

УДК 62-231:621.9.04

А. М. КИРИЧЕНКО, О. В. ШЕЛЕПКО
Кіровоградський національний технічний університет**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ШАРНІРІВ
РОБОЧОГО ОРГАНА БАГАТОКООРДИНАТНОГО ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ
СТРУКТУРИ «ПЕНТАПОД»**

У роботі розглянуто основні типи багатокоординатних верстатів паралельної структури та можливості орієнтації їх робочого органу відносно системи координат. Визначено жорсткість шарнірних опор робочого органу верстата «пентапод» під дією радіального та осевого навантаження, виявлені основні фактори, які впливають на її величину.

Ключові слова: верстат паралельної структури, пентапод, ланка змінної довжини, жорсткість, робочий орган.

А. Н. КИРИЧЕНКО, О. В. ШЕЛЕПКО
Кировоградский национальный технический университет**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИСЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ ШАРНИРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА
МНОГОКООРДИНАТНОГО СТАНКА ПАРАЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ «ПЕНТАПОД»**

В работе рассмотрены основные типы многокоординатных станков параллельной структуры и возможности поворота их рабочего органа относительно системы координат. Определена жесткость шарнирных опор рабочего органа станка «пентапод» под действием радиальной и осевой нагрузки, выявлены основные факторы, влияющие на ее величину.

Ключевые слова: станок параллельной структуры, пентапод, штанга переменной длины, жесткость, рабочий орган.

A.N. KYRYCHENKO, O. V. SHELEPKO
Kirovograd National Technical University**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STIFFNESS OF ACTUATOR JOINTS OF PENTAPOD
PARALLEL KINEMATICS MACHINE**

In this paper, the basic types of multi-axis parallel kinematics machine tools and the orientational capability of their effectors. The stiffness of joints of manufactured actuator is determined under radial and axial loads, the key factors influencing the stiffness are investigated.

Keywords: parallel kinematic machines, pentapod, variable length link, stiffness, actuator.

Постановка проблеми

Розвиток сучасного машинобудування неможливий без впровадження передового технологічного обладнання, до якого можна віднести багатокоординатні верстати паралельної структури. За рахунок їх використання стає можливим підвищення показників продуктивності та гнучкості виробництва, оскільки дане обладнання забезпечує високу швидкість переміщення (до 120 м/хв) і прискорення (до 50 м/с²), завдяки переміщенню малих мас. Дані верстати також характеризуються високою жорсткістю конструкції, за рахунок чого забезпечується висока точність обробки деталей складного профілю та мають здатність комбінування на одному верстаті різних методів обробки (фрезерування, лазерної та токарної).

Серед верстатів паралельної структури для багатокоординатної обробки широкого використання набули верстати «гексаподи» з шістьма штангами змінної довжини [1]. Основним недоліком таких верстатів є невеликі кути повороту робочого органу (до 30°) та необхідність шести приводів для здійснення п'ятикоординатної обробки. Позбавлені цих недоліків п'ятикоординатні верстати паралельної структури «пентапод» (рис. 1), які мають великі кути повороту робочого органу (більше 90°) і використовують для здійснення багатокоординатної обробки п'ять приводів, що здешевлює виготовлення і експлуатацію (економія електроенергії) верстатів даного типу.

Верстати паралельної структури «пентапод» фірми «Metrom» (Німеччина) [2] використовуються для обробки роторів і кілець електростанцій, траверс (матеріал обробки - сталь), відрізних інструментів, фрез (високолегована загартована сталь), різноманітні деталі для авіабудування (композиційні матеріали з волокном CFK) та інші.



