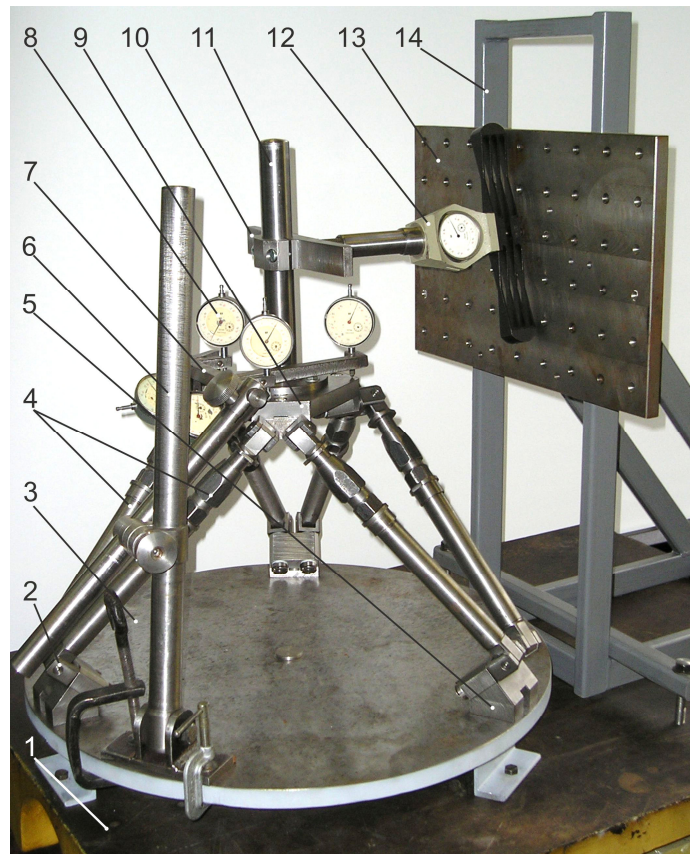


Рисунок 1. Дослідний стенд для вимірювання жорсткості моделі гексапода
Figure 1. Bench for hexapod stiffness measurements

Модель гексапода закріплена на жорсткій нерухомій плиті 1, на якій також встановлено кутник 14 з упорною плитою 13, що має 54 заглиблення з кроком 50 мм для упору навантажувального пристрою 12. На рухомій платформі 9 гексапода закріплено циліндричну оправку 11, на якій встановлено навантажувальну планку 10 з рядом заглиблень для упору навантажувального пристрою 12, у якості якого використано гвинтовий навантажувач, суміщений з динамометром ДОСМ-3-0,5У (максимальне вимірюване зусилля 500 Н). Оскільки планка 10 може рухатися та обертатися навколо осі оправки 11, це дозволяє прикладати силу у площині платформи під довільним кутом відносно осі оправки, імітувати навантаження на різній висоті від платформи, по осі або на відстані від осі, зверху або знизу платформи.

Вимірювальне оснащення являє собою оправку 7 для розміщення шести вимірювальних пристроїв 8, закріплену на основі гексапода за допомогою регульованої стійки 6, яка дозволяє змінювати положення та орієнтацію оправки відповідно до положення платформи. У якості вимірювальних пристроїв 8 використано індикатори годинникового типу ИЧ-10 з ціною поділки 0,01 мм. Завдяки розміщенню індикаторів переміщень на жорсткій основі гексапода стенд дозволяє виключити з вимірювання усі пружні переміщення, окрім власне деформацій штанг механізму паралельної структури.

Для визначення компонентів вектора узагальненого переміщення платформи – переміщень δ_x , δ_y , δ_z та кутів повороту φ_x , φ_y , φ_z необхідно виміряти відхилення δ_1 – δ_6 у шести точках рухомої платформи за допомогою індикаторів, відповідним

чином розташованих відносно платформи (рис. 2). Тоді вектор узагальненого переміщення рухомої платформи гексапода можна визначити [7]

$$\Delta = M^{-1} \cdot \mathbf{d}, \quad (1)$$

де M – матриця 6×6 передатних коефіцієнтів

$$M = \begin{pmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & m_{x1} & m_{y1} & m_{z1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & m_{x2} & m_{y2} & m_{z2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{x6} & a_{y6} & a_{z6} & m_{x6} & m_{y6} & m_{z6} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

a_{xk}, a_{yk}, a_{zk} – координати невласного вектору напрямку зсуву; $m_x = ya_x - za_y$; $m_y = za_x - xa_z$; $m_z = xa_y - ya_x$ – координати моменту вектора відносно осей координат; \mathbf{d} – вектор шостого порядку вимірних відхилень; $\Delta = (\delta_x, \delta_y, \delta_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)^T$ – вектор 6×1 узагальненого переміщення.

