Аль Ібрахімі Метак М. А.

УДК 62-231:621.9.04

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УЗАГАЛЬНЕНИХ КООРДИНАТ РОБОЧОГО ОРГАНУ БАГАТОКООРДИНАТНОГО ВЕРСТАТУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З НАДЛИШКОВИМ ПРИВОДОМ

М. А. АЛЬ ІБРАХІМІ МЕТАК

Центральноукраїнський національний технічний університет

E-mail: methakmohamed@gmail.com

Анотація. *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 у 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.*

Метою роботи є розширення технологічних можливостей багатокоординатних верстатів паралельної структури введенням надлишкових приводів.

Дослідження ґрунтуються на основних положеннях теорії різання матеріалів, теорії проектування металорізального обладнання, кваліметрії, дослідженні операцій та прийняття рішень.

У результаті отримано математичну модель, що призначена для розрахунку довжин штанг верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур і позицій робочого органу під час обробки деталі.

При диференціюванні отриманої моделі за часом отримуються швидкості і прискорення штанг робочого органу верстату, а при контурному керуванні розрахунок нових позицій інструменту робочого органу може йти безперервно з дробленням за часом на певний крок, або вихідна траєкторія може розраховуватись заздалегідь у вигляді масиву даних з подальшим завантаженням у контролер, чого не можна робити в інших існуючих верстатах.

Ключові слова: *багатокоординатний верстат, надлишковий привід, паралельна структура*

Аль Ібрахімі Метак М. А.

Актуальність.

Високошвидкісна обробка є одним з основоположних підходів у підвищенні продуктивності праці і якості одержуваних деталей в машинобудівному виробництві [1]. Високошвидкісна обробка отримала розвиток в різних сферах промисловості, яка підвищує міцність, знижує вагу конструкції і підвищує надійність. Процес складання при переході до монолітних деталей істотно спрощується і значно знижується трудомісткість пригоночних та слюсарно-складальних робіт. Зазначені тенденції вимагають створення металорізальних верстатів з новими функціональними можливостями, що забезпечують високу швидкість знімання металу за чорнової обробки металів і сплавів, високу якість поверхні і точність обробки; при фінішних операціях відсутність суттєвих вібрацій при обробці (вібрації в процесі різання негативно впливають на довговічність і надійність роботи деталі в процесі експлуатації) [2, 3]. 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.

Таких показників можна досягти, використовуючи для обробки багатокомпонентні 5-осьові паралельні верстати з надлишковими приводами [3. 4]. Однак і такі багатокомпонентні верстати потребують вдосконалення та розширення орієнтаційних можливостей.

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 та публікацій. Над питаннями вдосконалення та проектування металорізальних верстатів працювало багато вітчизняних та зарубіжних учених і інженерів, праці яких представляють значний інтерес, та є основою проведення багатьох досліджень у цьому напрямку. Великий внесок у питання, пов'язані з проектуванням, експлуатацією, моделюванням приводів та шпиндельних вузлів металорізальних верстатів зроблений: Андрєєвим А.Г., Заблонським К.І., Івахненком А.Г., Решетовим Д.Н., Кобринським А.А., Козловим В.В., Бржозовським Б.М. Пашкевичем А.П., Асадою Х., Пейсахом Е.Е., Opitz H., Weck M., Tlusty J. и Teipel K.

Питаннями аналізу компоновок металорізальних верстатів і їх характеристик у робочому просторі займалися такі вчені, як Врагов Ю.Д., Кириченко А.М. Авер'янов О.І., Воронов А.Л., Бржозовський Б.М., Кирилін Ю.В., Маслов Г.В., Alizade R.I., Tagiyev N.R., Aref M.M., Azulay H., Mahmoodi M., Zhao R., Mills J.K., Behi F., Ben-Horin P., Shoham M., Bohigas O., Manubens M., Bonev I.A. та багато інших.

Моделюванням вихідної точності верстатів з урахуванням впливів різних компоновок займалися: Решєтов Д.М., Базров Б.М., Кузнєцова А.П., Altintas Y., Yoshikawa T., Tlusty J., Wang L.T., Ravani B. та інші.