Рис. 1. Верстат «пентапод» фірми Metrom (Німеччина)

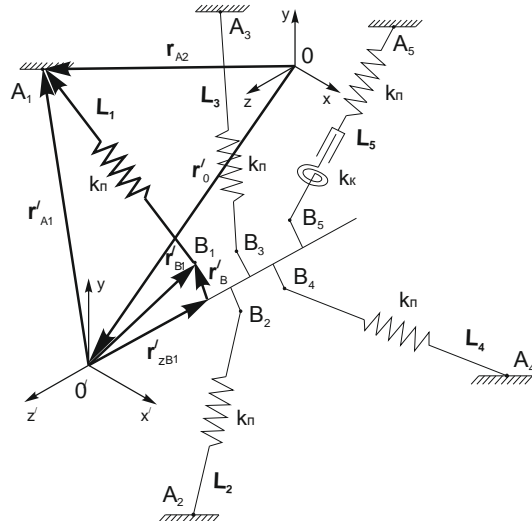


Рис. 2. Розрахункова схема верстата «пентапод» для визначення кінематики і жорсткості

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одною з найважливіших характеристик верстатів є жорсткість, що визначає точність обробки, якість обробленої поверхні та динамічні характеристики обладнання [3]. Розрахункова схема верстата «пентапод» для визначення жорсткості зображена на рис. 2 [4]. Центри шарнірів основи розміщені в точках A_i , центри шарнірів рухомої платформи (робочого органа) – в точках B_i .

Матриця просторової жорсткості верстата паралельної структури включає величини жорсткості компонентів верстата, зокрема шарнірних опор і робочого органа.

Загальна матриця жорсткості для просторового механізму паралельної структури типу «пентапод» визначається наступним чином [4]:

$$K = \sum_{i=5}^n k_n \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ r_B \times n_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ r_B \times n_i \end{bmatrix}^T + k_k \cdot \begin{bmatrix} n_5 \\ r_B \times n_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_5 \\ r_B \times n_5 \end{bmatrix}^T, \tag{1}$$

де n_i - одиничний вектор осі штанги:

$$n_i = \frac{\begin{pmatrix} R \cdot \left(z_{B_i} - \frac{(z_{A_i} - z_{B_i}) \cdot r_B}{\sqrt{x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2 - r_B}} \right) + r_0 - r_{A_i} \\ \left(R \cdot \left(z_{B_i} - \frac{(z_{A_i} - z_{B_i}) \cdot r_B}{\sqrt{x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2 - r_B}} \right) + r_0 - r_{A_i} \right) \end{pmatrix}}{\left| \begin{pmatrix} R \cdot \left(z_{B_i} - \frac{(z_{A_i} - z_{B_i}) \cdot r_B}{\sqrt{x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2 - r_B}} \right) + r_0 - r_{A_i} \\ \left(R \cdot \left(z_{B_i} - \frac{(z_{A_i} - z_{B_i}) \cdot r_B}{\sqrt{x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2 - r_B}} \right) + r_0 - r_{A_i} \right) \end{pmatrix} \right|}, \tag{2}$$

де R – матриця повороту системи координат робочого органа відносно системи координат основи; $x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}$ - координати точки A_i ; z_{B_i} - координати точки B_i ; r_B – радіус-вектор точки B_i в абсолютній системі координат основи. r_0 - радіус-вектор початку координат робочого органа в системі координат основи; r_{A_i} – радіус-вектор точки A_i в абсолютній системі координат основи.

Дослідження кінематики верстата «пентапод» приведені у роботах [5, 6]. Експериментальні вимірювання жорсткості багатокоординатних верстатів паралельної структури наведено у [7], а приведення до зони обробки жорсткості розглянуто у [8].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є визначення пружних деформацій шарнірних опор робочого органа внаслідок силового навантаження та встановлення основних факторів, які впливають на величину жорсткості опор.

Викладення основного матеріалу дослідження

На основі спроектованої схеми робочого органа багатокоординатного верстата паралельної структури «пентапод» (рис. 3) було виготовлено модель робочого органа (рис. 4). Він складається з

мотор-шпинделя 1 потужністю 2,2 кВт та п'яти шарнірів 2 із радіально-упорними підшипниками 3, спільна вісь яких співпадає з віссю шпинделя. Для сприйняття осьового навантаження між шарнірами розміщені упорні роликові підшипники 4.

Зміна орієнтації робочого органа у просторі відбувається при зміні положення шарнірів 2 завдяки радіально-упорним підшипникам 3, які здійснюють одночасний рух відносно корпуса шарніра 2 і шпинделя робочого органа 1.