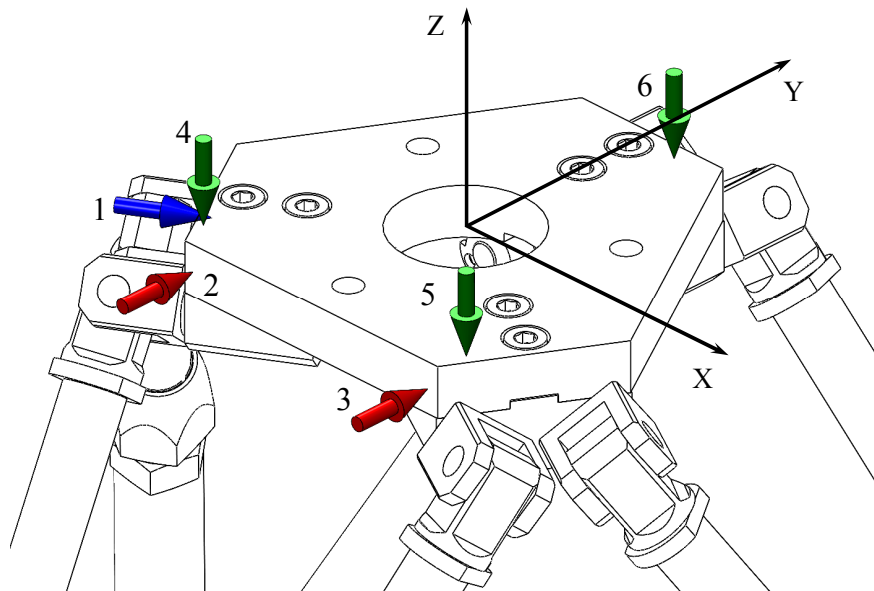


Рисунок 2. Розміщення вимірювальних індикаторів відносно рухомої платформи
Figure 2. Indicators position around the movable platform

За необхідності приведені до точки навантаження переміщення платформи можна визначити за формулою [8]

$$\delta_0 = \mathbf{N}_0^T \Delta, \quad (17)$$

де \mathbf{N}_0 – нормалізований вектор плюкерових координат лінії дії навантаження в системі координат рухомої платформи.

Відповідно приведена жорсткість у точці навантаження складатиме

$$k_{np} = \frac{F_0}{\delta_0},$$

де F_0 – величина прикладеної сили.

Для визначення жорсткості окремих штанг з шарнірами проведено навантаження силою 500 Н по 5 разів для кожної штанги, результати вимірювання переміщень усереднювалися. Жорсткість штанг наведена у табл. 1.

Таблиця 1. Жорсткість окремих штанг гексапода

№ штанги	1	2	3	4	5	6
Жорсткість, 10^6 Н/м	6,2	5,9	5,7	5,3	6,1	5,8

Проведене вимірювання пружних переміщень центру платформи при навантаженні у напрямку осі Y силою від 0 до 500 Н, розміщеною максимально близько до платформи. Характер залежності пружного переміщення рухомої платформи моделі гексапода від величини прикладеного навантаження (рис. 3) дозволяє говорити про практичну відсутність проміжків у шарнірних опорах штанг, виконаних у вигляді капролонових втулок з натягом.

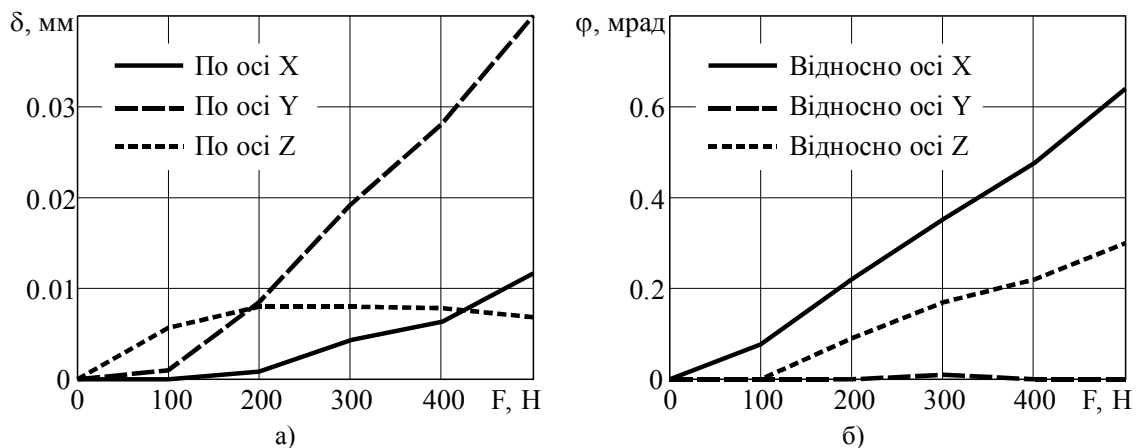


Рисунок 3. Залежність від величини прикладеного навантаження:

