

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/01>

Лукашенко В.А.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Бернацький А.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Бондарєва В.І.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Гардер Д.А.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Набок Т.М.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Курило В.А.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Бацак А.М.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Гринь А.П.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Лукашенко В.М.

Черкаський державний технологічний університет

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ БАГАТООСЬОВОГО МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ

У сучасному машинобудуванні та високотехнологічному виробництві лазерне зварювання займає провідне місце завдяки своїм перевагам – високій точності, мінімальній зоні термічного впливу, можливості автоматизації та забезпеченню високої якості зварних з'єднань. Одним із ключових елементів роботизованих систем лазерного зварювання є багатоосьовий маніпулятор, який забезпечує просторове позиці-

© Лукашенко В.А., Бернацький А.В., Бондарєва В.І., Гардер Д.А.,
Набок Т.М., Курило В.А., Бацак А.М., Гринь А.П., Лукашенко В.М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

онування лазерного випромінювача. Від вибору його кінематичної схеми залежать точність, надійність та ефективність усього процесу. Однак на сьогодні відсутня універсальна методика, яка дозволяє обґрунтовано визначати оптимальну структуру маніпулятора з урахуванням специфічних вимог лазерного зварювання, таких як стабільність швидкості руху, жорсткість конструкції, уникнення зон теплових деформацій та робота з деталями складної просторової форми. Метою дослідження є обґрунтувати та розробити науково-методичний підхід до вибору оптимальної кінематичної схеми багатоосевого маніпулятора для процесів лазерного зварювання, який забезпечує необхідну точність позиціонування, жорсткість конструкції та ефективність технологічного процесу з урахуванням особливостей зварювання виробів складної геометрії та вимог сучасного автоматизованого виробництва. У роботі проведено аналіз сучасних конструкцій промислових роботів, включаючи серійні, паралельні та гібридні кінематичні структури. Розглянуто вплив кількості ступенів свободи, конфігурації ланок та розташування приводів на робочу зону, точність та динамічні характеристики маніпулятора. Запропоновано систему критеріїв оцінювання, яка включає технологічні, конструктивні та експлуатаційні показники. Для перевірки запропонованих рішень використано методи комп'ютерного моделювання, що дозволили оцінити кінематичні та силові параметри різних варіантів конструкцій. Результати дослідження показали, що оптимізація кінематичної структури дає змогу підвищити точність позиціонування та знизити енерговитрати, а також забезпечити стабільність процесу формування зварного шва. Розроблений підхід може бути використаний на етапі проектування роботизованих комплексів для лазерного зварювання у машинобудівній, авіаційній та автомобільній галузях. Практична значущість роботи полягає у можливості створення конкурентоспроможних систем автоматизованого зварювання з покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: лазерне зварювання, багатоосевий маніпулятор, кінематична схема, робототехнічні системи, точність позиціонування.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції у виробництві характеризуються зростанням вимог до якості зварних з'єднань, підвищенням продуктивності та гнучкості технологічних процесів. Лазерне зварювання завдяки високій точності, мінімальній зоні термічного впливу та можливості автоматизації, широко застосовується у приладобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловості. Однак ефективність цього процесу значною мірою залежить від вибору конструкції та кінематичної схеми маніпулятора, що забезпечує точне позиціонування лазерного випромінювача у просторі.

Вибір кінематичної схеми багатоосевого маніпулятора є складною інженерною задачею, яка вимагає врахування ряду суперечливих факторів: необхідної кількості ступенів свободи, габаритних обмежень, робочої зони, динамічних характеристик, точності та жорсткості конструкції. Традиційні підходи часто базуються на використанні стандартних промислових роботів, які не завжди оптимально пристосовані до специфіки лазерного зварювання, зокрема при зварюванні складнопрофільних деталей або великогабаритних виробів. Це призводить до перевитрат енергії, зниження точності позиціонування та збільшення вартості обладнання.