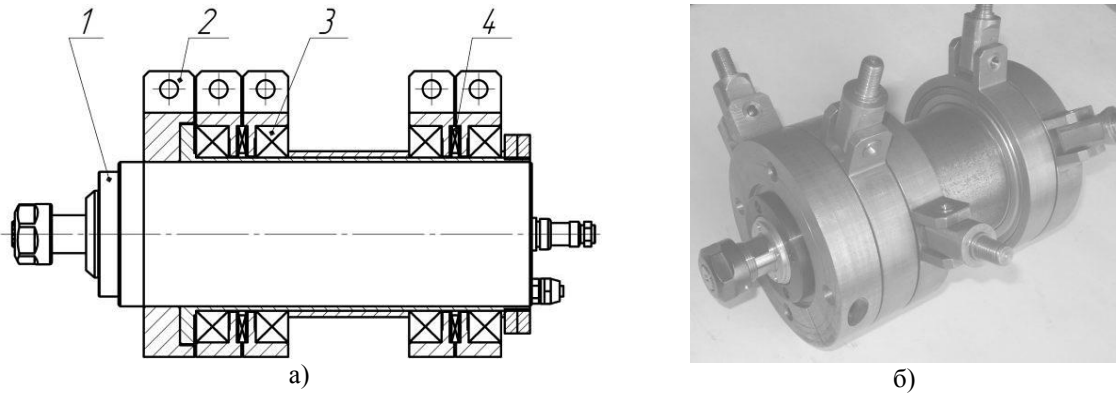


Рис. 3. Робочий орган батокординатного верстата «пентапод»: а) конструкція, б) загальний вигляд

Вимірювання осьових переміщень у шарнірах (рис. 5) виконувалось на столі фрезерного верстата. Робочий орган 1 та стійка 3 з вимірювальним індикатором 4 нерухомо закріплені на столі 5. Навантажувальна планка 6 безпосередньо закріплюється на вилці 7 шарнірів 2. Навантаження створювалось за допомогою переміщення шпинделя верстата, зусилля контролювалось за допомогою динамометра 8. У якості вимірювального пристрою 4 використано індикатор Mitutoyo 513 з ціною поділки 0,002 мм.

Графік залежності осьових переміщення шарнірів робочого органа від величини прикладеного навантаження (рис. 6) показує, що максимальне переміщення спостерігається у шарнірі 3, а мінімальне – у шарнірі 1.

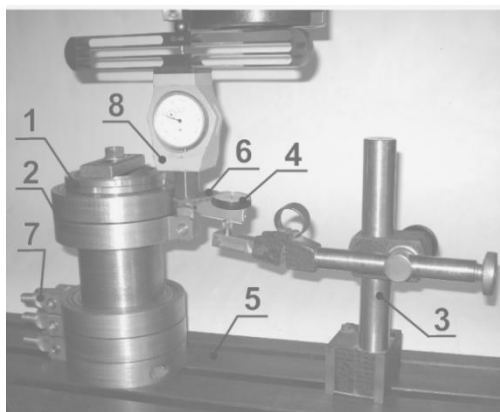


Рис. 5. Дослідний стенд для вимірювання жорсткості шарнірів робочого органа

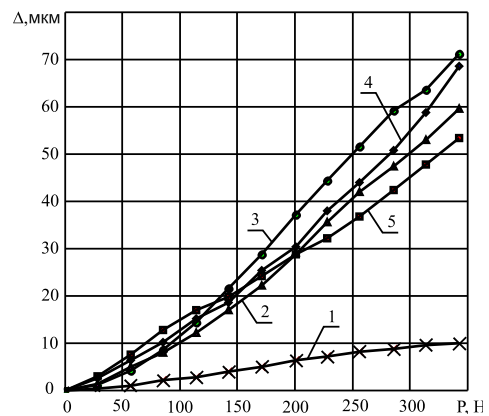


Рис. 6. Залежності осьового переміщення шарнірів робочого органа від навантаження (1-5 – номер шарніра)

Вимірювання радіальних переміщень (рис. 7) виконувалось аналогічно вимірюванню осьових переміщень. Графік залежності радіального переміщення шарнірів робочого органа від величини прикладеного навантаження (рис. 8) показує, що максимальне переміщення спостерігається у шарнірі 1, а мінімальне – у шарнірі 3.

