

В. П. Ягліньський, д.т.н., С. С. Гутиря, д.т.н., В. В. Вовк*Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна***НЕОДНОЗНАЧНІСТЬ ТА СИНГУЛЯРНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ
ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТИПУ БІГЛАЙД**

В статті розглянуті питання планування і отримання формоутворюючих траєкторій механізмів паралельної структури типу біглайд. Розглянуті можливості формування функціональних траєкторій двоосного двокоординатного біглайда у прямій задачі у вигляді узагальнених координат ступенів рухомості і в оберненій задачі у вигляді координат полюса схвата. Виявлені умови виникнення неоднозначності положення механізму у прямій і оберненій задачах. З метою уникнення неоднозначності запропоновано керування процесом формування траєкторії за допомогою додаткового параметра. В процесі комп'ютерного 3-D моделювання досліджені сингулярні конфігурації механізму двоосного біглайда з паралельними напрямними. Розроблені аналітичні моделі процесу формування траєкторій та запропоновані кінематичні умови уникнення процесів запирання механізму у сингулярних конфігураціях. Для механізму паралельної структури типу біглайд виявлені сингулярні конфігурації з квазінульовою та від'ємною жорсткістю. З використанням принципу Лагранжа віртуальних переміщень отримані аналітичні моделі узагальнених коефіцієнтів жорсткості механізму в залежності від сформованої конфігурації.

Ключові слова: *запирання механізму, конфігурація, узагальнені координати, квазінульова і від'ємна жорсткість.*

V. P. Yahlinskyi, DSc, S. S. Hutyria DSc, V. V. Vovk**AMBIGUITY AND SINGULARITY MECHANISMS OF PARALLEL
STRUCTURE OF BIGLIDE TYPE**

The article deals with the issues of planning and obtaining shaping trajectories of the mechanisms of a parallel structure of the biglide type. The possibilities of forming functional trajectories of a biaxial two-coordinate biglide in the direct problem in the form of generalized coordinates of the degrees of freedom and the inverse problem in the form of gripper pole coordinates are considered. The conditions for the occurrence of ambiguity in the position of the mechanism in direct and inverse problems are revealed. To avoid ambiguity, it is proposed to control the process of forming a trajectory using an additional parameter. In the process of computer 3-D modeling, singular configurations of the biaxial biglide mechanism with parallel guides were studied. Analytical models for the formation of trajectories are developed and kinematic conditions are proposed for avoiding locking processes in the mechanism in singular configurations. Singular configurations with quasi-zero and negative stiffness have been found for the mechanism of a parallel structure of the biglide type. Using the Lagrange principle of virtual (possible) displacements, analytical models of the generalized stiffness coefficients of the mechanism are obtained depending on the formed configuration. Configurations with quasi-zero stiffness correspond to zero values of the stiffness coefficients, and for negative stiffness, a characteristic transition through a singular configuration. Analytical expressions for the relative rigidities of the biglide mechanism are obtained and diagrams of their change for different configurations are constructed. The influence of the design parameters of the biglide on the value of the relative generalized stiffness of the entire mechanism has been studied. It has been established that within the range of configuration angle change from 0 to 12° and from 45° to 80°, the values of relative stiffness coefficients are much higher than within the range from 15° to 45°, which allows controlling the rigidity of the mechanism and having a positive effect on the positioning accuracy of the pole. biglide.

Keywords: *mechanism locking, configuration, generalized coordinates, quasi-zero and negative stiffness.*

DOI 10.32684/2412-5288-2023-1-22-45-52

Вступ

Період технічної еволюції 2000-2020 років відрізняється створенням гами різноманітних роботів-верстатів на основі механізмів паралельної структури (МПС) [1, 2]. Свердлильні, фрезерні верстати-роботи на основі МПС мають високу маневреність, а також забезпечують можливість вертикального компонування. Характерними рисами такої конструкції є комбінація шпіндельної головки із платформою, до якої прикріплені кінці двох, трьох або шести прямолінійних штанг, що переміщуються лінійно, але не уздовж осей координат X, Y, Z [3, 4]. Промислові платформи (ПП) на основі МПС сприяють значному розширенню можливостей сучасного технологічного обладнання, особливо в умовах значних динамічних навантажень, а також у складі верстатів-роботів з багатокоординатною системою управління при виконанні операцій з обробки складних поверхонь [5]. Точність позиціонування серійних моделей верстатів-роботів досягає 1...5 мкм, частота обертання шпинделя – 30000 об/хв, швидкість переміщень ПП – 90 м/хв, максимальні пришвидження – 10 м/с² (при випробуваннях – 50 м/с²) [6].

