

УДК 62-231:621.9.04

Кириченко А. М. проф. д.т. н., Аль Ібрахімі Метак М.А. аспірант
Центральноукраїнський національний технічний університет

РОБОЧИЙ ПРОСТІР ТА ОСОБЛИВОСТІ 5-ОСЬОВОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО ВЕРСТАТА З НАДЛИШКОВИМИ ПРИВОДАМИ

Кириченко А.М., Аль Ібрахімі Метак М.А. Робочий простір та особливості 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. Високошвидкісна обробка є одним з основоположних підходів у підвищенні продуктивності праці і якості одержуваних деталей в машинобудівному виробництві, яких можна досягти при використанні для обробки багатокомпонентних 5-осьових паралельних верстатів з надлишковими приводами. У процесі розроблення багатокомпонентних 5-осьових паралельних верстатів одним з головних недоліків є вкрай низький коефіцієнт використання робочого простору. Тому, актуальним стає дослідження робочого простору 5-осьових паралельних верстатів з надлишковими приводами для розробки більш ефективних і продуктивних маніпуляторів. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі щодо існуючих багатокомпонентних 5-осьових паралельних верстатів. Дослідження робочого простору і описання 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами при обробці заготовок. У статті необхідно дослідити робочий простір та особливості розробленого 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. 5-осьові паралельні верстати з надлишковими приводами на основі паралельних кінематичних структур мають найбільший об'єм робочого простору. Положення виконавчого органа під час обробки поверхонь забезпечується зміною довжини кожної кінематичної ланки залежно від геометричної форми поверхні, що обумовлює відповідні траєкторії формоутворюючих рухів інструмента. У роботі досліджено робочий простір та особливості розробленого 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. Показано, що зменшення об'єму робочого простору відбувається за рахунок зменшення його діаметральних розмірів, а також висоти робочого простору.

Ключові слова: робочий простір; паралельний верстат; надлишковий привід, обробка.

Кириченко А. Н., Аль Ібрахімі Метак М.А. Рабочее пространство и особенности 5-осевого параллельного станка с избыточными приводами. Высокоскоростная обработка является одним из основополагающих подходов в повышении производительности труда и качества получаемых деталей в машиностроительном производстве, которые достигаются с использованием для обработки многокомпонентных 5-осевых параллельных станков с избыточными приводами. В процессе разработки многокомпонентных 5-осевых параллельных станков одним из главных недостатков является крайне низкий коэффициент использования рабочего пространства. Поэтому, актуальным становится исследование рабочего пространства 5-осевых параллельных станков с избыточными приводами для разработки более эффективных и производительных манипуляторов. Были рассмотрены последние публикации в открытом доступе относительно существующих многокомпонентных 5-осевых параллельных станков. Исследование рабочего пространства и описание 5-осевого параллельного станка с избыточными приводами при обработке заготовок. В статье необходимо исследовать рабочее пространство и особенности разработанного 5-осевого параллельного станка с избыточными приводами. 5-осевые параллельные станки с избыточными приводами на основе параллельных кинематических структур имеют наибольший объем рабочего пространства. Положение исполнительного органа во время обработки поверхностей обеспечивается изменением длины каждого кинематического звена в зависимости от геометрической формы поверхности и обуславливается соответствующими траекториями формообразующих движений инструмента. В работе исследовано рабочее пространство и особенности разработанного 5-осевого параллельного станка с избыточными приводами. Показано, что уменьшение объема рабочего пространства происходит за счет уменьшения его диаметральных размеров, а также высоты рабочего пространства.

Ключевые слова: рабочее пространство; параллельный станок; избыточный привод, обработка.

