

Визначення точного геометричного положення виконавчого органу просторової системи приводів

Розроблено спеціальні пристрої для вимірів точного просторового положення виконавчого органу просторової системи приводів. Пристрої мають вигляд трьох точних сфер розташованих на виконавчому органі. Виведені аналітичні залежності для визначення просторового положення виконавчого органу. Наведено результати апробації запропонованого пристрою при експериментальних вимірах. Порівняння експериментальних вимірів із теоретичними розрахунками підтвердили ефективність розроблених пристроїв та запропонованої методики вимірів просторового положення виконавчого органу.

система приводів, просторовий механізм, виконавчий орган, три сфери, просторове положення, методика, експериментальні виміри, точність

Актуальність досліджень. Визначення точного просторового положення виконавчого органу системи приводів є актуальною науково-технічною проблемою. Її розв'язок дозволяє суттєво підвищити точність системи приводів, побудувати ефективні мехатронні системи керування приводами.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Просторова система приводів переміщує виконавчий орган повертаючи його довільним чином. Положення

© С.В. Струтинський, 2011

виконавчого органу характеризується трьома декартовими координатами переміщення деякої точки та трьома кутовими координатами. Всі координати в комплексі формують переміщення кожної окремої точки виконавчого органу. Тому виміри координат виконавчого органу (декартових і кутових) не можуть бути проведені окремо.

Зв'язок проблеми із важливими і практичними завданнями. Визначення точного положення виконавчого органу є основою проектування прогресивних конструкцій просторових систем приводів. На основі таких приводів реалізуються маніпулятори, промислові роботи, металообробне обладнання та інші технологічні машини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останніх дослідженнях і публікаціях [1, 2] наведено ряд прогресивних конструкцій просторових систем приводів. Досліджені задачі компоновки приводів, встановлення розмірів робочого простору, особливості їх кінематики [3]. Розглянуті питання жорсткості окремих елементів та системи приводів у цілому [3, 4]. Розробок у напрямку встановлення точного положення виконавчого органу який має 6 ступенів вільності в літературних джерелах не виявлено.

Розв'язок невирішених раніше частин загальної проблеми

Загальна проблема має два основні аспекти. Перший полягає у вимірі точного номінального положення виконавчого органу в межах робочого простору. Другий аспект стосується визначення невеликих змін просторового положення виконавчого органу відносно його номінального положення [4]. Розв'язку даних частин проблеми і присвячена дана стаття.

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень є розробка пристроїв та методики визначення точного просторового положення виконавчого органу просторової системи

приводів. Задачами досліджень є обґрунтування принципів вимірювань з розробкою спеціальних пристроїв та апробація створених пристроїв і методики вимірів проведенням спеціальних експериментальних досліджень.

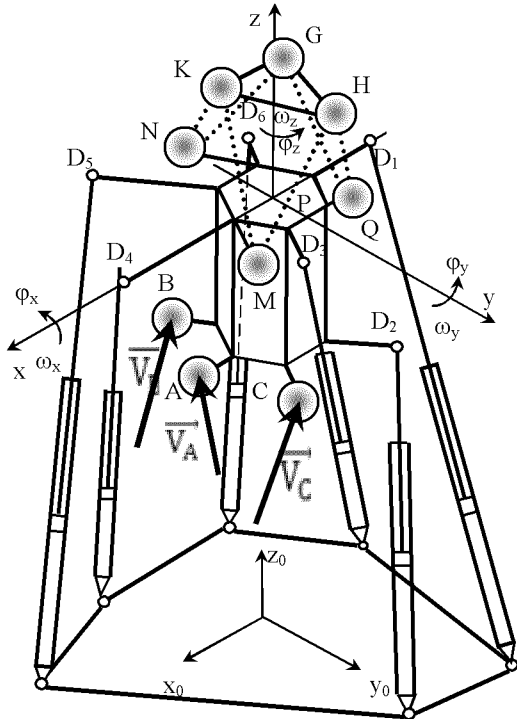


Рисунок 1 - Принципова схема просторової системи приводів та розміщених на виконавчому органі сфер A, B, C, M, N, Q, які призначені для вимірів точного положення виконавчого органу