Широкого застосування в машинобудуванні знайшли вертикальні 5-ти координатні верстати, що мають координати X, Y, Z, A, C. Типовим представником таких верстатів є мод. CFV5 фірми Cincinnati Machine Ltd. CFV5, мод. Automax Horizontal High Speed Plate Mill – це 5-осьовий вертикальний обробний центр, який ідеально підходить як для п'ятисторонньої обробки, так і для виготовлення прес-форм і шаблонів із застосуванням шпиндельної головки з кулько-гвинтовою передачею [5-7].

Верстат мод. ECO SPEED, що призначений для високошвидкісної обробки великогабаритних деталей з алюмінієвих сплавів з суцільних заготовок (плит) середнього розміру, має високу точність обробки (розмір, форма, розташування) і високу якість поверхні, що виключають наступні слюсарно-пригоночні і полірувальні роботи до і в процесі складання виробів [6].

Обробний центр Verne від Fatronik являє собою 5-осеву гібридну паралельну кінематичну машину, шпиндельна головка якої знаходиться на паралельному модулі DOF, а відрядна частина розміщена на поворотному столі, який має підмножину зсувів, розмірності 2, які створюються добутком двох

незалежних обертань навколо осі A і C [7].

У роботах [4, 8-10] розглянуто і запропоновано 5-осьовий паралельний верстат з надлишковими приводами. Розроблений багатокоординатний верстат на основі надлишкового механізму паралельної структури має 5 ступенів вільності 2R3T (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з розширеними можливостями орієнтації, що досягається виключенням особливих положень за рахунок використання надлишкових приводів і спеціальної конструкції робочого органа, для використання у верстатах паралельної структури. 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. 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. Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур містить станину, механізми подачі шести штанг, які пов'язані з вихідним органом. Вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з трьома степенями вільності. При цьому три штанги приєднується до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інші три штанги приєднуються до іншої частини вихідного органа.

Метою роботи є розширення технологічних можливостей багатокоординатних верстатів паралельної структури введенням надлишкових приводів.

Методи. Дослідження ґрунтуються на основних положеннях теорії різання матеріалів, теорії проектування металорізального обладнання, кваліметрії, дослідженні операцій та прийняття рішень.

Результати. Розглянемо можливості розширення технологічних можливостей багатокоординатного верстата з надлишковим механізмом паралельної структури та

спеціальним робочим органом [8, 11].

Точки кріплення штанг на основі верстата утворюють правильний шестикутник з радіусом описаного кола Ra (рис. 1).

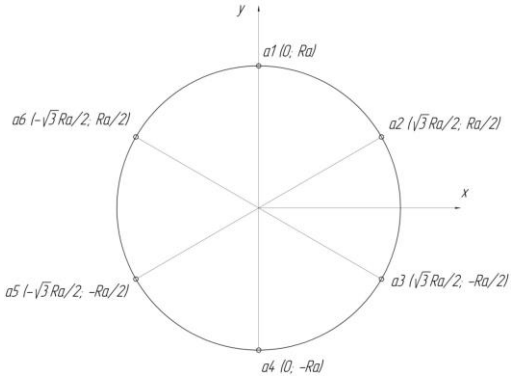

Рис. 1. Схема кріплення штанг до основи у площині XOY для визначення координат

Тоді, відповідно до наведеної схеми, радіус-вектори точок основи визначатимуться:

$$r_{a1} = (0; Ra; -z_{a1}); r_{a2} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}Ra; \frac{Ra}{2}; -z_{a2}\right);$$

$$r_{a3} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}Ra; -\frac{Ra}{2}; -z_{a3}\right); r_{a4} = (0; -Ra; -z_{a4});$$

$$r_{a5} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}Ra; -\frac{Ra}{2}; -z_{a5}\right); r_{a6} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}Ra; \frac{Ra}{2}; -z_{a6}\right). \quad (1)$$

Для випадку, коли точки кріплення штанг до основи a_i знаходяться в одній площині, тоді координати z_{ai} можуть бути суміщені з початком координат, і значення радіус-векторів точок основи будуть дорівнювати 0. При пересуванні точок кріплення штанг a_i на основі, їх координати будуть визначатись виключно зміною значень z_{ai}. Точки b_i в рухомій системі координат робочого органа будуть задаватись радіус-векторами ρ_{bi}. Відповідно до рис. 2, непарні точки штанг будуть з'єднуватись з однією частиною робочого органу, що має радіус Rb, а парні – з іншою, що має радіус Rb'.