Постановка проблеми в загальному виді

Найпростішими конструкціями МПС прийнято вважати структури із двома рухомими штангами постійної довжини типу біглайд (рис. 1, 2, 3), а зі штангами змінної довжини – типу біпод. Дельта-роботи містять механізми із примусовим обертовим рухом опорного шарніра, розташованого на нерухомому базисі. Застосування ПП на основі дельта-механізмів дозволило значно збільшити продуктивність технологічного устаткування в харчовій промисловості [7]. Відомим різновидом дельта-механізмів з поєднанням конструктивних особливостей біглайда і біпод є МПС типу ножиці (на основі V-подібного з'єднання ланок (рис. 3, 4) [5, 6]. Також розроблено комбіновані структури МПС на основі триподу-триаглайду, які застосовують для захисту обладнання від ударів та вібрацій [1, 2].

Досвід експлуатації технологічного обладнання на основі МПС і відомі дослідження показали, що проблема визначення та аналіз функціональних параметрів типових конструкцій МПС типу біглайд досліджені недостатньо, зокрема:

– не вирішена проблема неоднозначності функціонування у певних конфігураціях робочого простору;

– не визначено системну залежність жорсткості МПС від формоутворюючої

конфігурації;

– не розглянуті питання виникнення і унеможливлення функціонування біглайда у сингулярних конфігураціях;

– не досліджені умови виникнення квазінульової та від'ємної жорсткості МПС.

Особливо важливою уявляється задача визначення областей оптимальних значень жорсткості МПС на стадії проектування.

Для дослідження функціональної ефективності МПС типів одноосовий та двоосовий біглайд визнано обрати за необхідне:

– розробити аналітичні моделі визначення і уникнення неоднозначності конфігурацій МПС в робочому просторі;

– дослідити умови виникнення сингулярних операцій;

– визначити параметри жорсткості біглайда у робочому просторі залежно від формоутворюючої конфігурації МПС;

– визначити та дослідити умови виникнення квазінульової та від'ємної жорсткості МПС;

– виконати комп'ютерне 3-D моделювання функціональних траєкторій біглайда зі умов виникнення сингулярності та квазінульової та від'ємної жорсткості.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Першою науковою працею, у якій розроблено нову концепцію гібридних каркасних компонувань верстатів на основі МПС за модульним принципом є монографія українських вчених Ю. М. Кузнецова, Д. А. Дмитрієва й Г. Ю. Диневича [8]. Розглянуто сучасний стан проблеми створення технологічного устаткування з паралельною кінематикою, досвід досліджень ПП на основі МПС в Україні та за кордоном, еволюцію й прогнозування розвитку аналогічних пристроїв у робото- і верстатобудуванні. Наведено приклади оригінальних, захищених патентами, каркасних компонувань структурних схем і конструкцій багатофункціонального устаткування на основі МПС.

Методологічні основи підвищення технічного рівня верстатів-роботів на основі МПС розглянуті в наукових працях [8, 9].

Формуванню критеріїв відтворення функціональних властивостей технологічного обладнання присвячені роботи [8, 9].

ПП на основі МПС за схемою біглайда у загальному вигляді складається із рухомої частини (платформи) і нерухомої (основи), з'єднаних між собою штангами постійної довжини (рис. 4). Штанги мають на кінцях циліндричні шарніри, один із яких забезпечує можливість поступального руху відносно основи

[1, 8]. Платформа та її елементи здійснюють плоский рух.