Відсутність чітких методик вибору оптимальної кінематичної структури ускладнює процес проектування роботизованих систем для лазерного зварювання. У наукових дослідженнях пере-

важає розгляд окремих аспектів, наприклад, динамічних характеристик або алгоритмів керування, тоді як комплексний підхід до аналізу та вибору кінематичної схеми залишається недостатньо розробленим. Це створює науково-технічну проблему, яка полягає у необхідності розроблення методики та критеріїв для визначення оптимальної кінематичної структури багатоосевого маніпулятора з урахуванням вимог процесу лазерного зварювання.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена потребою у підвищенні точності та ефективності лазерного зварювання шляхом обґрунтованого вибору кінематичної схеми маніпулятора, що дозволить створювати конкурентоспроможні роботизовані системи для сучасного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень показує, що наукова спільнота переходить від традиційного вибору виключно серійних роботів до більш гібридних підходів, які поєднують серійні та паралельні кінематичні ланцюги з метою одночасного забезпечення великої робочої зони та підвищеної жорсткості й точності – це підтверджують огляди останніх років [1, с. 7-9; 2, с. 1685-1687; 3, с. 1-2].

Зростає увага до проектування паралельно-серійних (hybrid) маніпуляторів і квазі-серійних архітектур, як компромісу між досяжністю та характеристиками жорсткості конструкції, що особливо важливо для лазерного зварювання, де критичні і точність позиціонування, і стабіль-

ність термічного впливу [4, с. 223-224; 5, с. 1-2; 6, с. 5966-5967].

Одночасно інтенсивно розвиваються методи моделювання та ідентифікації жорсткості конструкцій (FEA, VJM та ін.), які дозволяють прогнозувати деформації під навантаженням і компенсувати похибки позиціонування – ключовий аспект для збереження якості зварних швів [7, с. 3-6; 8, с. 1633; 9, с. 11-12].

У галузі планування траєкторій і керування помітним є зсув у бік підходів, що враховують надмірність кінематики й використовують сучасні алгоритми (оптимізація, гібридні методи, глибоке навчання) для безколізійного, гладкого та енергоефективного руху з підтримкою стабільного формування шва [10, с. 1900-1901; 11, с. 1-2].

Нарешті, роботи з глобальних методів зворотної кінематики та оптимізації руху для надмірних систем демонструють практичні шляхи інтеграції додаткових ступенів свободи з критеріями мінімізації енерговитрат і мінімізації торсійних навантажень на вузли, що важливо при проектуванні багатоосевих маніпуляторів для лазерного зварювання [12, с. 2-3].

Таким чином, сучасна література орієнтована на комплексний підхід: архітектурні інновації (гібриди), точне моделювання жорсткості, та інтелектуальні методи планування – всі ці напрями мають пряме відношення до проблеми вибору кінематичної схеми для завдань лазерного зварювання.

Мета статті – обґрунтувати та розробити науково-методичний підхід до вибору оптимальної кінематичної схеми багатоосевого маніпулятора для процесів лазерного зварювання, який забезпечує необхідну точність позиціонування, жорсткість конструкції та ефективність технологічного процесу з урахуванням особливостей зварювання виробів складної геометрії та вимог сучасного автоматизованого виробництва.

Виклад основного матеріалу. Кінематика маніпулятора – одна з основних його характеристик. Використовуючи принцип системного підходу, здійснимо синтез структури маніпуляторів, визначимо їхні функціональні можливості. Все це дозволить обрати таку конструкцію маніпулятора, яка забезпечить оптимальні, за потрібними критеріями, умови взаємодії підсистем «робот – інструмент – оброблюваний матеріал».

Серед значного розмаїття компоновань маніпуляторів можна виділити шість основних, найбільш часто застосованих: сферичне, важільне, горизонтальне, порталне, консольне і декартове.

Серед усіх, саме декартове компоновання відрізняється відносно високою жорсткістю й точністю.

Схема маніпулятора виконана таким чином, що три координати X, Y, Z несуть на собі дві поворотні осі B і C. Кінематична модель маніпулятора представлена на рис.1. Точність просторового положення інструмента (горловини сфокусованого лазерного пучка) визначається сукупною точністю декартових координат X, Y, Z і координат обертання B і C.

