

## Експериментальне вимірювання пружних переміщень виконавчого органа верстата-гексапода

Наведено методику та результати вимірювання пружних переміщень виконавчого органа верстата-гексапода під навантаженням на основі розробленої фізичної моделі. Встановлені співвідношення переміщень по осям координат та їх залежність від положення робочого органа.

**верстат-гексапод, навантаження, пружні переміщення**

### Вступ

Глобалізація економіки та постійне зростання конкурентної боротьби за ринки збуту продукції обумовило розвиток та випуск в Україні багатоміністерної машинобудівної продукції на рівні світових аналогів, що вимагає від виробників створення гнучких виробничих систем, які мають властивість оперативно адаптуватися до нових умов виробництва.

Основним напрямком автоматизації гнучкого багатоміністерного виробництва, який задовольняє вимогам сучасної технології виробництва, є створення швидкопереналагоджуваного технологічного обладнання, побудованого на основі механізмів паралельної структури.

За три останні десятиріччя запропоновано понад 100 різноманітних моделей технологічного обладнання з паралельною кінематикою, значну частину яких складають верстати-гексаподи [1], які реалізують формоутворюючі рухи виконавчого органа під час обробки поверхонь деталей за рахунок зміни довжини шести кінематичних ланок. Ефективність впровадження верстатів-гексаподів у виробництво обмежується відсутністю на теренах України інформації щодо функціональних можливостей, технічних характеристик, методів та принципів проектування, а також реальних явищ, які відбуваються у процесі їх функціонування.

### Постановка задачі

На кафедрі "Металорізальні верстати та системи" проведені дослідження впливу конструктивних параметрів верстатів-гексаподів на параметри робочого простору [2], але недослідженим залишається питання впливу навантаження силами різання на пружні переміщення виконавчого органа. Теоретичні дослідження, проведені зарубіжними вченими [3, 4], показали високу складність аналітичного розрахунку жорсткості і пружних переміщень механізмів паралельної структури, тому метою даної роботи є експериментальна оцінка пружних переміщень виконавчого органа верстата-гексапода у робочому просторі.

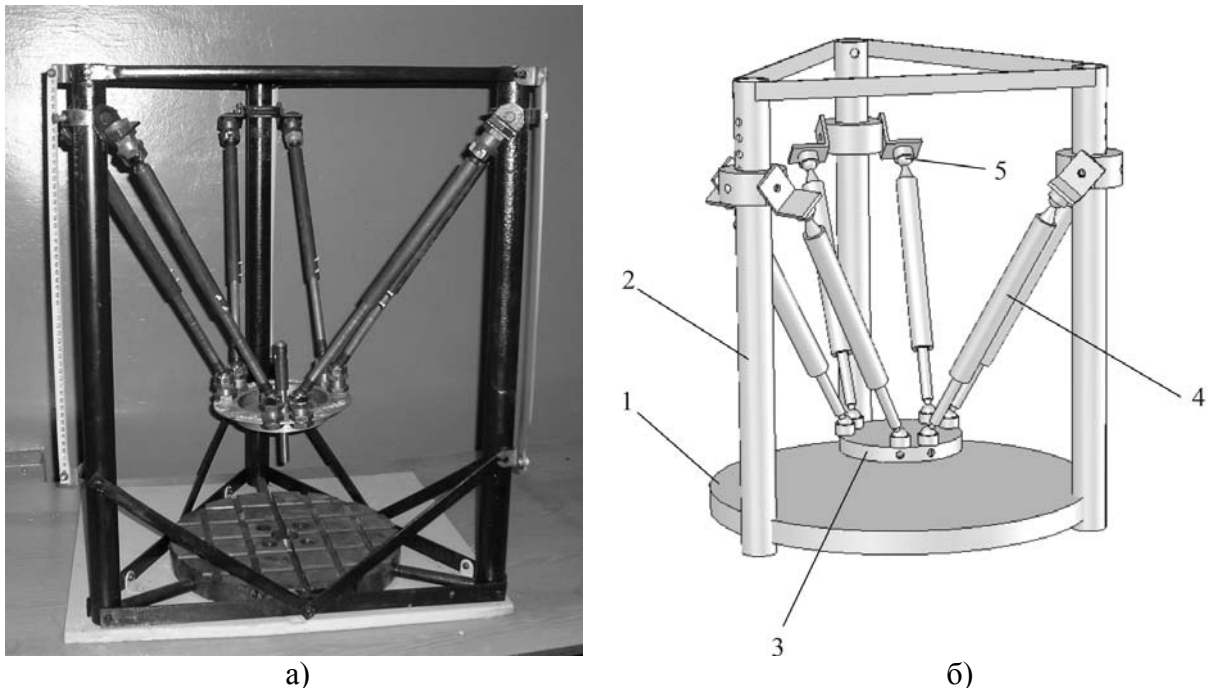
Кожна точка робочого простору характеризується змінними значеннями пружних деформацій складових елементів верстатної системи, жорсткістю просторової конструкції та похибками положення виконавчого органа. Подібні явища обумовлюються постійною зміною довжини кінематичних ланок та їх розташуванням у просторі залежно від поточного положення виконавчого органа. Складну конфігурацію робочого простору верстата-гексапода доцільно розділяти як „робоче поле”, що