Kyrychenko Andriy, Al Ibrahimi Metak M.A. Workspace and singularities of 5-axis parallel robot with redundant actuation. High-speed machining is one of the fundamental approaches to increasing the productivity and quality of the parts produced in the machine-building industry, which are achieved with the use of multi-component 5-axis parallel robot with redundant actuation. In the process of developing multi-component 5-axis parallel robot one of the main disadvantages is the extremely low utilization rate of the workspace. Therefore, it is relevant to study the working space of 5-axis parallel robot with redundant actuation to develop more efficient and productive manipulators. The last publications were publicly available in relation to existing 5-axis parallel robot. Study of the workspace and singularities of a 5-axis parallel robot with redundant actuation when processing blanks. In the article it is necessary to investigate the workspace and singularities of the developed 5-axis parallel robot with redundant actuation. 5-axis parallel robot with redundant actuation based on parallel kinematic structures have the largest amount of workspace. The position of the executive body during the surface treatment is provided by changing the length of each kinematic link, depending on the geometric shape of the surface and is determined by the corresponding trajectories of the shaping movements of the tool. The workspace and singularities of the developed 5-axis parallel robot with redundant actuation are investigated. It is shown that the reduction in the volume of the working space is due to the reduction of its diametrical dimensions, as well as the height of the workspace.

Keywords: workspace; parallel robot; redundant actuation, processing.

Актуальність теми дослідження. Високошвидкісна обробка є одним з основоположних підходів у підвищенні продуктивності праці і якості одержуваних деталей в машинобудівному виробництві. Високошвидкісна обробка отримала розвиток в різних сферах промисловості [1]. Це,

в першу чергу, підвищує міцність, знижує вагу конструкції і підвищує надійність. Процес складання при переході до монолітних деталей істотно спрощується і значно знижується трудомісткість пригонювальних та слюсарно-складальних робіт. Зазначені тенденції вимагають створення металорізальних верстатів з новими функціональними можливостями [2, 3], що забезпечують високу швидкість знімання металу при чорновій обробці 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). Таких показників можна досягти, використовуючи для обробки багатокомпонентні 5-осьові паралельні верстати з надлишковими приводами. Однак і такі багатокомпонентні верстати потребують вдосконалення та розширення орієнтаційних можливостей.

Постановка проблеми. 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. Одним з головних недоліків обладнання, побудованого на основі паралельних структур, є вкрай низький коефіцієнт використання робочого простору [2-4]. У верстатах з традиційними послідовними кінематичними зв'язками всі лінійні переміщення вихідних органів приводу подач пропорційно переносяться на об'єм робочого простору. У механізмах паралельної структури ситуація набагато складніша. Кожна штанга такого механізму повинна забезпечити переміщення робочого органу по всім можливим координатам, при цьому уникнувши особливих положень. Тому, виникає необхідність у дослідженні робочого простору 5-осьових паралельних верстатів з надлишковими приводами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. 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 – це 5-осьовий вертикальний обробний центр, який ідеально підходить як для п'ятисторонньої обробки, так і для виготовлення прес-форм і шаблонів [5, 6]. Верстат може функціонувати з різними шпинделями, системами видалення стружки і подачі охолоджуючої рідини, а також безліччю додаткових пристосувань, що дозволяє його легко адаптувати до різноманітних практичних задач. Вбудований глобусний стіл забезпечує можливість проводити одночасну 5-ти координатну обробку деталей завдяки своїй місткості і гнучкості переміщень. При максимальному навантаженні до 100 кг швидкість обертання осі C на CFV5 може досягати 12000 град / хв, а швидкість повороту осі A – 12000 град / хв.

Горизонтальні 5-ти координатні верстати (X, Y, Z, A, B) для реалізації кутових рухів за координатами A і B оснащуються шпindelною головкою, що представляє собою накладені один на інший поворотні столи. Удосконалюючи цей принцип, фірма Cincinnati Machine Ltd. розробила шпindelну головку, в якій для реалізації рухів кутових нахилів A, B застосовуються кульково-гвинтові передачі (ballscrews) [7]. Шпindelна головка забезпечує нахил шпинделя за координатами A і B в межах +/-40°. Цю конструкцію головки шпинделя фірма Cincinnati Machine Ltd. широко застосовує в своїх 5-ти координатних верстатах, призначених для роботи в різних галузях промисловості.