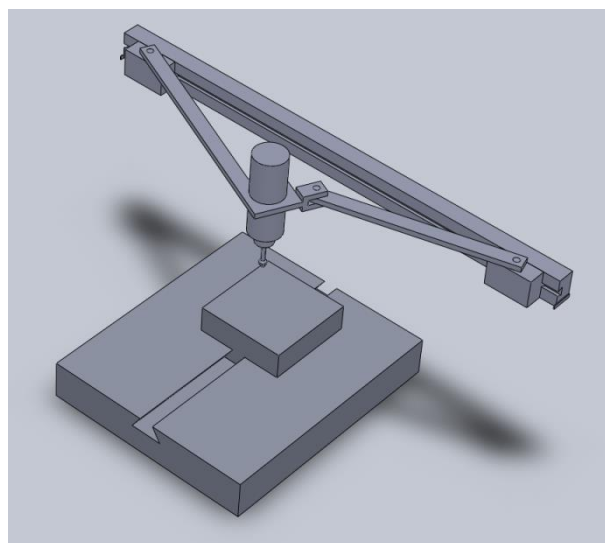
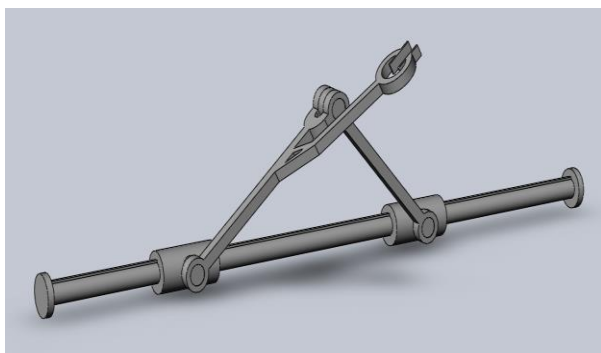


Рисунок 1 – Модель одноосового двокоординатного біглайда

Серед конструкцій діючих верстатів-роботів з МПСК типу біглайд, що містять два паралельних кінематичних ланцюга з двома керованими приводами, розташованими по одному в кожному ланцюгу, є відомим верстат типу *SPECHT Experimental* (ФРН) з горизонтальним розташуванням шпинделя [11, 12]. Конструкція містить вертикальні паралельні напрямні і рухомий стіл, що рухається перпендикулярно площині напрямних. Така компоновка верстату забезпечує максимальну швидкість вихідної ланки (шпинделю) до 2 м/с і пришвидшення до 15 м/с². За таким же принципом побудовано верстат моделі *Trijoint 900 Н* з горизонтальним розташуванням шпинделя, розроблений у Чеському технічному університеті (м. Прага) і виготовлений фірмою *Kovosvit MAS* [1, 8]. Гарантована точність позиціонування біглайдів, за певних умов застосування, досягає 40...50 мкм.

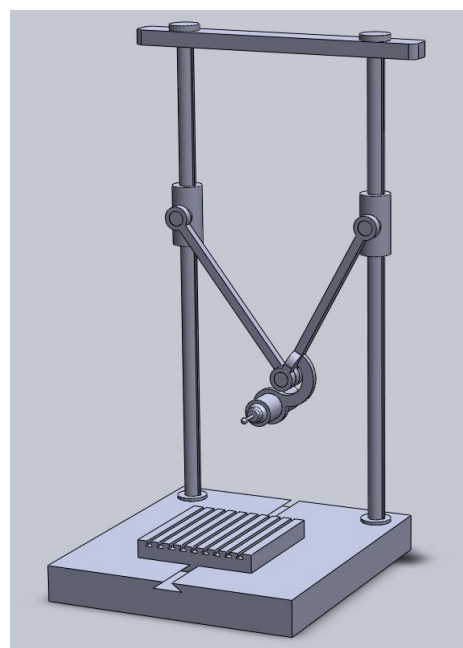
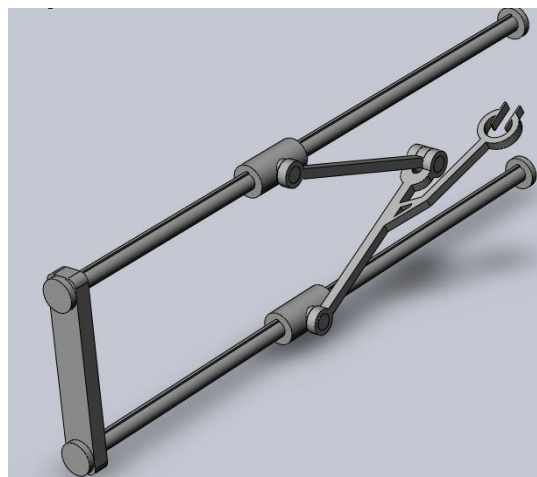


Рисунок 2 – Твердотільна модель двоосового двокоординатного біглайда

Викладення основного матеріалу.