характеризується певною множиною скалярних та векторних полів відповідних характеристик, які є функціями координат.

Враховуючи, що сила різання  $P$  є тривимірним вектором  $P = P_x i + P_y j + P_z k$ , то напрямком вектора сили  $P$  визначається відношенням  $P_x : P_y : P_z$  та знаками одиничних векторів  $i, j, k$  і залежить від напрямків формуючих рухів виконавчого органа.

Під час обробки фасонної поверхні напрямком вектора сили  $P$  може бути різним у межах робочого простору верстата-гексапода. У такому випадку встановити переважний напрямком вектора сили  $P$  досить складно, тому доцільним буде визначити переміщення виконавчого органа окремо від поля навантаження  $P_x$ ,  $P_y$  та  $P_z$ , враховуючи їх незалежну дію. Таким чином, слід виконати експериментальні дослідження впливу навантаження на пружні переміщення виконавчого органа лише силами  $P_z$ , що не вплине на результати досліджень, але дозволить коректно визначити загальну залежність переміщень виконавчого органа від навантаження.

Експериментальні дослідження впливу навантаження на пружні переміщення виконавчого органа виконувалися на виготовленій фізичній моделі верстата-гексапода (рис. 1). Несуча система фізичної моделі реалізована у вигляді трикутної просторово-стрижневої ферми, вертикальні стрижні якої мають також функцію напрямних 2, вздовж яких переміщуються втулки з кронштейнами з вмонтованими двома опорними сферичними шарнірами 5 кінематичних ланок 4.



а) загальний вигляд; б) компоновочна схема

Рисунок 1 – Фізична модель верстата-гексапода

Кінематичні ланки складаються з нерухомої частини, яка шарнірно зв'язана з несучою системою та рухомої частини, що зв'язана з рухомим виконавчим органом 3. Зміна довжини кінематичних ланок забезпечується зміною координат опорних шарнірів несучої системи шляхом переміщення її вздовж вертикальних напрямних 2, а також переміщенням рухомої частини телескопічної кінематичної ланки, відносно її нерухомої частини, внаслідок чого виконавчий орган 3 має реальну можливість зайняти будь-яке поточне положення у межах робочого простору фізичної моделі.

Під час проведення експериментальних досліджень виконавчий орган дискретно переміщувався вздовж координатних осей  $X$  та  $Y$  послідовно. Відносно осі  $X$  – на  $-0,1$  м;  $-0,05$  м та  $0,005$  м, а після закінчення досліджень виконавчий орган переміщувався вздовж осі  $Y$  на відстань  $-0,05$  м;  $0,005$  м (рис. 2).