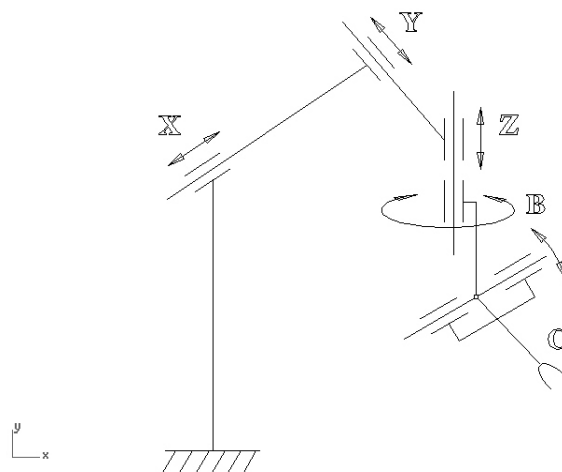


Рис. 1. Кінематична модель лазерного маніпулятора, виконаного за принципом антропоморфного робота

Точність позиціонування промислового робота – одна з найважливіших технічних характеристик, яка у значній мірі визначає можливість використання маніпулятора для автоматизації виробничого процесу й галузь його застосування.

Кількісною величиною, що визначає точність позиціонування маніпулятора, є похибка позиціонування, що становить різницю між фактичним положенням умовної точки робочого органу й точкою, заданою програмою. Як вже говорилося вище, положення умовної точки робочого органу можна визначити, використовуючи лише три ступені волі, тому й похибки позиціонування можуть виражатися лінійними величинами Δx , Δy і Δz . Ці похибки характерні для декартової моделі. Причому

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_1 - x_0; \\ \Delta y &= y_1 - y_0; \\ \Delta z &= z_1 - z_0;\end{aligned}\tag{1}$$

де x_1 , y_1 , z_1 фактичне положення умовної точки робочого органу, а x_0 , y_0 , z_0 її програмні координати.

У випадку використання поворотних або важільних пар, то виникають похибки орієнтування робочого органу в просторі.

Основними причинами виникнення похибок позиціювання є: помилки за рахунок пристроїв керування; помилки за рахунок приводів; помилки за рахунок технологічних погрешностей вузлів й елементів маніпулятора; помилки, обумовлені пружними властивостями кінематичних ланок маніпулятора; помилки за рахунок люфтів і зазорів у кінематичних парах.

Варто виділити похибки, що залежать від умов експлуатації промислового робота: погрешності, пов'язані зі зміною температури навколишнього середовища, ступеня забруднення тертьових поверхонь і т.п.; погрешності, викликані зміною лінійного й кругового переміщень маніпулятора. Очевидно, що при збільшенні радіуса кінематичної пари обертання при постійній кутовій погрешності лінійна погрешність буде збільшуватися пропорційно цьому радіусу; погрешності, викликані переміщенням маси утримуваного робочого органу. Це порозумівається зміною динамічних характеристик системи позиціювання, перехідних процесів, збільшенням вібрації.

Розглянемо кінематичну модель лазерного маніпулятора, який станове собою антропоморфний робот, з погляду виникаючих у ній похибок переміщення. Ефект впливу кожної з первинних похибок визначається незалежно від впливу інших помилок, а їхній сумарний вплив на точність позиціювання обчислюється відповідно до існуючих теорій точності. Визначення помилки положення робочого органу як ланки просторового, розімкненого багатоланкового механізму і її розподіл у робочому просторі маніпулятора є специфічним завданням теорії маніпуляційних систем. Нас же цікавить максимально можлива похибка положення при відпрацьовуванні даним маніпулятором відповідного завдання.

Вираження (1) описують похибки позиціювання, що виникають при виводі в задану точку координатами X, Y, Z поворотних осей B і C . Робочий орган або інструмент, у нашому випадку сфокусована горловина лазерного пучка, крім декартових координат переміщається ще й цими поворотними осями, завдання яких – відхилити оптичну вісь сфокусованого лазерного пучка на заданий кут. Похибку відхилення оптичної осі можна описати як:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \alpha_1 - \alpha_0; \\ \Delta\beta &= \beta_1 - \beta_0;\end{aligned}\quad (2)$$

де α і β кути повороту відповідно осей B і C . При цьому, похибка положення інструменту визначається як:

$$\begin{aligned}\Delta b &= \Delta\alpha R_b; \\ \Delta c &= \Delta\beta R_c;\end{aligned}\quad (3)$$

де R_b, R_c – радіуси обертання інструменту відносно осей обертання координат B і C .

