

backlashes. This allows conducting the cutting process without the formation of technological protrusion between wires. Distinctive features of a new cut shaping technology scheme are reflected in a machine design concept, which ensures the following: optimal process conditions in the cutting zone, minimal cut width, maximum possible cutting performance, parallel pulling and tensioning of the two wires in the cutting zone, wire in pulling speed adjustment, cutting depth monitoring, optimum wear of the bi-wire electrode-tool.

This article proposes and examines a high performance way of electric arc metal cutting with bi-wire electrode-tool. The physical cutting mechanism is described. Machine design concept, which implements this method, is developed. Experimental machine «Knife-1» for electric arc hard materials cutting with bi-wire electrode-tool is designed, manufactured and examined.

electric arc, hydrodynamic mode, bi-wire electrode-tool, shaping technology system, cutting machine

Одержано 22.12.16

УДК 62-231:621.9.04

А.М. Кириченко, проф., д-р техн. наук, Аль Ібрахімі Метак, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

E-mail: andrew.kirichenko@gmail.com

Багатокоординатний верстат з надлишковим механізмом паралельної структури та спеціальним робочим органом

У статті досліджуються перспективи вдосконалення багатокоординатного обладнання паралельної структури з ланками змінної довжини шляхом введення надлишкових приводів. Запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного верстата з надлишковим механізмом паралельної структури 2R3T та спеціальним робочим органом, яка дозволяє позбавитись від особливих положень у робочому просторі та розширити діапазон кутів повороту обертальних ступенів вільності до 120° та 180° відповідно, розглянуто ряд можливих компоновок подібних верстатів.

верстат, механізм паралельної структури, надлишковість, робочий орган

А. Н. Кириченко, проф., д-р техн. наук, Аль Ибрахими Метак, асп.

Центральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина

Многокоординатный станок с избыточным механизмом параллельной структуры и специальным рабочим органом

В статье исследуются перспективы усовершенствования многокоординатного оборудования параллельной структуры с звеньями переменной длины путем введения избыточных приводов. Предложена новая конструкция пятикоординатного станка с избыточным механизмом параллельной структуры 2R3T и специальным рабочим органом, позволяющая избавиться от особых положений в рабочем пространстве и расширить диапазон углов поворота вращательных степеней свободы до 120° и 180° соответственно, рассмотрен ряд возможных компоновок подобных станков.

станок, механизм параллельной структуры, избыточность, рабочий орган

Постановка проблеми. Вирішення задачі максимального збільшення продуктивності обробки деталей при забезпеченні гнучкості виробництва можливе лише з використанням верстатів з ЧПУ для високошвидкісної обробки, в тому числі багатокоординатної. Подальше підвищення продуктивності вимагає збільшення жорсткості для можливості інтенсифікації режимів різання, а також збільшення

швидкостей та прискорень робочих і допоміжних рухів. Зокрема, за даними фірми Starrag Group AG [1], збільшення прискорення робочого органа з 0,5g до 1g дозволяє зменшити час обробки на 30% при високошвидкісній обробці алюмінієвих сплавів.

Таким чином, перспективним завданням сучасного верстатобудування є створення високопродуктивних багатокоординатних фрезерних верстатів і обробних центрів з надвисокими швидкостями та прискореннями, що можливе з використанням механізмів паралельної структури. Повноцінному застосуванню механізмів паралельної структури в багатокоординатних верстатах з ланками змінної та постійної довжини перешкоджають певні недоліки, основним з яких є обмеження робочого простору та кутів орієнтації робочого органа внаслідок виникнення особливих положень.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування надлишкових механізмів паралельної структури, які потенційно дозволяють зменшити вплив особливих положень та принципово покращити характеристики робочого простору. Таким чином, розширення технологічних можливостей багатокоординатних верстатів паралельної структури є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відома значна кількість зарубіжних досліджень, присвячених надлишковим механізмам паралельної структури [2]. Відомо, що надлишковість спрощує вирішення прямої задачі кінематики, дозволяє керувати формою еліпсоїдів статичної та динамічної маніпульованості [3]. Якщо розглядати надлишковий механізм паралельної структури як сукупність повнопаралельних механізмів, отриманих виключенням надлишкових ланок, для того, щоб надлишковий механізм знаходився у особливому положенні, необхідно, щоб усі такі механізми знаходились у особливих положеннях. Таким чином, надлишковість дозволяє ефективно усунути особливі положення у робочому просторі паралельних маніпуляторів.

