

Список літератури

1. Козаровицький Л. А. Бумага и краска в процессе печатания / Козаровицький Л. А. – М.: «Книга», 1965. – 428 с.
2. Величко О. М. Опрацювання інформаційного потоку взаємодією елементів друкарського контакту: Монографія / Величко О. М. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2005. – 264 с.
3. Ольшанский Д. М. Микрогеометрия поверхности бумаги и точность воспроизведения / Д. М. Ольшанский // Полиграфия. – 1966. – №6. – С. 27–28.
4. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: ГОСТ 2789-73. – ГОСТ 2789-73. – [Чинний від 1973-04-23]. – (Міждержавний стандарт).
5. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и параметры: ГОСТ 19300-86. – ГОСТ 19300-86. – [Чинний від 1987-07-01]. – (Міждержавний стандарт).
6. Модуль для вимірювання фасонних профілів / С. В. Майданюк, О. А. Плівак, Р. А. Бекмуратов // Вісник ЖДТУ. – 2007. – №2 (41). – С. 15–18.
7. Киричок П. О. Методи захисту цінних паперів та документів суворого обліку / Киричок П. О., Коростіль Ю. М., Шевчук А. В. – ВП ВПК «Політехніка», 2008. – 368 с.
8. Киричок П. О. Зміцнення поверхонь металевих деталей: Навч. посіб. / П. О. Киричок, В. Г. Олійник, Т. Ю. Киричок. – К.: Преса України, 2004. – 240 с.

УДК 621.9.06

Д.О. Дмитрієв канд. техн.наук
НТУ України "Київський політехнічний інститут" м.Київ, Україна

КОМПОНОВКИ І КІНЕМАТИКА СВЕРДЛИЛЬНО-ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТІВ З МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Рассмотрено проектирование компоновок металлорежущих станков с МПС на основе биглайда и бипода. Показаны приемы увеличения функциональности в компоновках станков без усложнения кинематической структуры МПС и их математическое моделирование.

Planning of arrangements of metal-cutting machine-tools is considered with PKM on the basis of biglide and bipod. The receptions of increase of functionality are rotined in arrangements of machine-tools without complication of kinematics structure of PKM and their mathematical design.

Вступ. В сучасних умовах в машинобудуванні широко впроваджуються високі технології з використанням технологічного обладнання на основі мехатронних систем. У верстатному обладнанні з кінематичними ланками і виконавчим органом (ВО), що утворюють замкнений просторовий контур, застосовують механізми паралельної структури (МПС), які мають певні переваги в порівнянні з традиційними послідовними кінематичними ланцюгами [1]. А саме, підвищена ступінь вільності і високі швидкості та прискорення ВО, багатофункціональність обладнання, можливість обробки деталі з усіх боків (крім базової) за один установ. Технічні недоліки, допущені в компоновці верстату, неможливо виправити в подальшому удосконалення окремих вузлів і складових елементів верстатної системи. Тому відповідальним етапом проектування при виготовленні верстатного обладнання є етап розробки компонуальної схеми у відповідності до технологічних задач [2, 3].

Постановка проблеми. В останній час широко пропонуються верстати-гексаподи, модулі Tricept і інші з телескопічними штангами змінної довжини. Дана тенденція ґрунтується на прагненні розробників нового обладнання забезпечити повну функціональність лише за рахунок кінематичних властивостей самого МПС. Однак, при цьому з'являються певні обмеження: кут повороту шарнірів, довжина штанг, підвищена металоємність, невеликий робочий простір та кути підходу ВО до оброблюваної поверхні і ін. Для розширення технологічних можливостей, забезпечення потрібної якості та функціональності визначають, як правило, наступні шляхи: удосконалення кінематичної структури МПС; удосконалення конструкції вузлів і складових елементів; створення оптимальної компоновки обладнання в поєднанні з традиційними кінематичними структурами. Для вирішення даних задач і розвитку в Україні верстатних систем з МПС на кафедрі конструювання верстатів і машин НТУУ "Київський політехнічний інститут" проводяться дослідження згідно дербюджетного замовлення під керівництвом проф. Ю.М. Кузнєцова, результати яких викладено в матеріалах статті.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Для визначення якості компоновки потрібно мати комплексний критерій, що повинен включати вагові показники функціональності, технологічності, економічності. При ускладненні кінематичної структури МПС звичайно деякі показники функціональності підвищуються, а показники технологічності знизяться, і навпаки. Тому розглянемо шлях створення верстатів з МПС від самої простої структури біглайда (двоступеневий механізм) і можливості утримати функціональність на рівні багатоступеневих МПС.