Проекції похибок осі B на координати X, Y, Z запишемо як

$$\begin{aligned}\Delta b_x &= \Delta\alpha_x R_b \\ \Delta b_y &= \Delta\alpha_y R_b \\ \Delta b_z &= \Delta\alpha_z R_b\end{aligned}\quad (4)$$

Проекції похибок осі C на координати X, Y, Z

$$\begin{aligned}\Delta c_x &= \Delta\beta_x R_c \\ \Delta c_y &= \Delta\beta_y R_c \\ \Delta c_z &= \Delta\beta_z R_c\end{aligned}\quad (5)$$

Тоді максимальна похибка вектору положення, з урахуванням виразу $\overline{P_1P_2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ (траєкторія переміщення P_1P_2 у декартовій системі координат, що забезпечується за рахунок сукупності лінійних прирощень $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ за відповідними координатами), визначається як

$$\begin{aligned}\overline{\Delta P_1P_2} &= \sqrt{(\Delta x + \Delta b_x + \Delta c_x)^2 + \\ &+ (\Delta y + \Delta b_y + \Delta c_y)^2 + (\Delta z + \Delta b_z + \Delta c_z)^2}\end{aligned}\quad (6)$$

Із виразу (6) видно, що точність просторового положення інструменту визначається сукупною точністю декартових координат X, Y, Z і координат обертання B і C .

В результаті у маніпуляторі, який ми аналізуємо, при точності позиціювання за координатами $X, Y, Z \pm 0,03$ мм і за координатами B і $C \pm 0,015^\circ$, просторова точність положення інструменту становить всього $\pm 0,08$ мм.

Розроблювальний маніпулятор повинен виконувати наступні завдання: – забезпечувати просторовий рух інструмента (горловини сфокусованого пучка) в просторі з розмірами $500 \times 500 \times 100$ мм; забезпечувати нахил оптичної осі у напівсфері з максимальним відхиленням про вертикалі $\pm 45^\circ$. При цьому схема повинна відповідати наступним вимогам: при здійсненні кругових рухів у будь-який площині об'єктів не повинен обертатися навколо своєї осі; при будь-якому відхиленні оптичної осі координатами B і C положення горловини сфокусованого пучка щодо координат повинне залишатися X, Y, Z незмінним.

Оскільки в будь-яку точку робочого простору, який обмежено кінетичними можливостями маніпулятора, можна потрапити, використовуючи тільки три ступені волі. Тому для виконання завдання переміщення інструмента по заданій траєкторії в просторі, за умови фіксованого його положення щодо трьох координат X, Y, Z при довільному положенні координат B і C , досить лише мінімальної конфігурації маніпулятора.

Кінематична модель п'ятикоординатного маніпулятора, у якій розкривається схема взаємного положення координат X, Y, Z, що переміщують інструмент і координат В і С, що відхиляють оптичну вісь, показана маніпулятора на рис. 2.

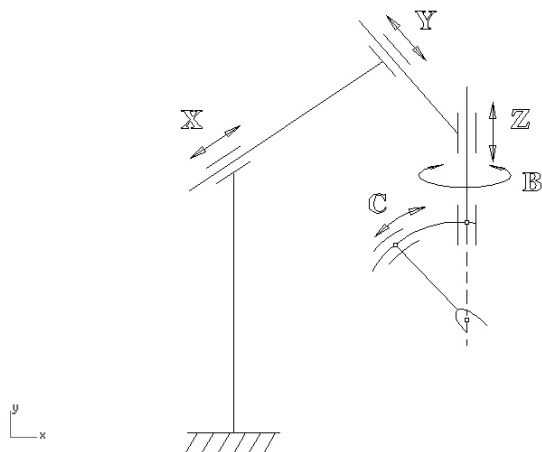


Рис. 2. Кінематична модель п'ятикоординатного маніпулятора з підвищеною точністю положення інструменту

Система декартових координат X, Y, Z, переміщає в просторі по керуючій програмі координати В і С, що відхиляють, які по тій же програмі, узгоджено з координатами X, Y, Z, забезпечують нахил і поворот оптичної осі. Слід зазначити, що координати В і С виконані таким чином, що їхній рух не міняє положення інструмента в просторі, а тільки відхиляє оптичну вісь. У цьому випадку похибка вектору просторового положення робочого органу визначається як

$$\overline{\Delta P_1 P_2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (7)$$

У порівнянні з (7) видно, що у розробленій моделі точність просторового положення інструменту вища. При цьому похибки відхилю оптичної осі лишилися на попередньому рівні.