Серед множини конструкцій МПС у складі сучасних верстатів-роботів, виділяють дві основні групи [8]:

- просторові механізми з телескопічними штангами керовано-змінної довжини (біпод, трипод, лінапод, пентапод, гексапод);

- механізми зі штангами (стрижнями) постійної довжини, шарнірно пов'язаними з рухомими каретками, які розташовані на напрямних станини (біглайд, триглайд, гексаглайд).

У верстатах другої групи механізми приводів і двигуни розташовані на станині, а основні навантаження сприймають напрямні верстата, що дозволяє зменшити рухомі маси ланок, підвищити швидкість переміщень до 30 м/хв і точність обробки до 0,1 мкм.

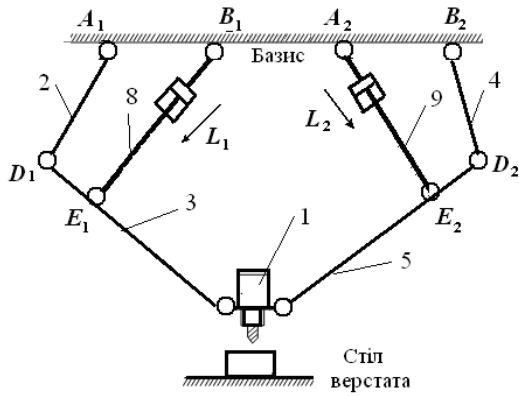


Рисунок 3 – Схема МПС типу “ножиці” з ланками змінної довжини: A_1, B_1, A_2, B_2 – нерухомі опори; 1 – інструментальна головка; 2, ..., 5 і 8, 9 – позначення штанг постійної та змінної довжини; L_1, L_2 – подовження штанг

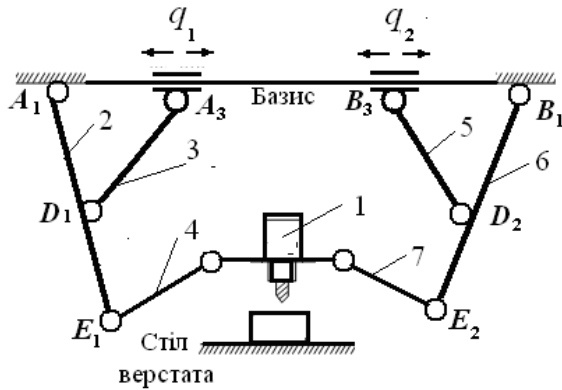


Рисунок 4 – Схеми МПСК типу “ножиці” з ланками постійної (б) довжини: A_3, B_3 – рухомі опори; 1 – інструментальна головка; 2, ..., 7 – позначення штанг постійної довжини; q_1, q_2 – узагальнені координати

Водночас, за даними практичного застосування, є відомим негативний прояв недостатньої жорсткості конструкцій МПС, а також її мінливість при виконанні технологічних операцій, що спричиняє зміни частотних характеристик системи, небажані явища резонансного типу, збільшення часу перехідних процесів тощо.

Серед відомих досліджень жорсткості МПС та відповідних методів найбільш ефективними уявляються моделювання жорсткості методом кінцевих елементів [1, 4, 8]; експериментальне визначення жорсткості МПС [8]; теоретичний аналіз матричним методом жорсткості шестикоординатного МПС з використанням плюкерових координат ліній штанг [1].

Основою кінематики двоосового біглайда є ковзання уздовж напрямних основ штанг незмінної довжини l_1 і l_2 (рис. 5) [1, 8, 10].