Такий же принцип покладено в основу роботи головки шпинделя, якою оснащений 5-ти координатний верстат останньої розробки мод. Automax Horizontal High Speed Plate Mill [6]. Діапазон нахилу шпинделя за координатами A і B складає +/-45°. Шпindel має частоту обертання до 24000 об / хв. Діапазон подач – до 40 000 мм / хв. Верстат дозволяє обробляти в монолітних деталях перегородки, товщиною до 0,5 мм. Альтернативним напрямком розвитку конструкцій шпindelних головок 5-ти координатних верстатів для різних сфер промисловості є використання в верстатах механізмів паралельної кінематики.

Ряд зарубіжних фірм направив свої зусилля на створення 5-ти координатних верстатів по структурі P2C3K5 з використанням триподів. Фірма DS Technologie досягла добрих результатів у створенні 5-ти координатних верстатів для високошвидкісної обробки деталей з твердого алюмінію [5]. Свої верстати вона побудувала на базі Z3 модуля з несучим шпинделем. Модуль забезпечує шпindelю 3 переміщення: одне лінійне 670 мм і два кутових +/-40° (нахили шпинделя в двох взаємно перпендикулярних площинах). Конструкція Z3 модуля побудована на базі механізму паралельної кінематики (трипода). Шпindel має потужність 80 кВт і максимальну частоту обертання 30000 об / хв, конус шпинделя HSK-A63 / 80.

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 включають 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, шпindelна 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 приєднуються 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.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Розроблений 5-осьовий паралельний верстат з надлишковими приводами не підлягав описанню особливостей та дослідженню робочого простору при обробці заготовок.

Постановка завдання (цілей статті). У статті необхідно дослідити робочий простір та особливості розробленого 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами.

Виклад основного матеріалу. Можливість реалізації схеми формоутворення заданої поверхні на верстаті залежить від відносної орієнтації траєкторій виконавчих рухів, яка визначається компонуванням обладнання та наявністю допоміжних рухів, що дозволяють змінювати взаємне розташування виконавчих органів.

Робочий простір у верстатах з традиційними послідовними кінематичними зв'язками буде зменшуватися за рахунок відстані між вершиною інструмента та віссю обертання вихідної ланки. У механізмах паралельної структури всі переміщення повинні забезпечуватися за рахунок переміщення повзунів штанг або зміни їх довжини. Таким чином постає питання, що ж розглядати у якості об'єму робочого простору. Щодо верстатів з традиційною кінематикою, то під робочим простором розуміється просторова сукупність всіх можливих положень інструмента. У механізмах паралельної структури виділяють декілька зон можливого розташування інструмента [3, 9, 10]. Для коректного порівняння даних характеристик між верстатами з традиційною кінематикою та з паралельною кінематикою, очевидно щодо останніх, необхідно використовувати робочий простір (а відповідно і його розміри) з повною заданою рухомістю вихідного органа. Для таких верстатів це складна задача, оскільки робочий простір повинен вмістити і сам робочий орган з інструментом, і заготовку. За розрахованих значень коефіцієнта використання робочого простору навіть незначне зростання об'єму робочого простору призводитиме до помітного збільшення габаритів верстата в цілому. Звичайно, можна піти екстенсивним шляхом і збільшити довжину штанги. В такому випадку коефіцієнт використання робочого простору виросте, однак зростуть і габарити верстата.

Часткове вирішення цієї задачі можна знайти у використанні комбінації механізмів для надання руху подачі як інструменту, так і заготовці [11]. Практично будь-який вузол, що надає

один елементарний рух (як лінійний, так і кутовий), можна розглядати як механізм паралельної структури з переміщенням по одній координаті. Таке порівняння коректне, оскільки той же повзун у механізмах зі штангами постійної довжини є саме таким вузлом.