Використовуючи принцип децентралізації керування об'єктами з багатьма зв'язками, із однозв'язковими підсистемами, керування таким маніпулятором зводиться до регулювання просторового положення інструмента в трьохкоординатній траєкторній підсистемі й регулюванню кута нахилу у двохкоординатній підсистемі, що відхиляє. Підсистеми однозначно зв'язані між собою загальним законом керування.

Аналіз розглянутих кінематичних моделей показує, що наявність обертових координат приводить до появи погрішності просторового відхилення оптичної осі, обумовленої похибками положення поворотних осей.

Розроблювананами модель п'ятикоординатного маніпулятора повинна бути постачена такою підсистемою, що відхиляє фокусуючу систему, яка буде реалізована на дуговому русі (рис. 3).

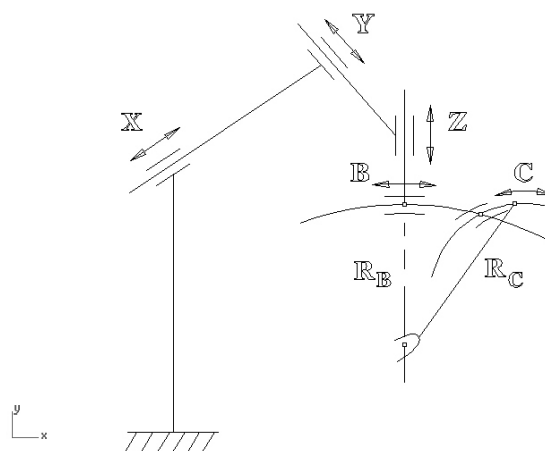


Рис. 3. Кінематична модель п'ятикоординатного маніпулятора з підвищеною точністю відхилення оптичної осі

В такій системі осі В і С нахиляють оптичну вісь у перпендикулярних напрямках. У цьому випадку одна з осей, наприклад вісь В, переміщає перпендикулярну їй вісь С. Причому обидві осі, що відхиляють, рухаються по дугах, що можливо мають різний радіус, але один центр, що мають, що перебувати в точці положення інструмента.

Похибка відхилення оптичної осі визначається як

$$\Delta \alpha = \Delta b / R_b; \quad (8)$$

$$\Delta \beta = \Delta c / R_c$$

де Δb і Δc – похибки переміщення координат В і С, відповідно, R_b , R_c – радіуси обертів відхиляючої осі координат В і С.

Отже, просторова похибка відхилення оптичної осі зменшилася пропорційно радіусу.

Для виконання зварювальних робіт необхідним є комплекс устаткування, яке забезпечує автоматичне одержання швів заданої якості і конфігурації. У залежності від технологічних схем зварювання із застосуванням лазерного випромінювача до цього устаткування пред'являються численні вимоги, насамперед обумовлені змістом таких схем.

Лазерний випромінювач найчастіше застосовується в установках, що працюють в автоматичному режимі. Це викликано високою продуктивністю лазерного комплексу. Зазвичай автоматизовані лазерні установки повинні: транспортувати лазерний пучок у зону зварювання; фокусувати лазерний пучок на крайки заготовки, що зварюється; захищати зону зварювання від

повітря; подавати в зону зварювання присаджувальний матеріал зі швидкістю, яка не перевищує швидкість його плавлення; переміщати сфокусований пучок уздовж крайок; забезпечувати точну підтримку співвідношення потужності випромінювання і швидкості переміщення пучка уздовж крайок; забезпечувати точне влучення пучка на крайки при переміщенні; забезпечувати підтримку положення фокуса на крайках при переміщенні; для лазерно-дугової схеми зварювання, подавати в зону зварювання плавкий електрод або присаджувальний дріт з необхідною швидкістю, управляти зварювальним струмом тощо. Крім того, до складу лазерних установок входять технологічні пристосування, які утримують заготовки в процесі зварювання.