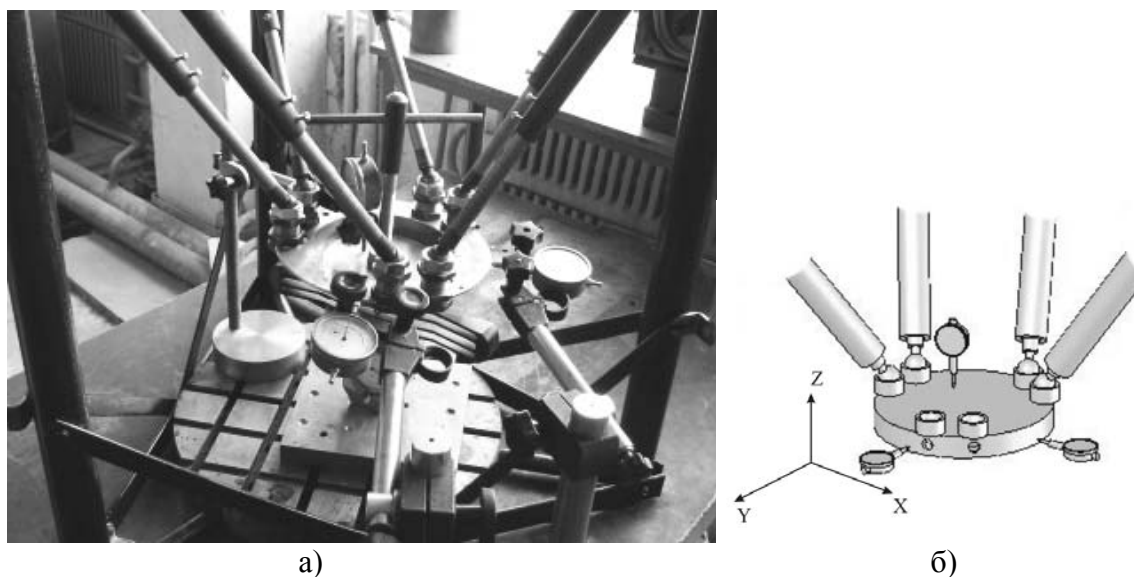
При кожному дискретному положенні виконавчого органа фіксувалися положення опорних шарнірів та задана довжина кінематичних ланок і здійснювалося навантаження системи від  $0$  до  $100$  кг з інтервалом  $20$  кг за допомогою навантажувального пристрою з динамометром.



а) переміщення виконавчого органа відносно осі  $X$ ; б) виконавчий орган розташований у центрі симетрії системи; в) переміщення виконавчого органа відносно осі  $Y$

Рисунок 2 – Схема розташування виконавчого органа та кінематичних ланок у просторі

Вимірювання пружних переміщень виконавчого органа при кожному фіксованому положенні здійснювалося трьома індикаторами, розташованими вздовж координатних осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис. 3).

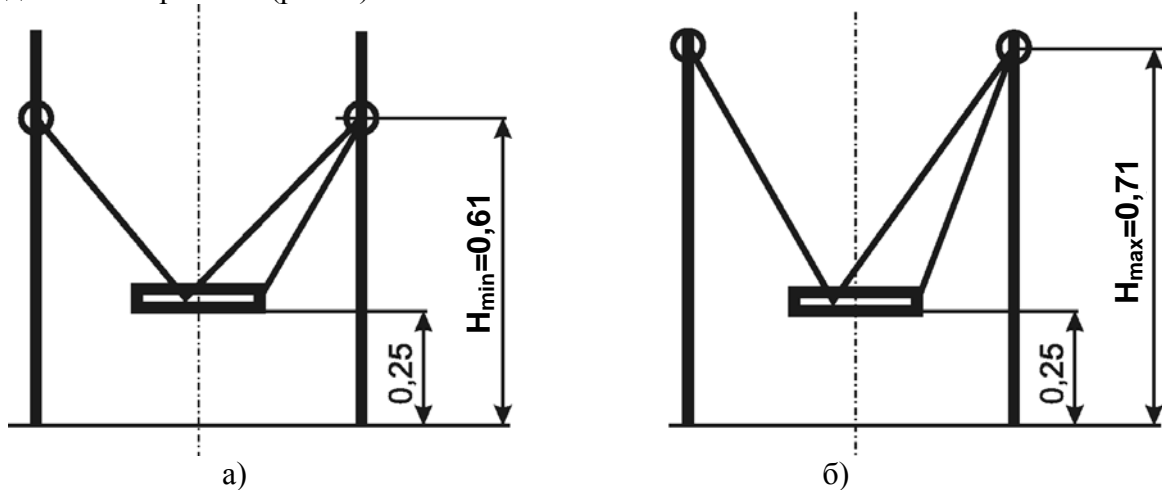


а) загальний вигляд; б) схема

Рисунок 3 – Розташування індикаторів

Навантаження системи здійснювалося гвинтовим пристроєм з динамометром, для розміщення якого необхідно забезпечити гарантовану відстань між виконавчим органом та робочим столом (не менш як  $0,25$  м) при усіх можливих положеннях виконавчого органа.

Задану відстань при зміні довжини кінематичних ланок можна забезпечити зміною координат розташування їх опорних шарнірів у вертикальному напрямку відносно напрямних (рис. 4).



а) при мінімальній висоті; б) при максимальній висоті  
Рисунок 4 – Схема розташування опорних шарнірів кінематичних ланок

Результати досліджень показали, що максимальне зміщення виконавчого органа відносно координатних осей X та Y різне ( $X_{\max}=0,1$ ;  $Y_{\max}=0,05$  м), що обумовлюється обмеженням кута обертання опорних шарнірів кінематичних ланок (не більше  $60^\circ$ ), а також специфічною конфігурацією робочого простору для визначеної компоновочної схеми (рис. 5).