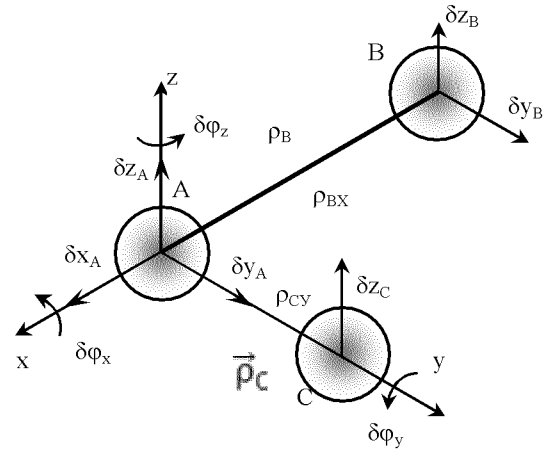


Рисунок 2 - Розташування трьох сфер (точок вимірів) по вісям системи координат

Виклад основного матеріалу досліджень. Просторова система приводів будується по різним схемам: трипода, гексапода та інших. Незалежно від схемної реалізації виконавчий орган системи приводів здійснює просторовий рух відповідний руху твердого тіла, що має шість ступенів вільності [4].

Просторове положення виконавчого органу визначається трьома декартовими координатами x, y, z деякої точки A (полюса) та кутами повороту $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ навколо даної точки (полюса) (рис. 1).

Закономірності руху виконавчого органу визначаються швидкістю поступального переміщення полюса та кутовою швидкістю обертання навколо полюса [5].

При просторовому русі виконавчого органу маємо співвідношення між швидкостями точок A і B.

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{\rho}_B \times \vec{\omega}, \quad (1)$$

де \vec{V}_A - швидкість точки A;

\vec{V}_B - вектор швидкості точки B;

$\vec{\rho}_B$ - радіус вектор який визначає положення точки B відносно точки A;

$\vec{\omega}$ - вектор кутової швидкості повороту виконавчого органу.

Векторний добуток, що входить в (1) визначено через проекції векторів у вигляді

$$\vec{\rho}_B \times \vec{\omega} = (\rho_{BY}\omega_Z - \rho_{BZ}\omega_Y)\vec{i} + (\rho_{BZ}\omega_X - \rho_{BX}\omega_Z)\vec{j} + (\rho_{BX}\omega_Y - \rho_{BY}\omega_X)\vec{k}, \quad (2)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - орти абсолютної системи координат x, y, z ;

$\rho_{BX}, \rho_{BY}, \rho_{BZ}$ - проекції радіуса вектора $\vec{\rho}_B = A\vec{B}$ на осі абсолютної системи координат;

$\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ - кутові швидкості обертання виконавчого органа відносно вісей координат x, y, z відповідно.

Запишемо векторну рівність (1) в проекціях на вісі абсолютної системи координат враховуючи залежність (2). Одержимо

$$V_{BX} = V_{AX} + \rho_{BY}\omega_Z - \rho_{BZ}\omega_Y, \quad V_{BY} = V_{AY} + \rho_{BZ}\omega_X - \rho_{BX}\omega_Z, \quad V_{BZ} = V_{AZ} + \rho_{BX}\omega_Y - \rho_{BY}\omega_X \quad (3)$$

В формулах (3) проекції лінійних і кутових швидкостей визначимо у вигляді кінцевих різниць

$$\begin{aligned} V_{BY} &= \frac{\delta y_B}{\delta t}, \quad V_{AY} = \frac{\delta y_A}{\delta t}, \quad V_{BZ} = \frac{\delta z_B}{\delta t}, \quad V_{AZ} = \frac{\delta z_A}{\delta t}, \\ V_{BX} &= \frac{\delta x_B}{\delta t}, \quad V_{AX} = \frac{\delta x_A}{\delta t}, \quad \omega_X = \frac{\delta \varphi_X}{\delta t}, \quad \omega_Y = \frac{\delta \varphi_Y}{\delta t}, \quad \omega_Z = \frac{\delta \varphi_Z}{\delta t}, \end{aligned} \quad (4)$$

де δt - деяке невелике значення приросту часу; а кінцеві прирости координат $\delta x_B, \dots, \delta \varphi_Z$ визначають невеликі зміни відповідних кінематичних величин (переміщень, кутів).