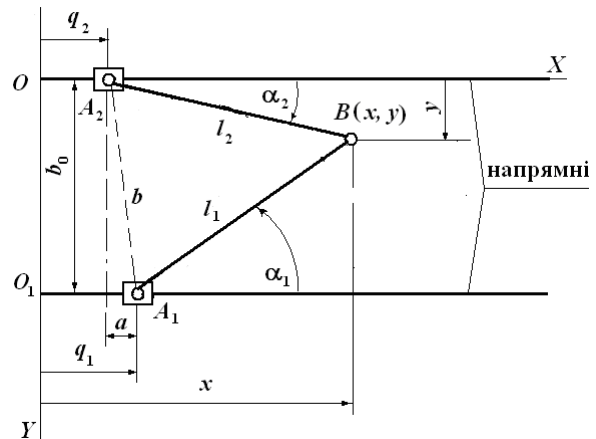


Рисунок 5 – Схема переміщення біглайда (α_1 і α_2 – кути конфігурації біглайда)

Результати комп'ютерного моделювання МПС типу біглайд підтвердили наявність сингулярних конфігурацій і конфігурацій з присутністю квазінульової та від'ємної жорсткості.

Із геометричних співвідношень (рис. 5) отримано програми руху такого біглайда у прямій (1) та зворотній (2) задачах кінематики

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= x - k_0 \cdot \sqrt{l_1^2 - y^2}, \\ q_2 &= x - k_0 \cdot \sqrt{l_2^2 - (b_0 - y)^2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= q_1 + \frac{l_1}{b} \left[-\gamma_1 (q_1 - q_2) + b_0 \cdot k_0 \cdot \sqrt{1 - \gamma_1^2} \right] \\ y &= \frac{l_1}{b} \left[\gamma_1 b_0 - (q_1 - q_2) \cdot k_0 \cdot \sqrt{1 - \gamma_1^2} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{l_1^2 - l_2^2 + b^2}{2bl_1}, \\ b^2 &= b_0^2 + a^2 = b_0^2 + (q_1 - q_2)^2 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

де k_0 – коефіцієнт неоднозначності в сингулярних конфігураціях (рис. 6, 7).

Сингулярним конфігураціям біглайда відповідають неоднозначності його розташування у робочому просторі (рис. 6). Виявлено, що такі неоднозначності зумовлені знаками $\pm$ перед радикалом у формулах (1) і (2). Запропоновано усунення неоднозначності у сингулярних конфігураціях МПС типу біглайд

уведенням у формули параметру однозначності k_0 (табл. 1, 2).

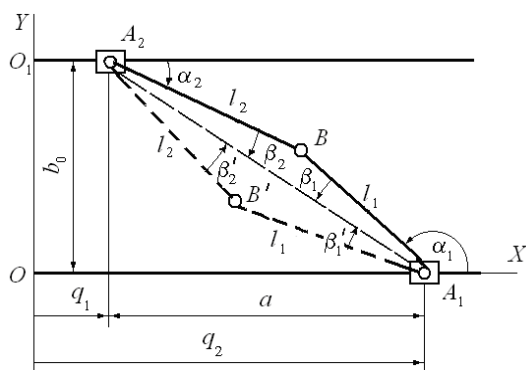


Рисунок 6 – Розрахункова схема неоднозначності конфігурацій двоосового біглайда у прямій задачі кінематики

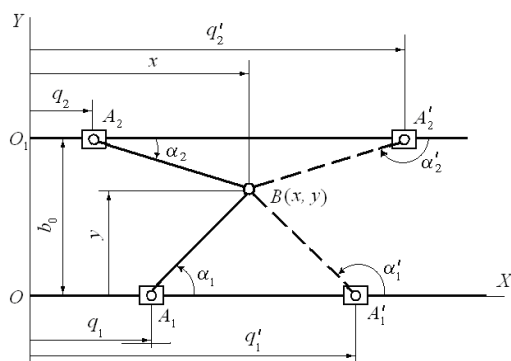


Рисунок 7 – Розрахункова схема неоднозначності конфігурацій двоосового біглайда у зворотній задачі кінематики