Припустимо, що проблема неефективності забезпечення необхідних розмірів робочого простору верстатів з паралельними кінематичними структурами з повною заданою рухомістю вихідного органу приводу подачі напряму залежить від кількості штанг, що приводять його у рух. Відомо, що для забезпечення переміщень по n координатам у механізмі паралельної структури повинно бути як мінімум стільки ж рухомих штанг. Якщо ж зменшити кількість штанг, то задача забезпечення необхідних розмірів робочого простору для верстатів з паралельними кінематичними структурами спроститься.

Відсутні при цьому координати переміщення інструменту пропонується надати заготовці. Розглянемо випадок шестикоординатного механізму паралельної структури, з якого будемо виключати ту чи іншу координату переміщення інструменту та надавати її заготовці. Довільно обираємо початкове положення інструменту вертикально зверху над закріпленою на столі з горизонтальною площиною заготовкою. У випадку нерухої заготовки інструмент повинен мати доступ до всіх поверхонь заготовки, окрім площини кріплення. Відтак його лінійні переміщення по трьом координатам повинні перекривати розміри заготовки, а повороти навколо осей X та Y відносно початкового положення інструменту повинні становити 180° з підходами до відповідних площин обробки. У випадку використання обертового осьового інструменту для обробки різанням поворот робочого органу навколо осі інструмента є скоріше «певним доповненням», аніж технологічною необхідністю.

Розглянемо чотири рухи, які можна надати вихідному органу, на якому закріплена заготовка. Це поворот навколо осі інструмента та перпендикулярної до неї осі, прямолінійні рухи вздовж даних осей. Відсутні у розгляді два рухи кінематично-подібні випадку прямолінійного переміщення та повороту навколо перпендикулярної до осі інструмента осі.

Перший випадок – заготовка може обертатися навколо осі прийнятого початкового положення інструменту. Це призводить до суттєвого скорочення можливої кутової орієнтації інструмента навколо заданої точки робочого простору. Так, у випадку нерухої заготовки інструмент повинен знаходитись у півсфері навколо даної точки. У випадку обертання заготовки, інструмент повинен знаходитись лише у $1/8$ сфери навколо заданої точки робочого простору. Інші поверхні заготовки, необхідні для обробки, будуть надані у зоні обробки шляхом повороту.

Другий випадок – заготовка може обертатися навколо осі, перпендикулярної до прийнятого початкового положення інструменту. Це також призводить до скорочення можливої кутової орієнтації інструмента навколо заданої точки робочого простору, однак удвічі меншої від попереднього випадку.

Третій випадок – заготовка здійснює рух подачі вздовж осі прийнятого початкового положення інструменту. В такому випадку лінійні переміщення інструменту можуть відбуватися лише у площині, але оскільки за поставленими умовами необхідно забезпечувати поворот навколо осей системи координат, переміщення всіх шарнірів робочого органу по одній чи рівнобіжним площинам не відбувається, і спрощення кінематики руху мінімальне. Вагомим зиском залишається обробка високих заготовок.

Четвертий випадок – заготовка здійснює рух подачі вздовж осі, перпендикулярної до прийнятого початкового положення інструменту. Цей випадок подібний до попереднього, з певною відмінністю у кінематиці. Ефект полягає у можливості обробки довгих заготовок.

Зміна умов роботи 5-осьового верстата з комбінованим механізмом паралельної структури при наданні заготовці переміщення вздовж однієї з координат при відповідному вилученні такого руху у робочого органу з інструментом показує, що найбільш доцільною з точки зору спрощення кінематики є схема з обертанням заготовки у горизонтальній площині навколо початкового вертикального розташування інструменту.

Надання заготовці лінійних переміщень дозволяє збільшити робочий простір, що підвищує ефективність конструкції верстата при обробці довгих заготовок.

5-осьові паралельні верстати з надлишковими приводами на основі паралельних кінематичних структур мають найбільший об'єм робочого простору. Зменшення об'єму робочого простору відбувається за рахунок зменшення його діаметральних розмірів (D), а також висоти (H) робочого простору (рис. 1).