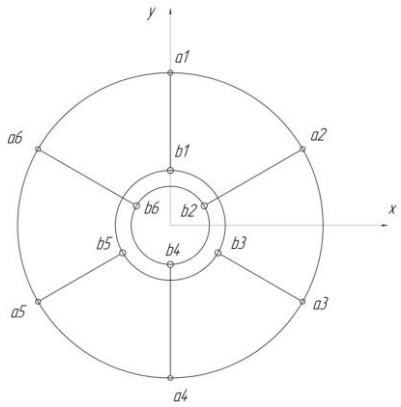

Рис. 2. Схема по визначенню координат робочого органу

Тоді, ураховуючи радіус-вектори точок b_i в рухомій системі координат, у початковий момент, коли рухома система координат робочого органу в площині XOY паралельна нерухомій системі координат основи в цій же площині, узагальнені координати точок штанг b_i будуть дорівнювати (при $r_0 = 0$):

$$r_{b1} = (0; Rb;\ -z_{b1});\ r_{b2} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}Rb'; \frac{Rb'}{2};\ -z_{b2}\right);$$

$$r_{b3} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}Rb; -\frac{Rb}{2};\ -z_{b3}\right);\ r_{b4} = (0; -Rb';\ -z_{b4});$$

$$r_{b5} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}Rb; -\frac{Rb}{2};\ -z_{b5}\right);\ r_{b6} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}Rb'; \frac{Rb'}{2};\ -z_{b6}\right). \qquad (2)$$

Аналітична геометрія в просторі описує довжину довільного відрізка АВ з координатами відомим рівнянням, тому узагальнені координати у вільний момент часу будуть описуватися наступною системою:

$$\begin{cases} q_1 = \sqrt{(x_{b1} - x_{a1})^2 + (y_{b1} - y_{a1})^2 + (z_{b1} - z_{a1})^2}; \\ q_2 = \sqrt{(x_{b2} - x_{a2})^2 + (y_{b2} - y_{a2})^2 + (z_{b2} - z_{a2})^2}; \\ q_3 = \sqrt{(x_{b3} - x_{a3})^2 + (y_{b3} - y_{a3})^2 + (z_{b3} - z_{a3})^2}; \\ q_4 = \sqrt{(x_{b4} - x_{a4})^2 + (y_{b4} - y_{a4})^2 + (z_{b4} - z_{a4})^2}; \\ q_5 = \sqrt{(x_{b5} - x_{a5})^2 + (y_{b5} - y_{a5})^2 + (z_{b5} - z_{a5})^2}; \\ q_6 = \sqrt{(x_{b6} - x_{a6})^2 + (y_{b6} - y_{a6})^2 + (z_{b6} - z_{a6})^2}; \\ q_7 = \gamma. \end{cases} \qquad (3)$$

Кут повороту робочого органу γ задається опосередковано, без додаткових розрахунків, оскільки здійснюється від окремого приводу. Координати шарнірів робочого органу x_{bi}, y_{bi}, z_{bi} у довільний момент часу розраховуються на основі його необхідного положення в

просторі по відношенню до оброблюваної деталі, яке можна задати наступними величинами:

- координатами робочого органу (інструменту) x_i, y_i, z_i в декартовій системі координат;

- координати вектора повороту робочого органу навколо осі PR – x_{pr}, y_{pr}, z_{pr};

- кут повороту робочого органу β.