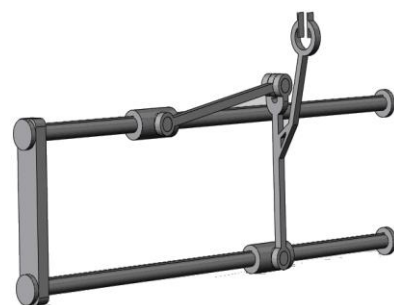
Таблиця 1 – Параметр однозначності конфігурацій двоосового біглайда

Пряма задача кінематики	
Характерні точки, рис. 6	Параметр k_0
B	1
B'	-1

Таблиця 2 – Параметр однозначності конфігурацій двоосового біглайда

Зворотна задача кінематики		
Узагальнені координати	Характерні точки, рис. 7	Параметр k_0
q_1	A_1	1
q_2	A_2	1
q'_1	A'_1	-1
q'_2	A'_2	-1

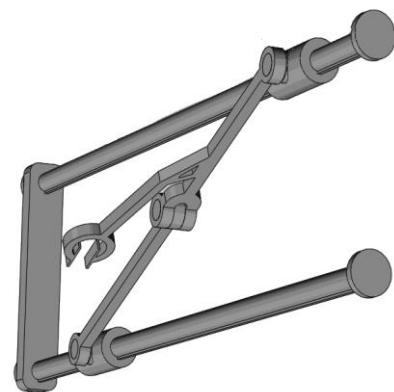
Сингулярні конфігурації характеризуються не тільки неоднозначністю визначення положення, а й максимальними значеннями параметрів жорсткості (рис. 8, 9).



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Комп'ютерне моделювання сингулярних конфігурацій двоосового двокоординатного біглайда (плоского біглайда з паралельними напрямними)

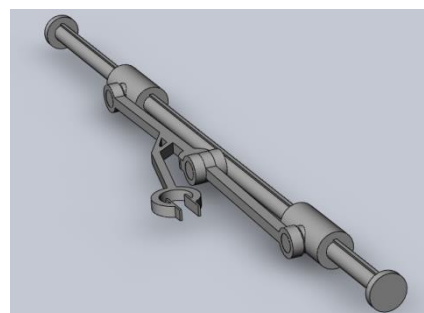


Рисунок 9 – Сингулярна конфігурація одноосового двокоординатного біглайда

З умови сумісності деформацій біглайда (рис. 10) отримано:

$$x_1 = u + \sqrt{l_1^2 - (b_0 - y)^2} - \sqrt{l_1^2 - (b_0 - y - v)^2}; \quad (4)$$

$$x_2 = u + \sqrt{l_2^2 - y^2} - \sqrt{l_2^2 - (y + v)^2}. \quad (5)$$

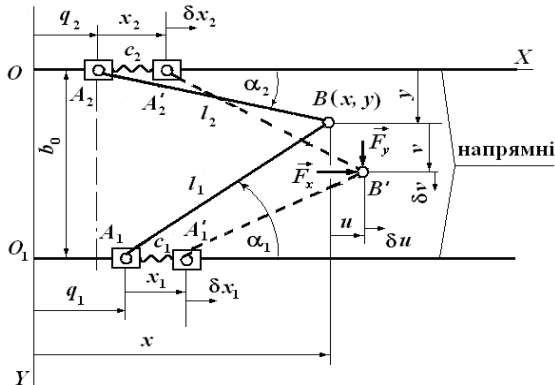


Рисунок 10 – Схема переміщень біглайда під дією сил F_x, F_y (α_1 і α_2 кути конфігурації)

Характеристики сил пружності визначено з використанням принципу віртуальних переміщень Лагранжа у вигляді

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = J^0 K_0 J \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{pmatrix}, K_0 = \begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{pmatrix},$$

де c_1, c_2 – сталі коефіцієнти узагальненої жорсткості приводів біглайда;

K_0 – діагональна матриця узагальненої жорсткості.