Серед представників діючих верстатів з МПС, що містять два паралельних кінематичних ланцюга з двома керованими приводами, розташованими по одному в кожному ланцюгу, є верстат типу SPECHT Xperimental з горизонтальним розташуванням шпинделя [3, 4]. По такому ж принципу побудовано верстат з горизонтальним розташуванням шпинделя мод. Trijoint 900H, розроблений в Чеському технічному Університеті (м. Прага) і виготовлений фірмою Kovosvit MAS [5]. В даний час розробники цього верстату досліджують більше 50 варіантів виконань МПС по даній компоновці. Двоступеневі МПС в таких верстатах як SPECHT Xperimental і Trijoint 900H забезпечують велику жорсткість стрижневої системи в напрямку осі шпинделя за рахунок виконання кінематичних ланок призматичної форми, що надає верстату здатність нести шпиндель більшої потужності та витримувати високі робочі навантаження.

Триступеневим МПС зі штангами постійної довжини оснащено фрезерний верстат вертикальної компоновки [6]. В з'єднаннях кінематичних ланок використано однорухомі циліндричні шарніри, однак МПС забезпечує керування ВО по двом лінійним (координати Z, Y) і одній кутовій B (навколо осі X). Загалом верстат здатен виконувати чотирикоординатну обробку довгомірних деталей за рахунок поздовжніх переміщень горизонтального верстатного столу, що нагадує гібридну компоновку.

В роботі [7] зроблено спробу суттєво розширити технологічні можливості двокоординатного плоского МПС при застосуванні для свердління отворів (рис. 1).