Досить вичерпно досліджені прості плоскі надлишкові механізми, зокрема у [4] для 3RPR (рис. 1) встановлено, що використання надлишкової приводної ланки дозволяє кардинально покращити маніпульованість у робочому просторі порівняно з двохланковим механізмом.

Одним з найбільш розповсюджених застосувань для надлишкових механізмів є кабельні маніпулятори. Наприклад, у [5] показано, що для таких маніпуляторів (рис. 2) надлишковість приводів дозволяє підвищити жорсткість, забезпечити більш ефективне використання робочого простору.

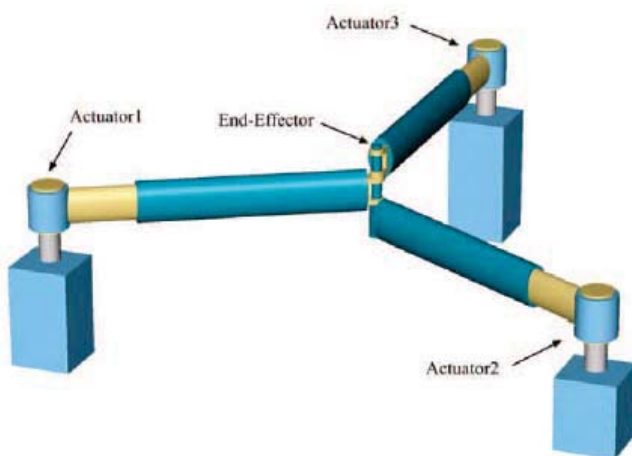


Рисунок 1 – Плоский надлишковий механізм паралельної структури

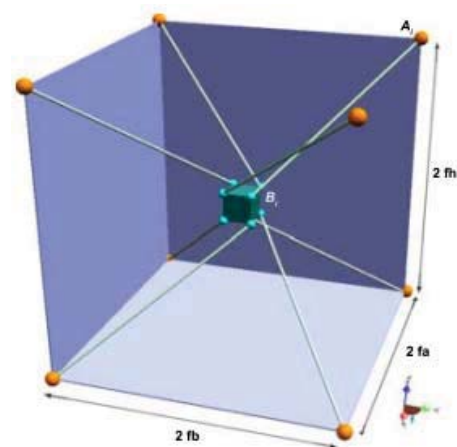


Рисунок 2 – Кабельний маніпулятор з 8 приводами

На відміну від повнопаралельних механізмів, управління надлишковими маніпуляторами повинно здійснюватись за моментами приводів ланок з використанням доповнених пропорційно-диференціальних регуляторів [6], при цьому необхідно враховувати неточності виготовлення, які можуть призвести до виникнення значних напружень у просторовій структурі механізму [7]. Для врахування навантаження на робочий орган швидкісних надлишкових механізмів запропоновано використовувати адаптивне управління у подвійних координатах – приводів та робочого органа [8].

Відомі конструкції надлишкових механізмів паралельної структури: плоского 3-осьового ARCHI [13] з нескінченним обертанням навколо осі та просторового 5-осьового EUREKA [14] з можливістю повороту $\pm 90^\circ$ навколо одної з осей та повороту на повний оберт навколо іншої. Недоліками обох механізмів є невисока жорсткість у одному або кількох напрямках.

Надлишкові механізми паралельної структури знайшли застосування й у верстатобудуванні. Одним з небагатьох дослідних верстатів, побудованих на основі маніпуляторів паралельної структури з надлишковими приводами, є Eclipse [9], розроблений у Сеульському національному університеті (Південна Корея). Використання 8 приводів для керування 6 ступенями вільності дозволяє позбавитись від особливих положень у робочому просторі, забезпечуючи можливість вільного переходу від вертикальної до горизонтальної орієнтації шпинделя. Недоліками верстата Eclipse є використання кільцевих напрямних, які мають високу вартість та ускладнюють калібрування, а також зміна жорсткості від 50 Н/мкм до 15 Н/мкм при переході від вертикальної до горизонтальної орієнтації робочого органа [10].