Робочий орган використано у спроектованому та виготовленому на кафедрі «Металорізальні верстата та системи» ХНТУ п'ятикоординатному верстаті паралельної структури «пентапод» (рис. 9), що дасть змогу виконати подальші дослідження та перевірити результати теоретичних розрахунків.

Верстат «пентапод» складається з основи, на якій розміщено п'ять карданних підвісів з штангами змінної довжини. Іншим кінцем кожна штанга прикріплена до робочого органа через шарніри таким чином, що вісь кожної штанги проходить через вісь робочого органа.

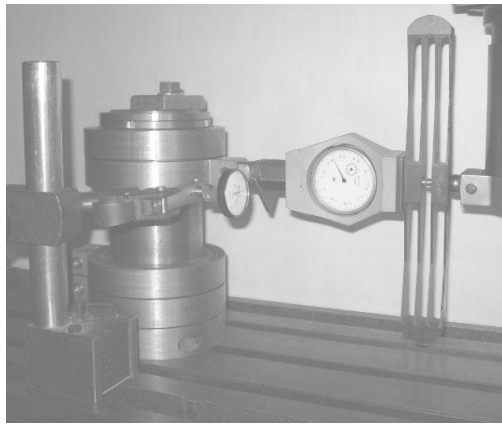


Рис. 7. Дослідний стенд для вимірювання жорсткості шарнірів робочого органа

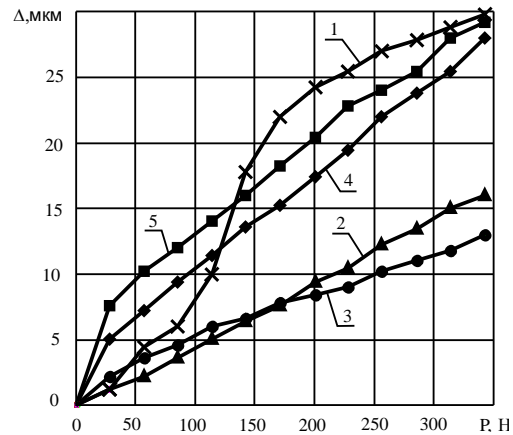
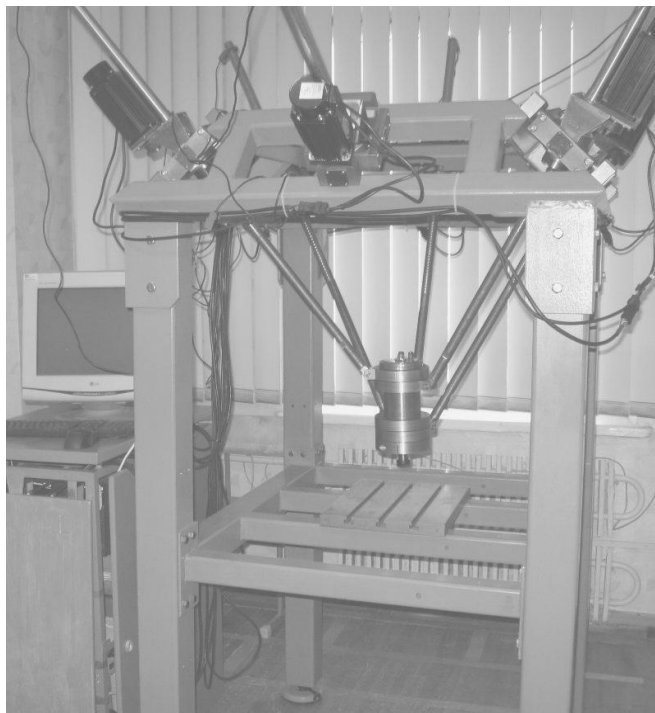
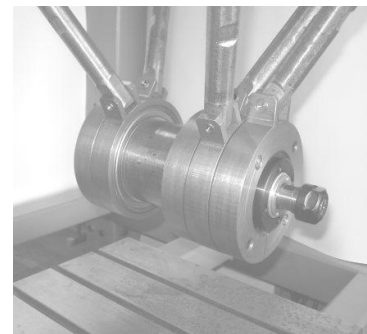