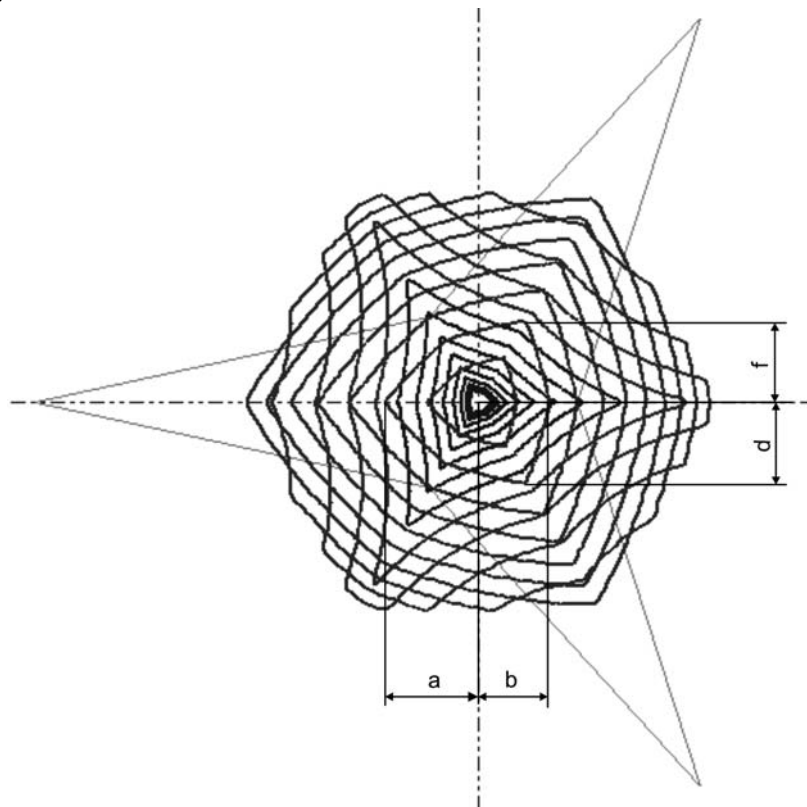


Рисунок 5 – Лінії рівня робочого простору

Результати попередніх досліджень показали, що величина  $a$  переміщення ВО відносно осі  $X$  більша у 1,5-1,7 разів, ніж величина  $b$ , а при переміщенні ВО відносно осі  $Y$  величина  $d$  та  $f$  аналогічні.

Результати досліджень впливу навантаження на пружні переміщення виконавчого органа вздовж координатних осей  $X$  та  $Y$  наведені на рис. 6. Дослідження виконувалися при зміщенні ВО вздовж координатних осей  $X$  та  $Y$  на величину: 1) 50 мм; 2) 0 мм; 3) -50 мм; 4) -100 мм.