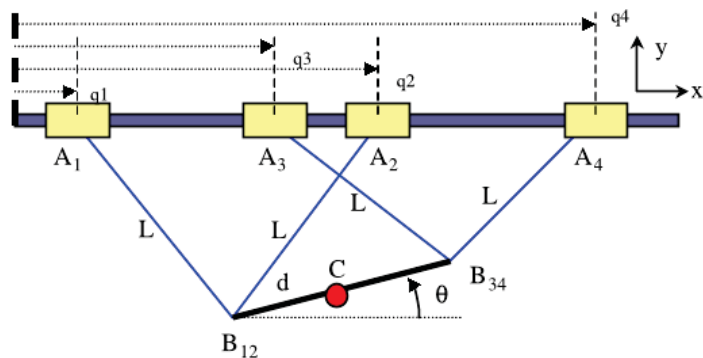


Рисунок 5 – Механізм ARCHI

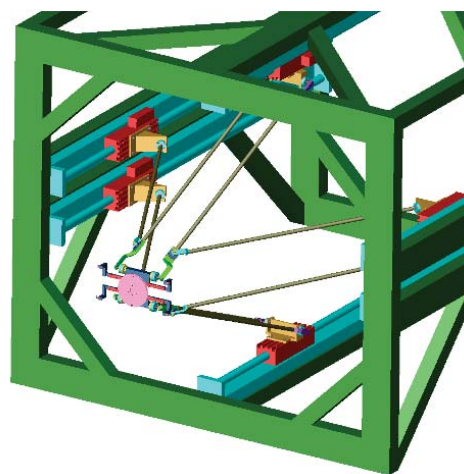


Рисунок 6 – Механізм Eureka

Німецька фірма Metrom [11] випускає багатокоординатні верстати паралельної структури із спеціальним робочим органом, у якому спільна вісь шарнірних опор одночасно є віссю шпинделя, який має п'ять ступенів вільності. Наприклад, п'ятикоординатний фрезерний верстат P1000 (рис. 5), на якому можна здійснювати точіння, фрезерування, обробку фрезеруванням поверхонь обертання, точіння та фрезерування некруглих поверхонь обертання. Кінематичні характеристики таких верстатів розглянуті у [12]. Основними недоліками слід вважати обмежену рухомість робочого органа та порівняно низьку жорсткість на краях робочої зони, обумовлені наявністю особливих положень.

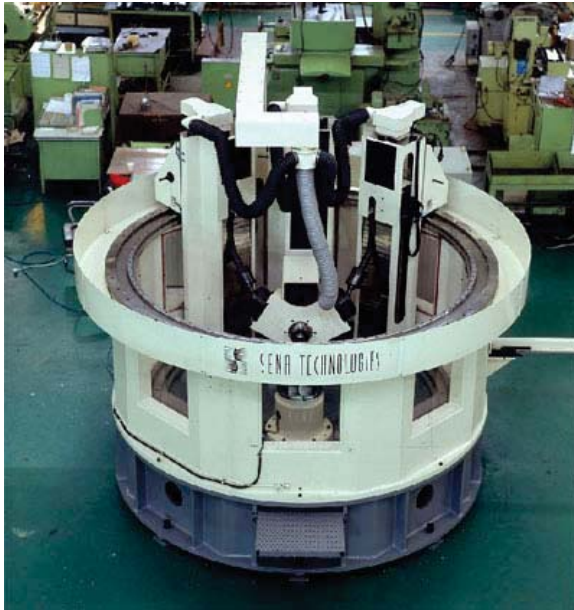


Рисунок 3 – Прототип верстата Eclipse
(Південна Корея)



Рисунок 4 – Промисловий верстат P1000
фірми Metrom (Німеччина)

Відомі розробки щодо застосування надлишкових приводних ланок для усунення особливих положень платформи Гауфа-Стюарта [15], проте дослідження надлишкових механізмів із спеціальними робочими органами відсутні.

Метою роботи є розробка багатокоординатного надлишкового механізму паралельної структури з 5 ступенями вільності 2R3T (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з розширеними можливостями орієнтації внаслідок виключення особливих положень за рахунок використання надлишкових приводів і спеціальної конструкції робочого органа, для використання у верстатах паралельної структури.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є багатокоординатні верстати паралельної структури з надлишковими приводами та спеціальним робочим органом.