а) переміщення центру платформи; б) повороту платформи

Figure 3. Dependence on the applied force:

а) displacement of the platform center, б) platform rotation

Визначені пружні переміщення центру платформи при навантаженні силою 500 Н у різних положеннях відносно платформи гексапода (рис. 4). Зі збільшенням відстані навантаження до платформи поступальне переміщення центру платформи зменшується, а кут повороту зростає, що свідчить про компенсацію поступальних переміщень у напрямку навантаження переміщеннями, викликаними поворотом рухомої платформи відносно центру жорсткості.

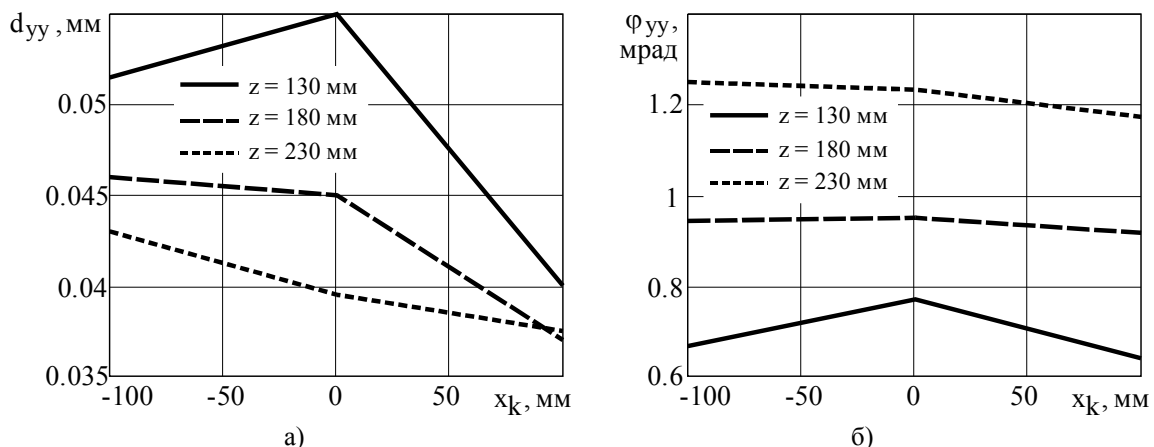


Рисунок 4. Жорсткість по осі Y залежно від координат прикладення сили по осі X:

а) поступальна, б) крутильна

Figure 4. Stiffness on Y axis depending on X force coordinate:
a) translational, б) torsional

Для визначення впливу точки прикладення сили на приведену жорсткість проведено навантаження платформи гексапода силою у напрямку осі Y, прикладеною на різній висоті z відносно площини центрів розміщення шарнірів платформи. Виміряні вектори пружного переміщення центру платформи перераховані на переміщення у місці прикладення сили і розрахована відповідна приведена жорсткість $k_{пр}$ (рис. 5).

Аналіз залежностей показує, що максимальна приведена жорсткість спостерігається при навантаженні із зовнішнього боку платформи на відстані 0,05...0,1 м від площини розміщення центрів шарнірів. При навантаженні силою на відстані 0,1 м від осі симетрії платформи жорсткість приблизно у 1,5 раза нижча. Можна також помітити, що максимальна приведена жорсткість приблизно дорівнює жорсткості окремої штанги.