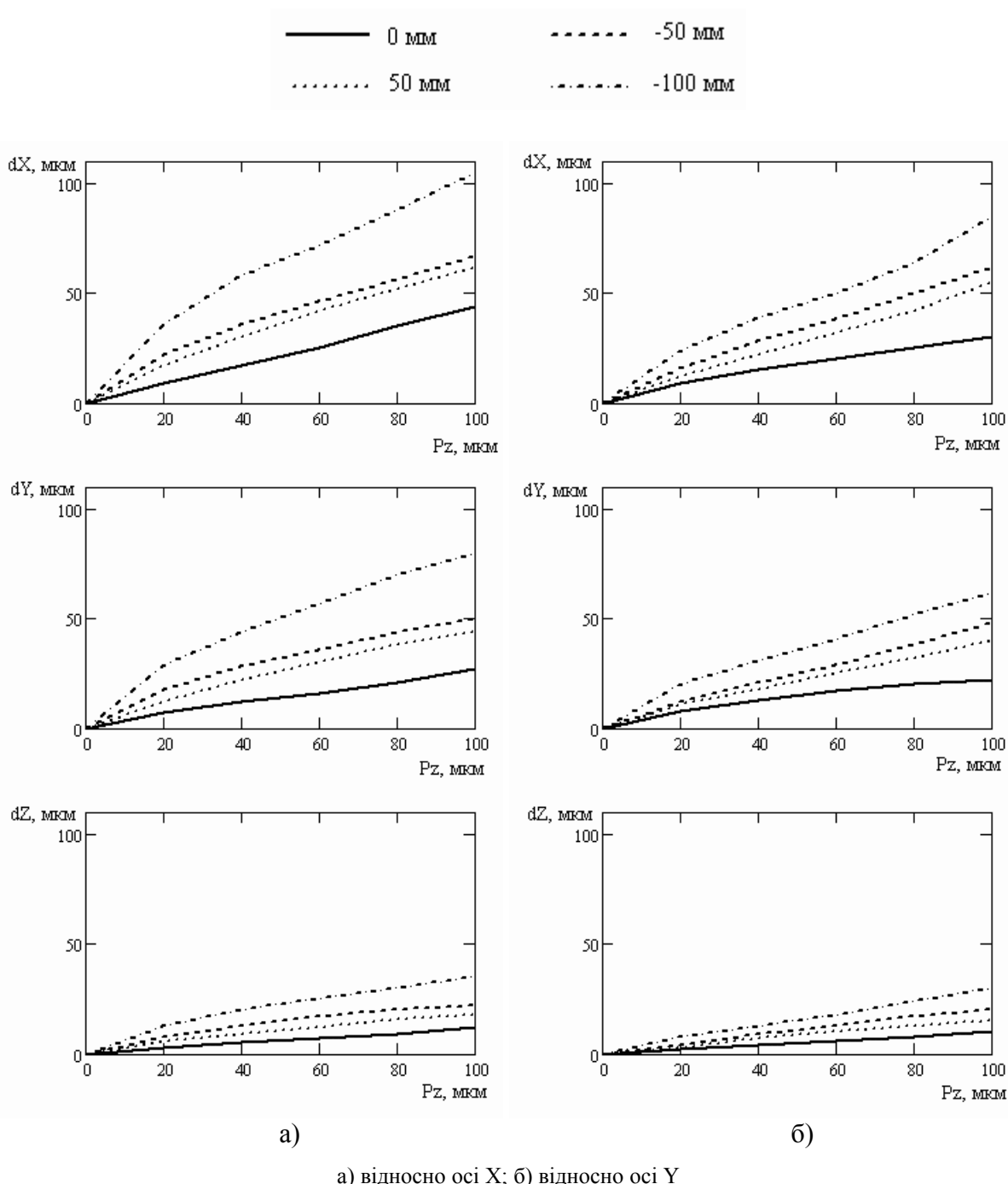


Рисунок 6 – Залежність пружних переміщень від навантаження при зміщенні виконавчого органа

Аналіз результатів досліджень показує, що найменша деформація складових елементів верстата-гексапода спостерігається у центрі симетрії просторової системи (координатна вісь  $Z$ ), а максимальна – на межі робочого простору. Крім того, пружні

переміщення виконавчого органа мають різні значення по осям координат і характеризуються відношенням  $\Delta X:\Delta Y:\Delta Z=3:2,3:1$ .

Порівняльний аналіз наведених залежностей свідчить, що величина деформацій основних елементів просторової системи при навантаженні значно менше при переміщенні виконавчого органа відносно координатної осі Y.

### Висновки і напрямки подальших досліджень

1. Найменші пружні переміщення, а отже найбільша жорсткість виконавчого органа верстата-гексапода досягається при розміщенні деталей у центрі симетрії просторової системи (по осі Z);

2. Деформація основних елементів верстата-гексапода при навантаженні збільшується при розташуванні виконавчого органа на межі робочого простору;

3. Пружні переміщення виконавчого органа відносно координатних осей верстата-гексапода характеризуються відношенням  $\Delta X:\Delta Y:\Delta Z=3:2,3:1$ .

### Список літератури

1. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Складов Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ / Під ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Графічне моделювання робочого простору верстата-гексапода // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / Збірник наук. праць – Кіровоград: КДТУ. – 2003. – Вип. 13. – С. 230-235.
3. Gosselin C. Stiffness mapping for parallel manipulators. – IEEE Trans. Robotics Automat. – 1990. – №6. – P. 377-382.
4. Rebeck E., Zhang G.M. A Method for Evaluating the Stiffness of a Hexapod Machine Tool Support Structure. – International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing. – 1999. – Vol. 7. – P. 149-165.

Приведена методика и результаты измерения упругих перемещений исполнительного органа станка-гексапода под нагрузкой на основе разработанной физической модели. Установлены соотношения перемещений по осям координат и их зависимость от положения рабочего органа.

The method and results of measurement of elastic displacement of hexapode effector under the load is given, based upon the developed physical model. The correlation of displacements along the coordinate axes and their dependence upon the position of effector are determined.