Для використання принципу надлишковості приводів у багатокоординатному обладнанні розроблено схему верстата паралельної структури з 5 керованими координатами і 6 приводами штанг змінної довжини, який має спеціальний робочий орган з спільною віссю шарнірних опор (рис. 5).

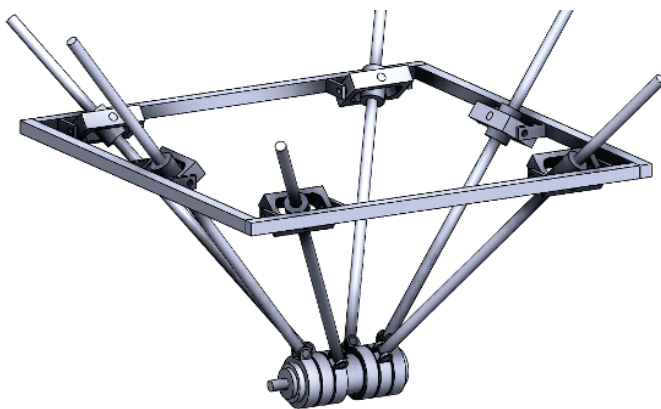


Рисунок 5 – Схема багатокоординатного верстата з
надлишковим приводом

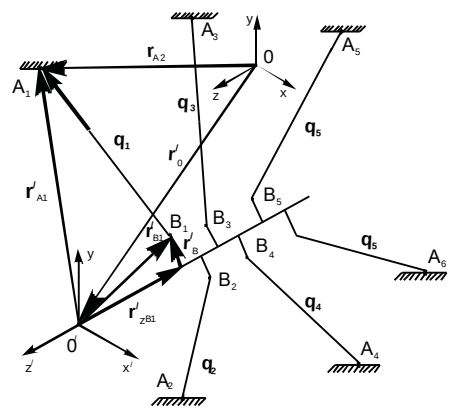


Рисунок 6 – Геометрична схема

Робочий орган верстата з'єднується з основою шістьма ланками змінної довжини, причому шарніри робочого органа мають спільну вісь, яка співпадає з віссю шпинделя верстата. Використання спеціального робочого органа дозволяє забезпечити надлишковість механізму паралельної структури вже при кількості приводів 6, тоді як для надлишкової платформи Гауфа-Стюарта необхідно хоча б 7 приводних ланок.

Відповідно до схеми (рис. 6) довжина ланок у зворотних кінематичних залежностях визначається аналогічно [12]:

$$l_i = \left| R \cdot \left(z_{B_i} - \frac{(z_{A_i} - z_{B_i}) \cdot \mathbf{r}_{B_i}}{\sqrt{x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2} - \mathbf{r}_{B_i}} \right) + \mathbf{r}_0 \right| - \mathbf{r}_{A_i}, \quad (1)$$

де R – матриця повороту системи координат робочого органа відносно системи координат основи;

$x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}$ – координати центрів A_i шарнірів основи;

z_{B_i} – координати центрів B_i шарнірів робочого органа;

$\mathbf{r}_{B_i}$ – радіус-вектор точки B_i в абсолютній системі координат основи.

$\mathbf{r}_0$ – радіус-вектор початку координат робочого органа в системі координат основи;

$\mathbf{r}_{A_i}$ – радіус-вектор точки A_i у системі координат основи.

Таким чином, зворотні кінематичні залежності мало відрізняються від залежностей пентапода, але матриця похідних зворотної кінематичної функції має розмірність 5×6 .

Отримання прямих кінематичних залежностей, необхідних для можливості управління верстатом від ЧПУ, можливе чисельним методом (ітерації Ньютон-Рафсона) з врахуванням сумісності руху приводів. Управління треба здійснювати за розрахунком на основі моделі верстата моментом.

Матриця жорсткості надлишкового механізму паралельної структури з спеціальним робочим органом згідно [16] визначається як сума матриць жорсткості шести ланок, що розглядаються як лінійні пружини, та однієї ланки, що розглядається як крутильна пружина:

$$K = \sum_{i=6}^n k_n \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_i \end{bmatrix}^T + k_\kappa \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{r}_B \times \mathbf{n}_6 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

де k_i – жорсткість ланки;

$\mathbf{n}_i$ – одиничний вектор осі штанги змінної довжини.