Рис. 8. Залежності радіального переміщення шарнірів робочого органа від навантаження (1-5 – номер шарніра)

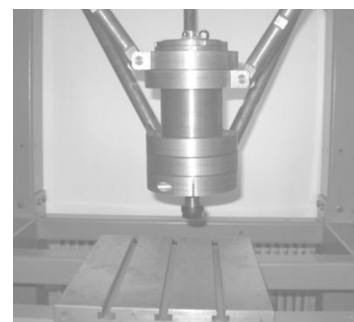
Характерною особливістю верстата є здатність робочого органа повертатися на кут більше 90° відносно одної з осей, що дає змогу здійснювати обробку деталей при розміщенні робочого органа як у горизонтальному (рис. 9, б), так і у вертикальному положенні (рис. 9, в), що значно збільшує сферу застосування верстата.



а)



б)



в)

Рис. 9. Багатокоординатний верстат паралельної структури «пентапод»: а) загальний вигляд; б, в) положення робочого органа

Управління верстатом здійснюється від системи ЧПУ LinuxCNC. Для виконання заданої траєкторії робочого органа виконується узгоджене переміщення п'яти штанг змінної довжини за рахунок подачі відповідних сигналів, розрахованих на основі кінематичних залежностей механізму, на серводвигуни потужністю 1 кВт.

Висновки

1. Експериментальні вимірювання показали, що жорсткість шарнірів при осьовому навантаженні з підшипниками дорівнює 5...6 Н/мкм, тоді як жорсткість шарніру без підшипника – 35 Н/мкм. Таким чином, осьова жорсткість шарнірів робочого органа запропонованої конструкції в основному визначається жорсткістю радіально-упорних підшипників. Жорсткість шарнірів при радіальному навантаженні з підшипниками коливається в межах 12...26 Н/мкм, а жорсткість шарніру без підшипника

– 11 Н/мкм. Таким чином, радіальна жорсткість шарнірів робочого органа в основному визначається жорсткістю з'єднання вилки з шарніром.

2. Для подальших досліджень розроблено конструкцію п'ятикоординатного верстата паралельної структури «пентапод» з системою ЧПУ. Хоча робочий орган верстата може повертатися на кут більше 90° відносно одної з осей, поворот відносно іншої осі знаходиться у межах $\pm 30^\circ$, тому для забезпечення обробки складних деталей з усіх боків слід встановити поворотний стіл.

Список використаної літератури

1. Merlet J.-P. Parallel Robots. – Springer-Verlag New York Inc., 2006. – 394 p.
2. Metrom mechatronische maschinen [Електронний ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.metrom.com>.
3. Кириченко А.М. Матриця жорсткості просторових механізмів паралельної структури з пружними ланками / А.М. Кириченко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / Вип. 40, ч. I – Кіровоград: КНТУ, 2010. - С. 256-262.
4. Кириченко А.М. Просторова жорсткість верстата з механізмом паралельної структури «пентапод» / А.М. Кириченко, О.В. Шелепко, М.І. Черновол // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Вип. 42, ч. II. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 187-190.
5. Bär G. F. Kinematic Analysis of a Pentapod Robot / Gert F. Bär, Gunter Weiß // Journal for Geometry and Graphics 10 (2006). – No. 2. – P. 173-182.
6. Кириченко А.М. Кінематика п'ятикоординатного верстата з паралельною структурою / А.М. Кириченко, О.В. Шелепко, С.П. Сапон // Вісник ЧДТУ. Серія ТН. – Чернігів, 2013. – № 67 (3). – С. 100-104.
7. Струтинський В. Б. Експериментальне визначення матриці жорсткості моделі гексапода / В. Б. Струтинський, А. М. Кириченко // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – Вип. 40, ч. I. – С. 133-141.
8. Кириченко А.М. Приведення до зони обробки жорсткості та податливості обладнання з механізмами паралельної структури / А.М. Кириченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». – 2010. – № 59. – С. 205-210.