Таким чином, до складу узагальненого пристрою, що реалізує лазерну і лазерно-дугову схеми, повинні входити: лазерний випромінювач; оптична система транспортування лазерного пучка; об'єктив або лазерна зварювальна головка; пристрій подачі присаджувального матеріалу; маніпулятор; механізми забезпечення положення фокусної відстані; механізм подачі електрода; технологічні пристосування втримання заготовок. З аналізу такої моделі випливає, що основними її вузлами є електричний привід, різні функціональні перетворювачі (цифрові і цифро-аналогові), елементи визначення стику і температури. Такі параметри зварювального маніпулятора, як точність, швидкодія, надійність і енерговитрати залежать від цих вузлів. Для проектування застосовували прикладний пакет програм Solidworks і Autodesk Inventor.

Розглянемо більш детально запропоновану конструкцію багатокоординатного маніпулятора. Як відмічалось, застосування універсальних антропоморфних роботів для розв'язання низки задач лазерного різання і зварювання складнопрофільних конструкцій є надмірним у разі розв'язання окремих задач серійного виробництва. З метою зниження собівартості маніпулятора нами пропонується для вирішення певних технологічних задач замінити п'яти- чи шістьохкоординатний антропоморфний робот трикоординатним порталним маніпулятором, постаченим системою кутового нахилу робочого інструменту, згідно кінематичній семі рис. 3. Таким чином, представлений вищенаведеними кінематичною схемою (рис. 3) й моделлю (рис. 4.а) маніпулятор скла-

дається із двох підсистем: трикоординатна, що забезпечує переміщення точки положення інструмента в просторі, й двокоординатна – яка відхиляє оптичну вісь. Загальний вигляд конструкції виготовленого за даною розробкою маніпулятора наведено на рис. 4.б.

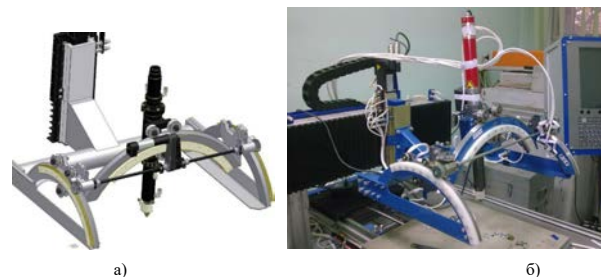


Рис. 4. Дугова відхиляюча підсистема: а – спроектована модель; б – виготовлений дослідний зразок

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що вибір кінематичної схеми багатоосевого маніпулятора є ключовим фактором, який визначає ефективність і якість процесів лазерного зварювання. Від правильної конфігурації механізму залежать точність позиціонування інструмента, стабільність швидкості руху та можливість обробки деталей складної просторової форми.

Проведений аналіз існуючих конструкцій показав, що серійні маніпулятори характеризуються широкою робочою зоною, проте мають нижчу жорсткість та точність, у той час як паралельні схеми забезпечують високу точність і динамічні властивості, але обмежені у досяжності. Найбільш перспективними виявилися гібридні кінематичні структури, які поєднують переваги обох типів механізмів.

Запропоновано систему критеріїв оцінювання кінематичних схем, яка враховує технологічні (точність, стабільність процесу, плавність руху), конструктивні (жорсткість, масо-габаритні характеристики) та експлуатаційні (енергоефективність, ремонтпридатність) параметри. Використання комплексного підходу дозволяє обґрунтовано обирати оптимальну конфігурацію маніпулятора для конкретних виробничих завдань.

Результати дослідження створюють наукову основу для подальшої оптимізації роботизованих систем лазерного зварювання та впровадження інноваційних технічних рішень у промисловість.