Результати дослідження. Розроблені варіанти виконання робочого органа з метою розширення орієнтаційного робочого простору та підвищення стабільності просторового положення робочого органа. Варіант розміщення штанг (рис. 5, а) залишає одну з сторін вільною для зручності доступу до деталі, варіант (рис. 5, б) потенційно може забезпечити більшу жорсткість, а варіант (рис. 5, в) має широкі можливості орієнтації робочого органа.

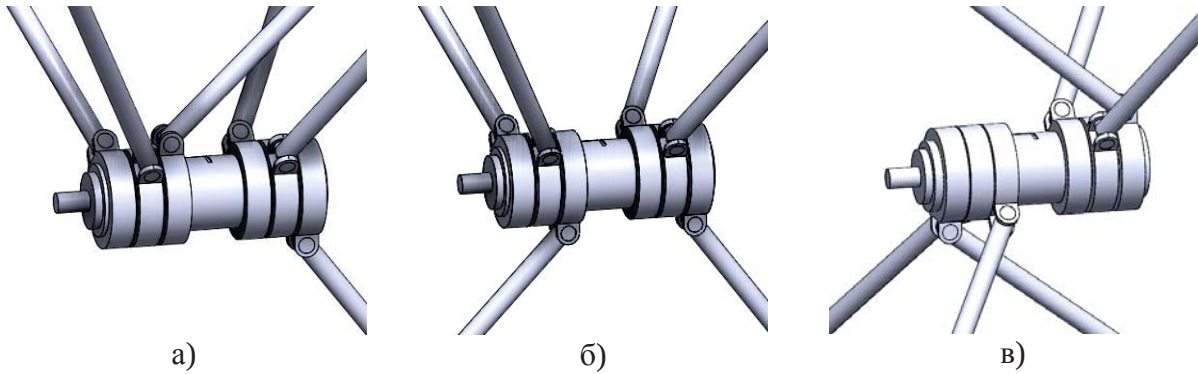
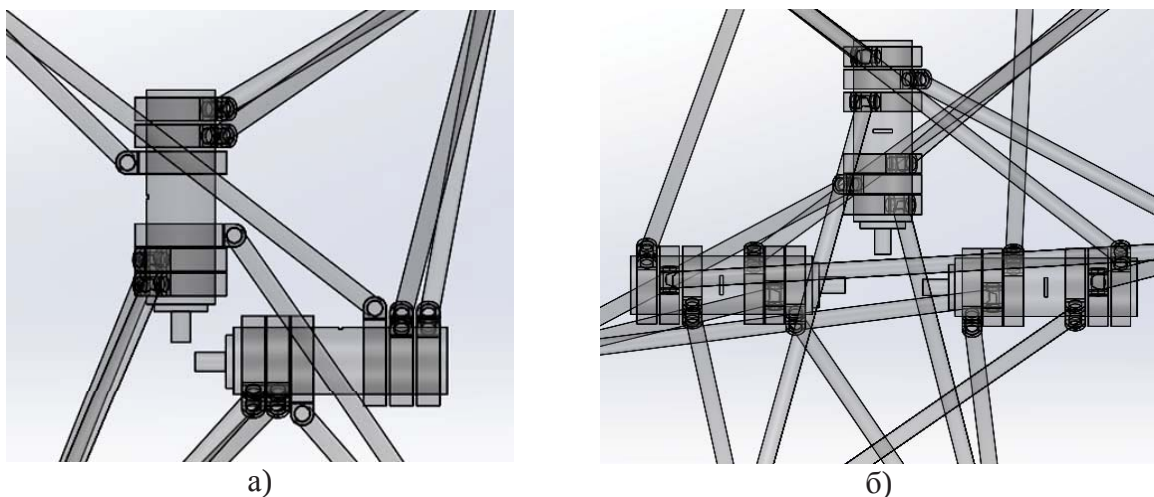


Рисунок 5 – Варіанти виконання з різною орієнтацією штанг відносно робочого органа

Попередні розрахунки та моделювання показують (рис. 6), що за рахунок кінематичної надлишковості приводів механізму та спеціального розміщення шарнірів основи і робочого органа орієнтація робочого органа у вертикальній площині можлива у діапазоні до 120° , а у горизонтальній площині – до 180° в залежності від розташування шарнірних опор.