За умови $c_1 = c_2 = c$ визначено функції від кута α_2 коефіцієнтів відносних жорсткостей

$$\left. \begin{aligned} f_{c1} &= c_{xy}/c = \operatorname{tg} \alpha_2 - \gamma_0 / \sqrt{1 - \gamma_0^2}, \\ f_{c2} &= c_{yy}/c = \operatorname{tg}^2 \alpha_2 + \gamma_0^2 / (1 - \gamma_0^2), \end{aligned} \right\}$$

$$\gamma_0 = \frac{b_0 - l_2 \sin \alpha_2}{l_1}. \quad (6)$$

Встановлено, що у межах $\alpha_2 = 0 \div 12^\circ$ та $\alpha_2 = 45 \div 80^\circ$ значення коефіцієнтів відносних жорсткостей більші, ніж у межах $\alpha_2 = 15 \div 45^\circ$ (рис. 11). Встановлено залежність жорсткості від відносних розмірів ланок біглайда b_0/l_1 , а також виявлено наявність квазінульової та від'ємної жорсткості, що свідчить про можливість зниження точності позиціонування у відповідних конфігураціях біглайда (рис. 11).

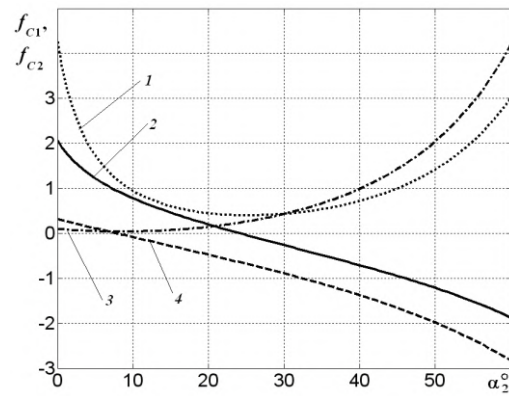


Рисунок 11 – Залежність жорсткості біглайда від кута конфігурації α_2 при $l_2/l_1 = 1,2$ (криві 1 і 2 відповідають значенню $b_0/l_1 = 0,9$; 3 і 4 – $b_0/l_1 = 0,3$)

На основі характеристик кінематики біглайда у формі похідних за часом від співвідношень (1) та (2) отримано аналітичні умови відсутності запирання механізму у вигляді

$$\ddot{q}_1 \neq \ddot{q}_2 \neq 0, \quad \ddot{x} \neq \ddot{y} \neq 0. \quad (7)$$

Висновки

1. Запропонована методика унеможливлення неоднозначних конфігурацій двоосового біглайда шляхом керування додатковим параметром.

2. Шляхом комп'ютерного 3-D моделювання виявлені умови виникнення сингулярних конфігурацій МПС типу біглайд та запропоновані аналітичні умови відсутності запирання механізму.

3. Визначені параметри жорсткості біглайда у робочому просторі залежно від формують конфігурації МПС та досліджені умови виникнення квазінульової та від'ємної жорсткості МПС.

4. Отримано аналітичні вирази для жорсткостей механізму біглайда і встановлено залежність жорсткості від відносних розмірів ланок біглайда, що дає змогу впливати на точність позиціонування полюса біглайда.

Список використаних джерел

1. Яглинский В. П., Гутыря С. С. Теория и практика моделирования технического уровня технологических машин. *Моделирование технологических процессов механической обработки и сборки*: коллективная монография. Москва: Издат. дом "Спектр", 2014. С. 224-272.

2. Gutrya, S., Yaglinitskiy, V., Gaydamaka, A. (2016). System Model of a Technical Level of Rolling Bearings. *British Journal of Applied Science & Technology*, 13(2), 1-8. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/20747>.

3. Кузнецов Ю. М., Дмитрієв Д. О. Візуалізація формуютьуючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компоновок. *Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя*. Тернопіль, 2008. № 1. С. 61-70.

4. Ягліньський В., Гутіря С. Обґрунтування показників надійності промислових роботів і платформ у складі технологічного обладнання. *Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: monograph*. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2021. Pp. 599-609. <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II-599-609>.

5. Yaglinitskiy, V., Al-Obaydi A., Kozerskiy, G., Moskvichev, N. (2016). Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technology*. 16(3). 1-7. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/26274>.

6. Кузнецов Ю. М., Дмитрієв Д. О. Моделирование технологических движений в верстатах с параллельной кинематикой при обработке сложно-профильных поверхностей. *Зб. наук. праць НТУ «ХПИ» «Современные технологии в машиностроении»*. 2008. Вып. 1. С. 81-89.