Підставимо значення кінцевих різниць (4) в формули (3) скоротивши на однакові для всіх складових значення часу δt . Вважаючи зміни радіуса вектора малими одержимо систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} -\rho_{BZ}\delta\varphi_Y + \rho_{BY}\delta\varphi_Z &= \delta x_B - \delta x_A \\ \rho_{BZ}\delta\varphi_X - \rho_{BX}\delta\varphi_Z &= \delta y_B - \delta y_A \\ -\rho_{BY}\delta\varphi_X + \rho_{BX}\delta\varphi_Y &= \delta z_B - \delta z_A \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Запишемо систему рівнянь (5) у матрично векторному вигляді

$$R \cdot \begin{bmatrix} \delta\varphi_X \\ \delta\varphi_Y \\ \delta\varphi_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x_B - \delta x_A \\ \delta y_B - \delta y_A \\ \delta z_B - \delta z_A \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де R - матриця коефіцієнтів даної системи, яка має вигляд

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -\rho_{BZ} & \rho_{BY} \\ \rho_{BZ} & 0 & -\rho_{BX} \\ -\rho_{BY} & \rho_{BX} & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Визначник матриці (7) дорівнює нулю, що підтверджується безпосереднім обчисленням

$$\det R = -\rho_{BX}\rho_{BY}\rho_{BZ} + \rho_{BX}\rho_{BY}\rho_{BZ} = 0. \quad (8)$$

Із вище наведеного випливає, що визначити кутове положення виконавчого органа по вимірам переміщень лише двох його точок (сфер) неможливо.

Для коректної постановки задачі повинна бути задана додаткова інформація у вигляді швидкостей або переміщень третьої точки виконавчого органу (точки С).

Найбільш просто зробити це вибравши геометричну схему вимірювача у вигляді двох взаємно перпендикулярних відрізків АВ і АС на кінцях яких розміщені точки А, В і С, переміщення яких вимірюються. При цьому рівняння будуть спрощені і обробка результатів вимірів буде здійснена простими обчисленнями.

Найбільш раціональним є розташування точок вимірів у площині перпендикулярній вісі z (рис. 2). Це пов'язано з тим, що визначення розташування

даної площини здійснюється вимірами вертикального положення кожної із точок А, В і С від силового стола (бази), на якому розташована просторова система приводів.

При такому виборі системи координат в системі рівнянь (5) треба покласти

$$\rho_{BZ} = \rho_{BY} = 0, \rho_{BX} = AB \neq 0$$

При цьому система рівнянь зводиться до виду двох окремих рівнянь з яких знаходяться кутові переміщення

$$\delta\varphi_z = -\frac{1}{\rho_{BX}}(\delta y_B - \delta y_A), \quad \delta\varphi_Y = -\frac{1}{\rho_{BX}}(\delta z_B - \delta z_A) \quad (9)$$

Запишемо систему рівнянь аналогічну (5) але для точок А і С.

$$\left. \begin{aligned} -\rho_{CZ}\delta\varphi_Y + \rho_{CY}\delta\varphi_Z &= \delta x_C - \delta x_A \\ \rho_{CZ}\delta\varphi_X - \rho_{CX}\delta\varphi_Z &= \delta y_C - \delta y_A \\ -\rho_{CY}\delta\varphi_X + \rho_{CX}\delta\varphi_Y &= \delta z_C - \delta z_A \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Враховуючи, що точки А і С розташовані по осі у одержимо

$$\rho_{CZ} = \rho_{CX} = 0 \quad \rho_{CY} = AC \neq 0$$

Відповідно з системи (10) одержимо дві залежності

$$\delta\varphi_z = \frac{1}{\rho_{CY}}(\delta x_C - \delta x_A), \quad \delta\varphi_X = -\frac{1}{\rho_{CY}}(\delta z_C - \delta z_A) \quad (11)$$

Перші залежності в (9) і (11) є ідентичними.