Надлишковість приводів вимагає точної ідентифікації координат шарнірних опор основи і робочого органа прямим вимірюванням (наприклад, за допомогою координатно-вимірювальної машини) вже на етапі попереднього налаштування верстата для запобігання надлишкових деформацій конструкції верстата внаслідок неузгодженості приводів штанг у статично невизначеному механізмі. Одним із способів усунення невизначеності без втрати корисних властивостей може бути конструктивне забезпечення вільного переміщення однієї із груп шарнірів уздовж осі робочого органа, проте це може привести до зменшення просторової жорсткості.



а) у вертикальній площині; б) у горизонтальній площині

Рисунок 6 – Поворот робочого органа

Висновки.

1. Розроблено багатокоординатний надлишковий механізм паралельної структури з 5 ступенями вільності 2R3T (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з ланками змінної довжини та спеціальним робочим органом, для використання у верстатах паралельної структури, на відміну від існуючих конструкцій,

дозволяє без застосування додаткових механізмів забезпечити діапазон повороту робочого органа відносно двох координатних осей до 120° та 180° відповідно.

2. Особливості надлишкових механізмів обумовлюють значні відмінності кінематичних залежностей, методів розрахунку точності та жорсткості, потребують відповідного уточнення алгоритмів управління, виходу у початкове положення та калібрування верстата.

3. Напрями подальших досліджень включають аналіз прямих кінематичних залежностей верстата, визначення характеристик робочого простору, оцінку показників маніпульованості, обґрунтування раціонального розміщення шарнірних опор для реалізації максимального діапазону кутів орієнтації робочого органа при збереженні керованості просторової структури верстата, оптимізацію конструктивних параметрів для підвищення жорсткості.

Список літератури

1. Starrag Group [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: www.starrag.com.
2. Luces, M. A. Review of Redundant Parallel Kinematic Mechanisms / M. Luces, J. K. Mills, B. Benhabib // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. – May 2017. – Vol. 86, Issue 2. – P. 175-198.
3. Merlet, J-P. Redundant parallel manipulators // *J. of Laboratory Robotic and Automation*. – 1996. – Vol. 8(1). – P. 17-24.
4. Müller, A. On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators // *Robotica*. – 2013. – Vol. 31(1). – P. 137-147.
5. Aref, M. M. Geometrical workspace analysis of a cable-driven redundant parallel manipulator: KNTU CDRPM / M. M. Aref, H. D. Taghirad // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice. – 2008. – P. 1958-1963.
6. Shang, W. Augmented nonlinear PD controller for a redundantly actuated parallel manipulator / W. Shang, S. Cong, Z. Li, S. Jiang // *Advanced Robotics*. – Vo. 23 (12-13). – P. 1725-1742.
7. Müller, A. Consequences of geometric imperfections for the control of redundantly actuated parallel manipulators // *IEEE Trans. Robot.* – 2010. – Vol. 26 (1). – P. 21-31.
8. Sartori, Natal G. Dual-space adaptive control of redundantly actuated parallel manipulators for extremely fast operations with load changes / G. Sartori Natal, A. Chemori, F. Pierrot // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Saint Paul, MN, USA*, pp. 253-258, 2012.
9. Ryu, S.J. ECLIPSE: An Overactuated Parallel Mechanism for Rapid Machining / Ryu, S.J., Kim, J.W., Hwang, J.C., Park C., Ho, H.S., Lee, K., Lee, Y., Cornel U., Park, F.C., Kim, J. // *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – Vol. 8, USA, 1998, pp. 681-689.
10. Kim, J. Eclipse-RP: A new RP machine based on deposition and machining / J. Kim, K. S. Cho, J. Hwang, C. Iurascu, F. C. Park // *J. Multi-body Dyn.* – 2002. – Vol. 216. – P. 13-20.
11. Metrom mechatronische maschinen [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – Режим доступу: www.metrom.com.
12. Кириченко, А. М. Кінематика п'ятикоординатного верстата з паралельною структурою [Текст] / А. М. Кириченко, О. В. Шелепо, С. П. Сапон // *Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки»*. – Чернівці : ЧДТУ, 2013. – № 3 (67). – С. 100-104.
13. Marquet, F. ARCHI, a redundant mechanism for machining with unlimited rotation capacities / F. Marquet, S. Krut, O. Company, F. Pierrot // *Proc. of IEEE ICAR*. – 2001. – P. 683-689.
14. Krut, S. Eureka: A New 5-Degree-of-Freedom Redundant Parallel Mechanism / S. Krut, O. Company, S. Rangasri, F. Pierrot // *Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*. – 2003. – P. 3575-3580.
15. Cao, Y. Singularity Elimination of Stewart Parallel Manipulator Based on Redundant Actuation / Y. Cao, H. Zhou, B. Li, S. Long, M. Liu // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vols. 143-144. – P. 308-312.
16. Кириченко, А. М. Матриця жорсткості просторових механізмів паралельної структури з пружними ланками [Текст] / А. М. Кириченко // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – Вип. 40, ч. I. – С. 256-262.