Знаючи вихідні координати точок кріплення штанг r_{ai} до основи (вираз (1)) та знаючи початкові координати точок робочого органу r_{bi} (x_{b0i}, y_{b0i}, z_{b0i}) (вираз (2), система рівнянь (3) перетворюється в систему рівнянь для розрахунку узагальнених координат інструменту робочого органу в залежності від необхідних його переміщень (x_i, y_i, z_i, β, PR) у наступному вигляді (у загальному вигляді):

$$q_i = \Big(\Big(\big(cos\beta + (1-cos\beta)x_{pr}^2\big)x_{b0i} + \big((1-cos\beta)x_{pr}y_{pr} + sin\beta z_{pr}\big)y_{b0i} + \\ + \big((1-cos\beta)x_{pr}z_{pr} + sin\beta y_{pr}\big)z_{b0i} + x_i - x_{ai}\Big)^2 + \\ + \Big(\big((1-cos\beta)x_{pr}y_{pr} + sin\beta z_{pr}\big)x_{b0i} + \big(cos\beta + (1-cos\beta)y_{pr}^2\big)y_{b0i} + \\ + \big((1-cos\beta)y_{pr}z_{pr} - sin\beta x_{pr}\big)z_{b0i} + y_i - y_{ai}\Big)^2 + \\ + \Big(\big((1-cos\beta)x_{pr}z_{pr} - sin\beta y_{pr}\big)x_{b0i} + \big((1-cos\beta)z_{pr}y_{pr} + sin\beta x_{pr}\big)y_{b0i} + \\ + \big(cos\beta + (1-cos\beta)z_{pr}^2\big)z_{b0i} + z_i - z_{ai}\Big)^2\Big)^{1/2}, \qquad i = 1,2,3,4,5,6. \qquad (4)$$

У наведеній системі (4) узагальнені координати $q_1, q_2, \ldots, q_6$ задаються функцією кута повороту β навколо вісі PR, із заданими координатами x_{pr}, y_{pr}, z_{pr} при відповідній орієнтації переміщень робочого органу верстату. Підхід до положення робочого органу зручний, оскільки під час юстування необхідно проводити поворот робочого органу з інструментом навколо вісі оброблюваної деталі на такий кут, щоб його вісь співпадала з віссю робочого органу. Для даного випадку – вісь PR є віссю оброблюваної деталі, а кут β є таким, що забезпечує необхідний поворот. Крім того, система рівнянь призначена для розрахунку довжин штанг верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур і позицій робочого органу під час обробки деталі.

Висновки і перспективи. У роботі досліджено можливості розширення технологічних можливостей багатокоординатних верстатів паралельної структури введенням надлишкових приводів. При цьому отримано математичну модель (4), що призначена для розрахунку довжин штанг верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур і

позицій робочого органу під час обробки деталі. Ключовими особливостями системи рівнянь (4) кінематики верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур є: власне обертання q_7 визначається потрібним кутом повороту робочого органу, тому для визначення q_7 не потрібно будь-яких обчислень, а його величина не обмежується особливостями кінематики досліджуваного верстату (забезпечується окремим приводом); рівняння для узагальнених координат $q_1, q_2, \ldots, q_6$ спрощується, оскільки власне обертання не є ступенем рухливості досліджуваного верстата, а матриця повороту не враховує його; при орієнтації переміщень робочого органу верстату, рівняння для узагальнених координат $q_1, q_2, \ldots, q_6$ задаються функцією кута повороту β навколо вісі PR, що задана координатами x_{pr}, y_{pr}, z_{pr}. Підхід до положення робочого органу зручний, оскільки під час юстування необхідно проводити поворот робочого органу з інструментом навколо вісі оброблюваної деталі на такий кут, щоб його вісь співпадала з віссю робочого органу. Для даного випадку – вісь PR є віссю оброблюваної деталі, а кут β є таким, що забезпечує необхідний поворот. Отримана система рівнянь (4) призначена для розрахунків довжин штанг верстата і позицій робочого органу під час обробки деталі. При цьому, знов розраховані значення $q_1, q_2, \ldots, q_7$ завантажуються в контролер системи приводів верстата з подальшою подачею команди на відповідне переміщення штанг їх приводами в необхідну позицію, а потім цикл дій може повторюватись. Для контурного керування за віссю оброблюваної деталі верстатом з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур, можна ввести систему рівнянь, що буде описувати переміщення робочого органу (x_i, y_i, z_i, β, PR) за відповідною функцією часу. Якщо провести диференціювання і подвійне диференціювання системи рівнянь (4) за часом можна отримати швидкості і відповідно прискорення штанг робочого органу верстату. У цьому випадку при контурному керуванні розрахунок нових позицій інструменту робочого органу може йти безперервно з дробленням за часом на певний крок, або вихідна траєкторія може розраховуватись заздалегідь у вигляді масиву даних з подальшим завантаженням у контролер.