Із аналізу формул випливає, що для визначення кутового положення виконавчого органу необхідно здійснити 5 вимірів, а саме виміряти вертикальні переміщення всіх трьох точок $\delta z_A, \delta z_B, \delta z_C$ та горизонтальні переміщення двох точок $\delta x_C, \delta x_A$ або $\delta y_B, \delta y_A$.

Розроблена методика застосована для вимірів поперечно кутового положення платформи системи приводів побудованої по схемі механізму трипода (рис. 3).

Визначено компоненти матриці керованості $M_T \approx M$, яка пов'язує малі зміни вектора кутових координат платформи $\rho\varphi_X, \rho\varphi_Y, \rho\varphi_Z$ з змінами довжин штанг dL_1, dL_2, dL_3

$$M_T = \begin{bmatrix} \frac{\partial\varphi_x}{\partial L_1} & \frac{\partial\varphi_x}{\partial L_2} & \frac{\partial\varphi_x}{\partial L_3} \\ \frac{\partial\varphi_y}{\partial L_1} & \frac{\partial\varphi_y}{\partial L_2} & \frac{\partial\varphi_y}{\partial L_3} \\ \frac{\partial\varphi_z}{\partial L_1} & \frac{\partial\varphi_z}{\partial L_2} & \frac{\partial\varphi_z}{\partial L_3} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{\Delta\varphi_x}{\Delta L_1} & \frac{\Delta\varphi_x}{\Delta L_2} & \frac{\Delta\varphi_x}{\Delta L_3} \\ \frac{\Delta\varphi_y}{\Delta L_1} & \frac{\Delta\varphi_y}{\Delta L_2} & \frac{\Delta\varphi_y}{\Delta L_3} \\ \frac{\Delta\varphi_z}{\Delta L_1} & \frac{\Delta\varphi_z}{\Delta L_2} & \frac{\Delta\varphi_z}{\Delta L_3} \end{bmatrix} = M, \begin{bmatrix} d\varphi_x \\ d\varphi_y \\ d\varphi_z \end{bmatrix} = M_T * \begin{bmatrix} dL_1 \\ dL_2 \\ dL_3 \end{bmatrix}$$

Матриця керованості системи приводів M_T складена із частинних похідних, наближено подана у вигляді матриці кінцевих різниць M , компоненти якої є відношення приростів кутів та змін довжин штанг

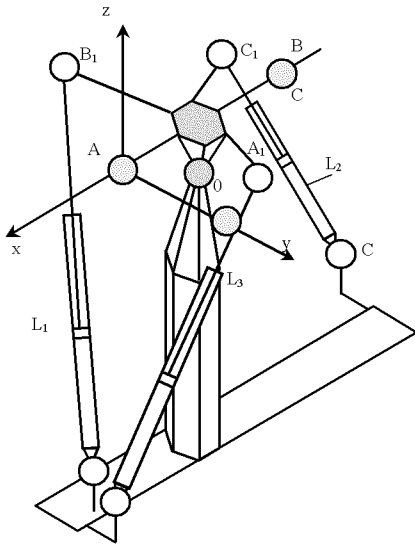


Рисунок 3 - Схема просторової системи приводів побудованої по схемі механізму трипода