Список літератури:

1. Russo M., Zhang D., Liu X. J., Xie Z. A review of parallel kinematic machine tools: Design, modeling, and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2024. Vol. 196. Id. 104118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104118>

2. Ye W., Tang T., Li Q. Robotized manufacturing equipment: A review from the perspective of mechanism topology. *Science China Technological Sciences*. 2023. Vol. 66. Iss. 6. P. 1683–1697. URL: <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2349-7>
3. Kumar S., Wöhrle H., de Gea Fernández J., Müller A., Kirchner F. A survey on modularity and distributivity in series-parallel hybrid robots. *Mechatronics*. 2020. Vol. 68. Id. 102367. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102367>
4. Fajardo-Pruna M., López-Estrada L., Pérez H., Diez E., Vizán A. Analysis of a single-edge micro cutting process in a hybrid parallel-serial machine tool. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 151. P. 222–235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.023>
5. Abarca, V., Elias, D. A review of parallel robots: Rehabilitation, assistance, and humanoid applications for neck, shoulder, wrist, hip, and ankle joints. *Robotics*. 2023. Vol. 12. Iss. 5. Id. 131. URL: <https://doi.org/10.3390/robotics12050131>
6. Shi M., Li H., Li S., Qin X., Liu H. A rapid prediction method for the stiffness and the machining accuracy evaluation of a parallel kinematic mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023. Vol. 37. Iss. 11. P. 5965–5978. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-1033-1>
7. Wu K., Li J., Zhao H., Zhong Y. Review of industrial robot stiffness identification and modelling. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 17. Id. 8719. URL: <https://doi.org/10.3390/app12178719>
8. Kim S., Nam E., Ha T., Hwang S., Lee J., Park S., Min B. Robotic machining: A review of recent progress. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. Vol. 20. Iss. 9. P. 1629–1642. URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00187-w>
9. Cao W., Ding H. A method for stiffness modeling of 3R2T overconstrained parallel robotic mechanisms based on screw theory and strain energy. *Precision Engineering*. 2018. Vol. 51. P. 10–29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.002>
10. Zhong J., Wang T., Cheng L. Collision-free path planning for welding manipulator via hybrid algorithm of deep reinforcement learning and inverse kinematics. *Complex & Intelligent Systems*. 2022. Vol. 8. Iss. 3. P. 1899–1912. URL: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00366-1>
11. Gao W., Tang Q., Yao J., Yang Y. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 62. Id. 101862. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>
12. Tringali A., Cocuzza, S. Globally optimal inverse kinematics method for a redundant robot manipulator with linear and nonlinear constraints. *Robotics*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. Id. 61. <https://doi.org/10.3390/robotics9030061>

Lukashenko V.A., Bernatskyi A.V., Bondarieva V.I., Harder D.A., Nabok T.M., Kurylo V.A., Batsak A.M., Hryn A.P., Lukashenko V.M. SELECTION OF THE OPTIMAL KINEMATIC SCHEME OF A MULTI-AXIS MANIPULATOR FOR LASER WELDING PROCESSES

In modern mechanical engineering and high-tech production, laser welding occupies a leading position due to its advantages – high accuracy, minimal heat-affected zone, automation capabilities and ensuring high quality of welded joints. One of the key elements of robotic laser welding systems is a multi-axis manipulator, which provides spatial positioning of the laser emitter. The accuracy, reliability and efficiency of the entire process depend on the choice of its kinematic scheme. However, today there is no universal method that allows reasonably determining the optimal structure of the manipulator taking into account the specific requirements of laser welding, such as stability of movement speed, structural rigidity, avoidance of thermal deformation zones and work with parts of complex spatial shape. The purpose of the study is to substantiate and develop a scientific and methodological approach to choosing the optimal kinematic scheme of a multi-axis manipulator for laser welding processes, which provides the necessary positioning accuracy, structural rigidity and efficiency of the technological process, taking into account the features of welding products of complex geometry and the requirements of modern automated production. The paper analyzes modern designs of industrial robots, including serial, parallel and hybrid kinematic structures. The influence of the number of degrees of freedom, configuration of links and location of drives on the working area, accuracy and dynamic characteristics of the manipulator is considered. A system of evaluation criteria is proposed, which includes technological, structural and operational indicators. To verify the proposed solutions, computer modeling methods were used, which allowed to evaluate the kinematic and power parameters of various design options. The results of the study showed that optimizing the kinematic structure makes it possible to increase positioning accuracy and reduce energy consumption, as well as ensure the stability of the weld formation process. The developed approach can be used at the design stage of robotic complexes for laser welding in the mechanical engineering, aviation and automotive industries. The practical significance of the work lies in the possibility of creating competitive automated welding systems with improved technical and economic indicators.

Key words: laser welding, multi-axis manipulator, kinematic diagram, robotic systems, positioning accuracy.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025