Список використаних джерел

1. Aref, M. M., & Taghirad, H. D. Geometrical workspace analysis of a cable-driven redundant parallel manipulator: KNTU CDRPM. In *Intelligent Robots and Systems,*

2008. (2008, September). *IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on* . 2008. IEEE. P. 1958-1963.

2. Borràs, J., Thomas, F., & Torras, C. Architectural singularities of a class of pentapods. *Mechanism and Machine theory*, 2011. *46*(8), 1107-1120.

3. Cao, Y., Zhou, H., Li, B. K., Long, S., & Liu, M. S. (Singularity elimination of Stewart parallel manipulator based on redundant actuation. In *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 143, pp. 308-31.

4. Кириченко А.М., Аль Ібрахімі Метак. Верстат паралельної структури з надлишковими приводами та спеціальним робочим органом. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*. 2017. С. 136-137.

5. Müller A. On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators. *Robotica*. 2013. Vol. 31(1). P. 137-147.

6. Natal, G. S., Chemori, A., & Pierrot, F. Dual-space adaptive control of redundantly actuated parallel manipulators for extremely fast operations with load changes. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* (2012, May). IEEE. 2012, P. 253-258.

7. Sirotkin, R., and N. Serkov. Experimental Researches of Accuracy, Rigidity and dynamic Properties-5-axis Machining Centre Hexamech-1 The 5th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar 2006. April 25-26. Conference Proceedings. *Conference Proceedings. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten*. 2006.

8. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М.А. Робочий простір та особливості 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2018. Вип. 30-31. С. 196-200.

9. Кириченко А.М., Аль Ібрахімі Метак. Багатокоординатний верстат з надлишковим механізмом паралельної структури та спеціальним робочим органом. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2017. Вип. 30. С. 57-64.

10. Гречка А. І., Кириченко А. М., Аль-Ібрахімі Метак М. А. Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами. Патент на корисну модель № 112828. Бюл. № 24. 26.12.2016.

References

1. Aref, M. M., & Taghirad, H. D. (2008, September). Geometrical workspace analysis of a cable-driven redundant parallel manipulator: KNTU CDRPM. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 1958-1963). IEEE.

2. Borràs, J., Thomas, F., & Torras, C. (2011). Architectural singularities of a class of pentapods. *Mechanism and Machine theory*, *46*(8), 1107-1120.

3. Cao, Y., Zhou, H., Li, B. K., Long, S., & Liu, M. S. (2011). Singularity elimination of Stewart parallel manipulator based on redundant actuation. In *Advanced Materials Research* (Vol. 143, pp. 308-312). Trans Tech Publications.

4. Kyrychenko, A.M., Al Ibrakhimi Metak. (2017). Verstat paralelnoyi struktury z nadlyshkovo pryvodamy ta spetsialnim robochym orhanom [Machine-tool of parallel structure with redundant actuators and a special working body]. *Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system*, 136-137.

5. Müller, A. (2013). On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators. *Robotica*, *31*(1), 137-147.

6. Natal, G. S., Chemori, A., & Pierrot, F. (2012, May). Dual-space adaptive control of redundantly actuated parallel manipulators for extremely fast operations with load changes. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 253-258). IEEE.

7. Sirotkin, R., & Serkov, N. (2006). Experimental Researches of Accuracy, Rigidity and dynamic Properties-5-axis Machining Centre Hexamech-1 The 5th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar 2006. April 25-26. Conference Proceedings. In *Conference Proceedings. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten*.

8. Kyrychenko, A. M., Al Ibrakhimi Metak M.A. (2018). Robochyi prostir ta osoblyvosti 5-osovoho paralelnoho verstata z nadlyshkovymy pryvodamy [Workspace and singularities of 5-axis parallel robot with redundant actuation]. *Komp'iuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, *30-31*, 196-200.

9. Kyrychenko, A.M., Al Ibrakhimi Metak. (2017). Bahatokoordinatniy verstat z nadlyshkovim mekhanizmom paralelnoyi struktury ta spetsialnim robochym orhanom [Multi-coordinate machine with redundant mechanism of parallel structure and special working body]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya*, 30, 57-64.