Andriy Kyrychenko, Prof., DSc., Methaq Alibraheemi, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Multi-axis machine tool with redundant parallel manipulator and custom end effector

The article is aimed to develop a new 5-dof redundant parallel manipulator 2R3T (2 rotational and 3 translational degrees of freedom) with custom end effector to eliminate singularities in the workspace and provide advanced orientation ability for machine tools applications.

The new redundant parallel manipulator with 5 controllable degrees of freedom has 6 variable-length links actuators connected to the end effector with a common axis of joints. A few possible layouts of the machine are proposed, extending the orientation capability of the end effector to 120 deg and 180 deg about two axes respectively. Kinematics and stiffness of the manipulator are considered.

The further research should be aimed to direct kinematics, workspace, manipulation indices, stiffness and geometry optimization, developing a special control algorithms based on a calculated torque to keep the stability and prevent the internal stress in the manipulator structure.

machine tool, parallel manipulator, redundant, end effector

Одержано 16.05.17

УДК 621.644:621.833.15

Ю.В. Кулешков, проф., д-р техн. наук, Є.В. Магонець, асп., К.Ю. Кулешкова, інж., М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
E-mail: krasotamv@ukr.net*

Аналіз теоретичних досліджень геометричних параметрів відсіченої порожнини шестеренного насоса

В статті наведені результати аналізу теоретичних досліджень геометричних параметрів відсіченої порожнини шестеренного насоса. Встановлені теоретичні залежності об'єму відсіченої порожнини від параметрів зубчастого зацеплення, а також від положення точки зацеплення на лінії зацеплення шестерень насоса. Отримані теоретичні залежності дозволяють визначити геометричні параметри відсіченої порожнини, при яких виключається явище компресії робочої рідини. Виключення компресії досягнуто завдяки використанню зубчастого зацеплення з асиметричною лінією зацеплення. В роботі вказані недоліки існуючих теоретичних досліджень і вказані напрямки подальшого їх розвитку.

шестеренний насос, зубчасте зацеплення, лінія зацеплення, точка зацеплення, робоча рідина, відсічена порожнина, компресія, коефіцієнт перекриття зубчастого зацеплення

Ю.В. Кулешков, проф., д-р техн. наук, Є.В. Магонець, асп., К.Ю. Кулешкова, інж., М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

Анализ теоретических исследований геометрических параметров отсеченной полости шестеренного насоса

В статье приведены результаты анализа теоретических исследований геометрических параметров отсеченной полости шестеренного насоса. Установлены теоретические зависимости объема отсеченной полости от параметров зубчатого зацепления, а также от положения точки зацепления на линии зацепления шестерен насоса. Полученные теоретические зависимости позволяют определить геометрические параметры отсеченной полости, при которых исключается явление компрессии рабочей жидкости. Исключение компрессии достигнуто за счет использования зубчатого зацепления с асимметричной линией зацепления. В работе указаны недостатки существующих теоретических исследований и указаны направления дальнейшего их развития.

шестеренный насос, зубчатое зацепление, линия зацепления, точка зацепления, рабочая жидкость, отсеченная полость, компрессия, коэффициент перекрытия зубчатого зацепления

© Ю.В. Кулешков, Є.В. Магонець, К.Ю. Кулешкова, М.В. Красота, Т.В. Руденко, 2017