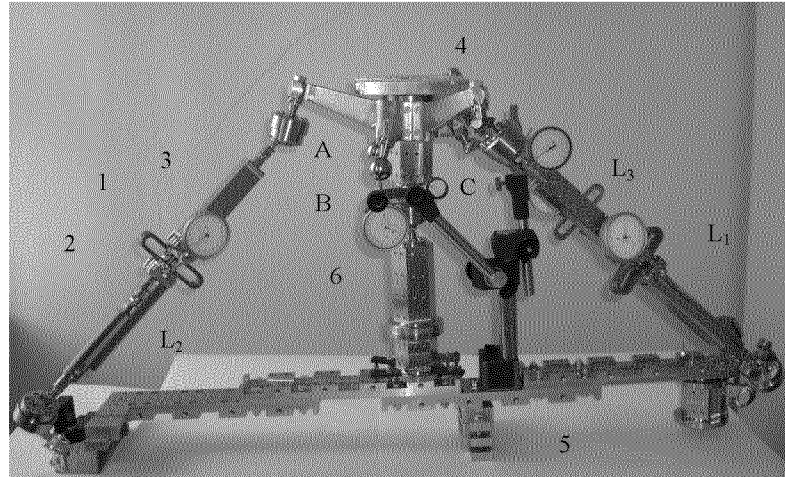


Рисунок 4 - Експериментальна установка на якій проведені виміри точного положення платформи просторової системи приводів побудованої по схемі механізму трипода

При експериментальних вимірах природи довжин штанг задавались спеціальними приводами мікропереміщень які мають кільцеві пружини 1 із гвинтовими пристроями 2 для їх деформації (рис. 4).

Зміни довжин штанг вимірювались індикаторами 3 з точністю ± 0.001 мм. Точні сфери А, В, С встановлювались на виконавчому органі 4 системи приводів, а їх переміщення відносно нерухомої основи 5 реєструвались індикаторами 6 з ціною поділки 0,001мм. Довжина кожної із трьох штанг змінювалась на величину $\Delta L = 0.06 \pm 0.002$ мм. При цьому вимірювалося вертикальне і горизонтальне переміщення сфер і за допомогою формул (9) (11) обчислювались зміни поперечно кутового положення платформи і знаходилися компоненти матриці (12).

Експериментальні дослідження проводились наступним чином. Змінювалась довжина штанг L_1 на величину ΔL і вимірювались переміщення сфер А, В, і С та розраховувались зміни кутів $\Delta\varphi_x$, $\Delta\varphi_y$, $\Delta\varphi_z$. При цьому визначався перший стовпчик матриці керованості (12). Потім довжина штанги L_1 зменшувалась до початкового значення і збільшувалась довжина штанги L_2 . Після вимірів кутів знаходилися значення другого стовпчика матриці 12. Аналогічно проведені виміри кутового положення виконавчого органу при зміні довжини штанги L_3 .

Результати експериментальних вимірів у вигляді вимірної матриці керованості M_e порівнювались із розрахунковими даними M_p (розмірність матриць кутовий градус/мм).

$$M_e = \begin{bmatrix} -0.486 & 1.094 & 0.972 \\ -0.645 & 0.883 & 2.266 \\ -0.567 & 1.387 & 0.958 \end{bmatrix}; \quad M_p = \begin{bmatrix} -0.441 & -1.042 & 1.023 \\ -0.603 & 0.939 & 2.605 \\ -0.567 & 1.508 & 0.988 \end{bmatrix}.$$

Розрахунок компонент матриці керованості системи приводів (M_p) здійснено по спеціальній методиці [6]. Із порівняння розрахункових і експериментальних значень випливає, що їх розбіжність знаходиться в межах 4...14%. Це можна вважати задовільним враховуючи похибки вимірів та похибки обробки експериментальних даних.

Особливістю розглянутого пристрою є необхідність узгодження розташування сфер із абсолютною системою координат виконавчого органу. Запропонована

модифікація розглянутого пристрою. Він має три сфери MNQ (див. рис. 1) розташовані на виконавчому органі по вершинах рівностороннього трикутника. На нерухомій основі опозитно виконавчого органу встановлено три додаткові сфери KGH. Система шести сфер утворює віртуальний механізм гексапод (показано пунктиром), ланками якого є відстані між суміжними нерухомими і рухомими сферами МК, МН, НК, NG, QG, QH. По результатам вимірів відстані між вказаними сферами шляхом розрахунку визначається фактичне положення виконавчого органу, тобто його декартові та кутові координати $x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$. Виміри відстані між сферами віртуального механізма-гексапода здійснюються безпосередньо або визначаються оптичними методами.