10. Hrechka, A. I., Kyrychenko, A. M., Al-Ibrakhimi Metak M. A. (2016). Pryvid peremishchennia vykhidnoho orhana verstata z shistma shtanhamy / Patent na korysnu model № 112828 [The drive for moving the output of the machine with six rods / Patent for Utility Model No. 112828]. *Biul.*, 24. 26.12.2016.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ РАБОЧЕГО ОРГАНА МНОГОКООРДИНАТНОГО СТАНКА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ИЗБЫТОЧНЫМ ПРИВОДОМ

М. А. Аль Ибрахими Метак

Аннотация. *Перспективной задачей современного станкостроения является создание высокопроизводительных многокоординатных фрезерных станков и обрабатывающих центров со сверхвысокими скоростями и ускорениями, что возможно с использованием механизмов параллельной структуры. Полноценному применению механизмов параллельной структуры в многокоординатных станках со звеньями переменной и постоянной длины препятствуют определенные недостатки, основным из которых*

Аль Ібрахімі Метак М. А.

является ограничение рабочего пространства и углов ориентации рабочего органа вследствие возникновения особых положений. Одним из путей решения этой проблемы является применение избыточных механизмов параллельной структуры, которые потенциально позволяют уменьшить влияние особых положений и принципиально улучшить характеристики рабочего пространства. Таким образом, расширение технологических возможностей многокоординатных станков параллельной структуры является актуальной научной задачей.

Целью работы является расширение технологических возможностей многокоординатных станков параллельной структуры введением избыточных приводов.

Исследования основываются на основных положениях теории резания материалов, теории проектирования металлорежущего оборудования, квалиметрии, исследовании операций и принятия решений.

В результате получена математическая модель, предназначенная для расчета длин штанг станка с шестью штангами на основе параллельных кинематических структур и позиций рабочего органа во время обработки детали.

При дифференцировании полученной модели по времени получаются скорости и ускорения штанг рабочего органа станка. Для случая контурного управления – расчет новых позиций инструмента рабочего органа может идти непрерывно с дроблением по времени на определенный шаг, или исходная траектория может рассчитываться заранее, в виде массива данных с последующей загрузкой в контроллер, чего нельзя делать в других существующих станках.

Ключевые слова: *многокоординатный станок; избыточный привод, параллельная структура*

MATHEMATICAL MODEL OF GENERALIZED COORDINATES OF A WORKING MEMBER OF A MULTI-AXIS MACHINE OF A PARALLEL STRUCTURE WITH AN EXCESS DRIVE

M. A. Al Ibrahimi Metak

Abstract. *A promising task of modern machine-tool construction is the creation of high-performance multi-coordinate milling machines and machining centers with ultra-high speeds and accelerations, which is possible with the use of mechanisms of a parallel structure. The full use of mechanisms of parallel structure in multi-coordinate manipulators with links of variable and constant length is hampered by certain shortcomings, the main of which is the limitation of the working space and the orientation angles of the working organ due to the occurrence of special positions. One way to solve this problem is to use redundant mechanisms of parallel structure that potentially reduce the impact of special provisions and fundamentally improve the characteristics of the workspace. Thus, the expansion of the technological capabilities of multi-axis parallel*

Аль Ібрахімі Метак М. А.

manipulators is an urgent scientific task.

The purpose of the article is to expand the technological capabilities of multi-axis parallel manipulators by introducing redundant drives.

The research is based on the main provisions of the theory of cutting materials, the theory of designing metal cutting equipment, research operations and decision-making.

As a result, a mathematical model has been obtained for calculating the lengths of the bar rods with six bars on the basis of parallel kinematic structures and the positions of the working element during the machining of the part.

When differentiating the obtained model with respect to time, the speeds and accelerations of the bars of the working element of the machine are obtained. For the case of contouring control, the calculation of new positions of the tool of the working element can go continuously with a time fragmentation by a certain step, or the original trajectory can be calculated in advance, as an array of data with subsequent loading into the controller, which cannot be done in other existing manipulators.

Keywords: *multi-axis manipulators; redundant drive, parallel structure*