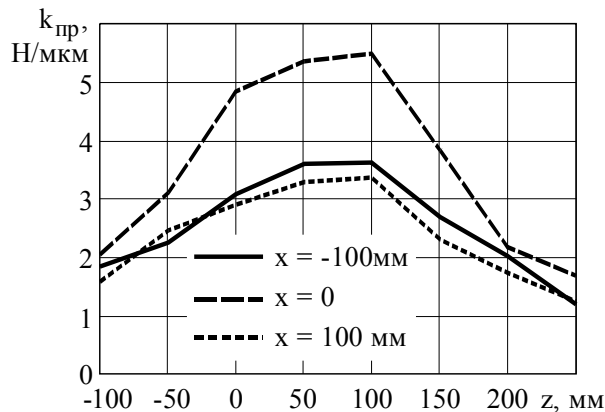


Рисунок 5. Приведена поступальна жорсткість при навантаженні по осі Y залежно від координат прикладення сили по осях X та Z
Figure 5. Reduced translational stiffness for Y load with force X and Z coordinates change

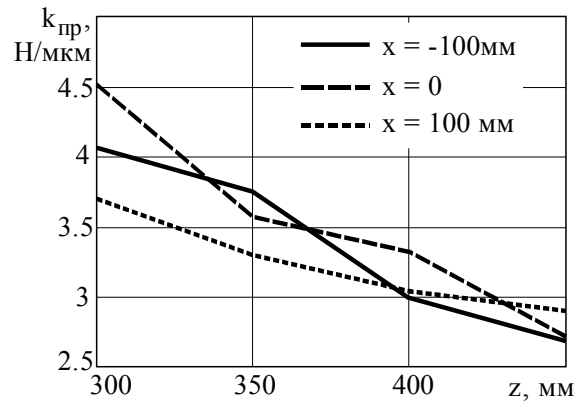


Рисунок 6. Приведена поступальна жорсткість при навантаженні по осі Y залежно від положення рухомої платформи по осях X та Z
Figure 6. Reduced translational stiffness for Y load with platform X and Z coordinates change

Проведено серію дослідів з визначення жорсткості при різних положеннях рухомої платформи гексапода відносно основи. Встановлено, що при збільшенні координати z центру рухомої платформи та при зміщенні його по осі X приведена жорсткість знижується (рис. 6).

Висновки. Розроблено модель гексапода і конструкцію вимірювального станда, що дозволяє виміряти лише переміщення рухомої платформи, викликані деформацією штанг гексапода.

Запропоновано методику опрацювання результатів вимірювання, що дозволяє визначити вектор узагальненого пружного переміщення платформи гексапода при навантаженні та жорсткість, приведену до точки навантаження.

Встановлено, що максимальна приведена жорсткість спостерігається при найменшій відстані між рухомою платформою та основою, у випадку навантаження силою на відстані 0,05...0,1 м від площини розміщення центрів шарнірів, і приблизно дорівнює жорсткості окремої штанги.

Conclusion. The hexapod model is developed and the measuring bench is designed to measure only the displacement of platform caused by the struts deformation.

The procedure of experimental data analysis is developed to obtain the generalized spatial displacement and the reduced stiffness. The relations of elastic deformations from the platform and force position are obtained.

It is found that the maximum stiffness is observed when the moving platform is close to the base. The maximum stiffness is observed when the load is applied at 0.05 ... 0.1 m from the joints plane. In this case the stiffness is approximately equal to a strut stiffness.

Список використаної літератури

1. Merlet, J.P. Parallel Robots [Text] / J.P. Merlet. – Springer, 2006. – 394 p.
2. Gosselin, C. Stiffness Mapping for Parallel Manipulators [Text] / C. Gosselin // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1990. – V.6, No.3. – P. 377–382.
3. Струтинський, В.Б. Теоретичний аналіз жорсткості шестикоординатного механізму паралельної структури [Текст] / В.Б. Струтинський, А.М. Кириченко // Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Серія „Машинобудування”. – 2009. – №57. – С. 198–207.
4. Clinton, C. Stiffness Modeling of a Stewart Platform based Milling Machine [Text] / C.M. Clinton, G. Zhang, A.J. Wavering // Transactions of the North America Manufacturing Research Institution of SME. – 1997. – Vol. XXV. – P. 335–340.
5. Результаты экспериментальных исследований механизма параллельной структуры на примере станка «Гексамех-1» [Текст] / Н.А. Серков, И.В. Вайнштейн, А.А. Мерзляков, Р.О. Сироткин // Вестник научно-технического развития. – 2008. – № 5 (9). – С. 67–88.
6. Кириченко, А.М. Приведення до зони обробки жорсткості та податливості обладнання з механізмами паралельної структури [Текст] / А.М. Кириченко // Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Серія „Машинобудування”. – 2010. – №59. – С. 205–210.
7. Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков [Текст] / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
8. Струтинський, В.Б. Математичний апарат векторів шостого порядку для розрахунків жорсткості просторових механізмів паралельної структури [Текст] / В.Б. Струтинський, А.М. Кириченко // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – 2010. – №2. – С. 142–154.

Отримано 07.11.2011