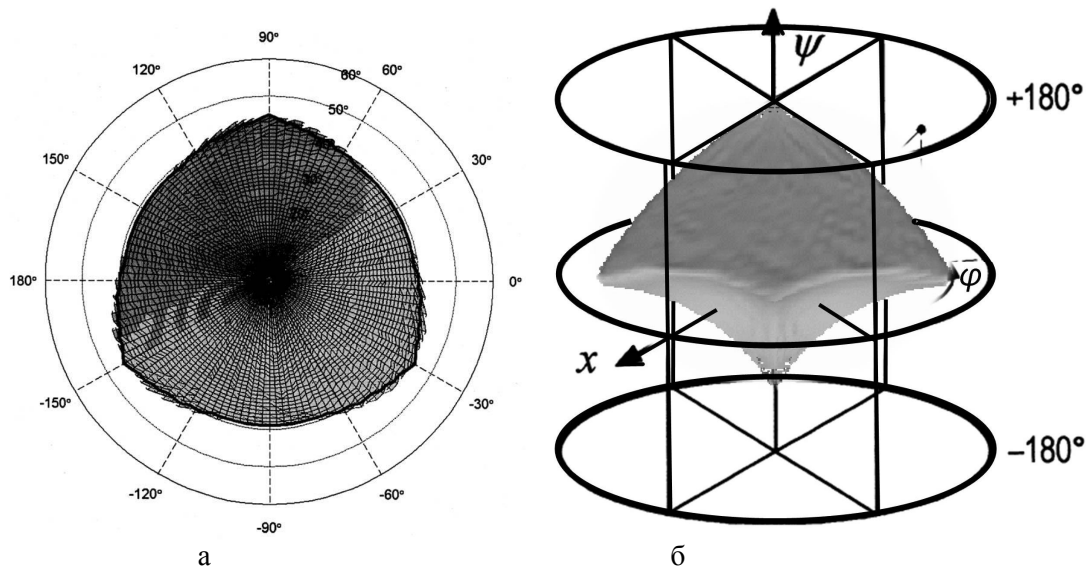


Рисунок 1. Робочий простір 5-осьового паралельного робота з надлишковими приводами на основі паралельних кінематичних структур: а – вид зверху; б – головний вид

Найбільший діаметр при найменшій висоті має 5-осьовий паралельний робот з надлишковими приводами на основі паралельних кінематичних структур. Поточне положення виконавчого органа під час обробки поверхонь забезпечується зміною довжини кожної кінематичної ланки залежно від геометричної форми поверхні, що обумовлює відповідні траєкторії формоутворюючих рухів інструмента.

Висновки відповідно до статті. У роботі досліджено робочий простір та особливості розробленого 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. Показано, що зменшення об'єму робочого простору відбувається за рахунок зменшення його діаметральних розмірів, а також висоти робочого простору. Положення виконавчого органа 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами під час обробки поверхонь забезпечується зміною довжини кожної кінематичної ланки залежно від геометричної форми поверхні, що обумовлює відповідні траєкторії формоутворюючих рухів інструмента.

1. 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.
2. Borras, J. Architectural singularities of a class of pentapods / Borras, J., Thomas, F., Torras, C. // *Mechanism and Machine Theory*, Issue 46 (8), 2011. – P. 1107-1120.
3. 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.
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. 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.
7. Sirotkin, R., Serkov N. 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. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2006, pp.
8. Кириченко А. М., Гречка А. І., Аль-Ібрахімі Метак М. А. Визначення ефективної схеми верстата комбінованої структури // *Сучасні технології промислового комплексу*. – ХНТУ, Херсон. – 2016. – С. 57-60.
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. Кириченко, А. М. Кінематика п'ятикоординатного верстата з паралельною структурою [Текст] / А. М. Кириченко, О. В. Шелепко, С. П. Салон // *Вісник ЧДГУ. Серія «Технічні науки»*. - Чернівці : ЧДТУ, 2013. - № 3 (67). - С. 100-104.
11. 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.