7. Hutyria S., Yaglinitskiy V., Chanchin A., Khomiak Y., Popov V. (2020). Evolution of trolleybus: directions, indicators, trends. *Diagnostyka*, 21(1), 11-26. <https://doi.org/10.29354/diag/116080>.

8. Кузнецов Ю. М., Дмитрієв Д. О., Діневич Г. Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури. Херсон: ПП Вишемирський В. С., 2009. 456 с.

9. Ягліньський В. П., Козерацький Г. В., Хихловський А. Б. Паретооптимізація параметрів тренажера-гексапода по критеріям маневренності. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць*. Харків, 2018. № 25 (1301). С. 163-167. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.

10. Козерацький Г. В., Ягліньський В. П., Хихловський А. Б., Озернюк О. Т. Кваліметрична модель технічного рівня тренажера-гексапода. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. пр.* Харків, 2018, № 25 (1301). С. 68-74. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.

11. Chiodo, E., Lauria, D. (2012, October). *Stochastic index definition and estimation for*

reliability and quality assessment of transportation systems. Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), IEEE, Bologna, Italy, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387419>.

References

1. Yaglinitskiy V.P., Gutrya S.S. Teoriya i praktyka modelirovaniya technicheskogo urovniya technologicheskix mashin. *Modelirovanie technologicheskix procesov mechanicheskoy obrabotki i sborky: kolektivnaya monografiya*. Moskva: Izdat. dom "Spektr", 2014. S. 224-272.

2. Gutrya, S., Yaglinitskiy, V., Gaydamaka, A. (2016). System Model of a Technical Level of Rolling Bearings. *British Journal of Applied Science & Technology*, 13(2), 1-8. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/20747>.

3. Kuznetsov Yu. M., Dmytriiev D. O. Vizualizatsiia formoutvoriuiuchykh rukhiv mekhanizmayi paralelnoi struktury v verstatakh novykh komponovok. *Visnyk TDTU im. Ivana Puliuia*. Ternopil, 2008. # 1. S. 61-70.

4. Yaglinitskiy V., Hutyria S. *Obgruntuvannia pokaznykiv nadiinosti promyslovykh robotiv i platform u skladi tekhnologichnoho obladdannia* Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: monograph. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2021. Pp. 599-609. <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II-599-609>.

5. Yaglinitskiy, V., Al-Obaydi A., Kozerskiy, G., Moskvichev, N. (2016). Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technology*. 16(3). 1-7. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/26274>.

6. Kuznetsov Yu., Dmytriiev D. Modeluvania technologichnyh ruhiv v verststah z paralelnou kinematykou pry obrobtti skladnyh profilnyh poverhon. *Zb. nauk. prats NTU "KhPI" "Sovremennye tehnologii v mashynostroenii"*. 2008. Vyp. 1. S. 81-89.

7. Hutyria S., Yaglinitskiy V., Chanchin A., Khomiak Y., Popov V. (2020). Evolution of trolleybus: directions, indicators, trends. *Diagnostyka*, 21(1), 11-26. <https://doi.org/10.29354/diag/116080>.

8. Kuznetsov Yu. M., Dmytriiev D. O., Dinevych H. Yu. Komponovky verstativ z mekhanizmayi paralelnoi struktury. Kherson: PP Vyshemyrskiy V. S., 2009. 456 s.

9. Yaglinitskiy V. P., Kozerskiy H. V., Khykhlovskiy A. B. Paretooptymyzatsiya parametrov trenazhera-heksapoda po kryteriyam manevrennosti. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. Zb. nauk. prats.*

- Kharkiv, 2018. # 25 (1301). S. 163-167. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.
10. Kozeratskyi H. V., Yahlinskyi V. P., Khykhlovskyi A. B., Ozerniuk O. T. Kvalimetrychna model tekhnichnoho rivnia trenazhera-heksapoda. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. Zb. nauk. pr.* Kharkiv, 2018, # 25 (1301). S. 68-74. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.
11. Chiodo, E., Lauria, D. (2012, October). *Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems*. Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), IEEE, Bologna, Italy, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387419>.

Надійшла до редакції 15.02.2023