Розроблена система дозволяє визначити просторове положення виконавчого органу з похибкою, відповідною похибці вимірів відстані між сферами.

Висновки

1. Виміри просторового положення платформи системи приводів доцільно здійснити із застосуванням спеціального пристрою. Рациональною конструкцією такого пристрою є три сфери жорстко закріплені на платформі, причому, центри сфер повинні знаходитись у вершинах прямокутного трикутника, катети якого в номінальному положенні платформи співпадають з горизонтальними вісями абсолютної системи координат x і y .

2. Для визначення положення виконавчого органу системи приводів необхідно здійснити 5 вимірів. При цьому визначаються вертикальні переміщення всіх трьох сфер та горизонтальні переміщення двох сусідніх сфер. Кутове положення виконавчого органу знаходиться по вимірюваному переміщенню сфер.

3. Результати проведених експериментальних досліджень підтверджують ефективність розробленої методики вимірів та відповідність експериментальних вимірів розрахунковим даним з достатньою для практики точністю – 4...14%.

4. Перспективним пристроєм для вимірів просторового положення виконавчого органу є віртуальний механізм гексапод, який має три сфери, розташовані на виконавчому органі по вершинах рівностороннього трикутника та три нерухомі сфери. По вимірам відстані між рухомими і нерухомими сферами шляхом розрахунку можна визначити просторове положення виконавчого органу з точністю 2..5%.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується визначити випадкові похибки вимірів та шляхи їх зменшення а також розробити спрощені методи експрес аналізу просторового положення виконавчого органу системи приводів.

Список літератури

1. Крижанівський В. А., Кузнецов Ю. М., Валявський І. А., Скляр Р. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. Під ред. Ю. М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Діневич Г.Ю. Компоновка верстатів з механізмами паралельної структури. Монографія. – Херсон: ПП Вишнемирський В.С., 2009. – 456 с. ISBN 978-966-8912-44-3
3. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обработка оборудования на основе механизмов параллельной структуры / Под общ. Ред В.Л. Афонина. – М.:Изд-во МГТУ Станкин, Янус. – К., 2006. – 452с.
4. Струтинський С.В. Визначення основних конструктивних параметрів сферичних опорних вузлів просторового механізму методом Монте-Карло / С.В. Струтинський // Всеукраїнський щомісячний науково-технічний журнал "Машинознавство". – 2007. - №5. – С.37-43.
5. Струтинський С.В. Математичне моделювання просторових поперечно-кутових мікропереміщень сферичного шарніра з використанням рекурсивних зв'язків / С.В. Струтинський // Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал «Машинознавство». – 2009. - №1. – С.37-43.
6. Струтинський С.В. Визначення сингулярних положень просторової системи приводів з використанням методів Монте-Карло / С.В. Струтинський // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Луцький Національний технічний університет. – 2011. – Вип.33. – С.248-257.

С. Струтинский

Определение точного геометрического положения исполнительного органа пространственной системы приводов

Разработаны специальные устройства для измерений точного пространственного положения исполнительного органа пространственной системы приводов. Устройства имеют вид трех точных сфер, расположенных на исполнительном органе. Выведены аналитические зависимости для определения пространственного положения исполнительного органа. Приведены результаты апробации предложенного устройства при экспериментальных измерениях. Сравнения экспериментальных измерений с теоретическими расчетами подтвердили эффективность разработанных устройств и предложенной методики измерений пространственного положения исполнительного органа.

S. Strutinsky

Determination of exact geometrical position of executive branch of the spatial system of drives

The special devices are worked out for measuring of exact spatial position of executive branch of the spatial system of occasions. Devices have the appearance of three exact spheres located. Located on an executive branch. Shown out analytical dependences for determination of spatial position of executive branch. Results over of approbation are brought, offered device at the experimental measuring. Comparing of the experimental measuring to the theoretical calculations confirmed efficiency of the worked out devices and offered methodology of measuring of spatial position of executive branch.

Одержано 21.10.11