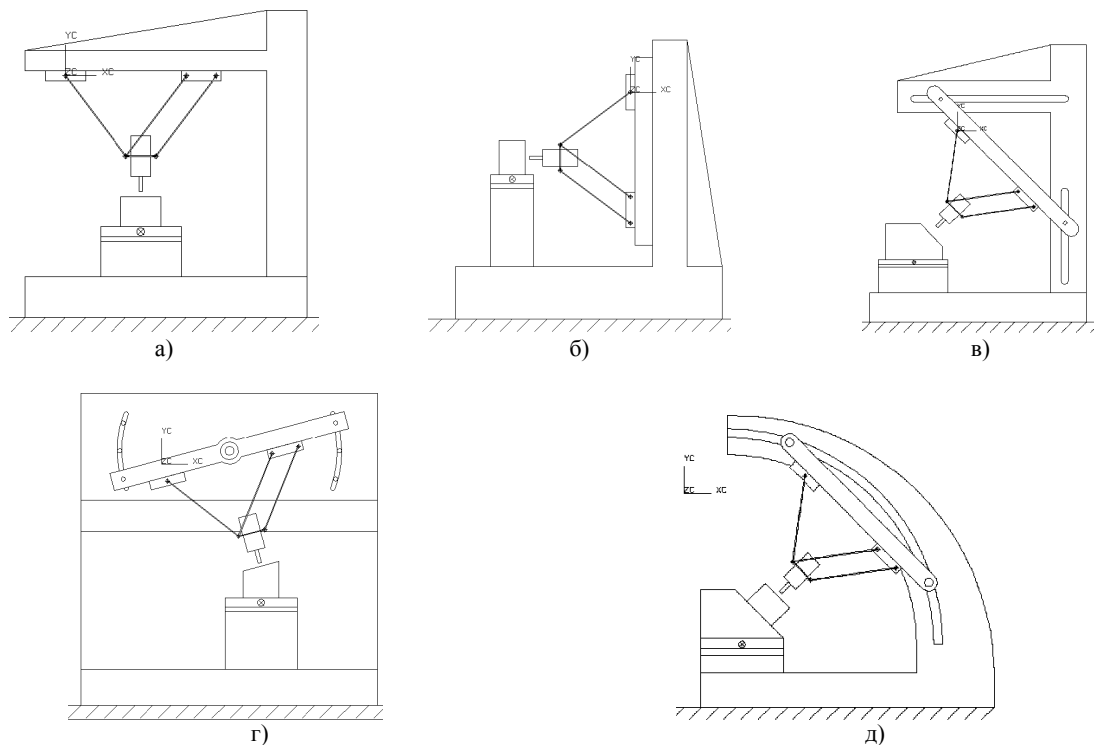


Рис. 1. Варіанти компоновок свердлувальних верстатів з модулем "біглайд":
а – горизонтальна; б – вертикальна; в, г, д – зі змінним кутом нахилу переміщенням по лінійним напрямним, обертанням, ковзанням по круговій напрямній, відповідно

В результаті склад свердлувального верстату побудовано на модульному принципі з використанням одно і двох координатних лінійних приводів як для МПС, так і для шпиндельного вузла. Розвиваючи блочну будову традиційних модулів і МПС, в цій роботі пропонуються компоновки, які мають здатність перебудовуватися, розширюючи технологічні можливості верстатів.

Основна частина. Якщо об'єднати розглянуті виконання верстатів на основі МПС біглайд в одну компоновку з жорстко закріпленим інструментальним шпинделем на рухомій платформі, але з різною початковою орієнтацією, отримаємо технологічну лінію для обробки деталей з шести боків (рис.2). Така компоновка складається з шести окремих секцій, де робочою зоною буде площина і конвеєра палет. Дана компоновка програє в металоемності та габаритах, однак зберігається загальна функціональність.

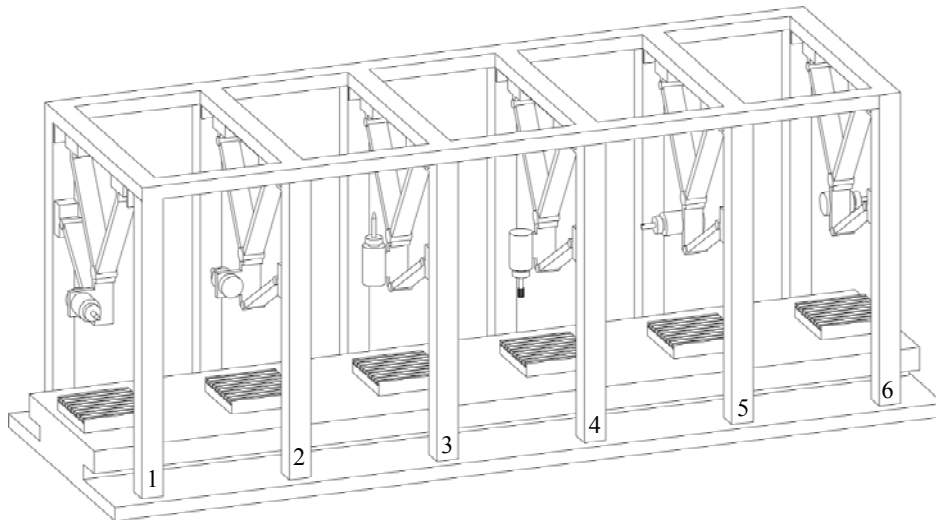


Рис.2. Об'єднана компоновка свердлильно-фрезерного верстату з різною початковою орієнтацією шпинделя

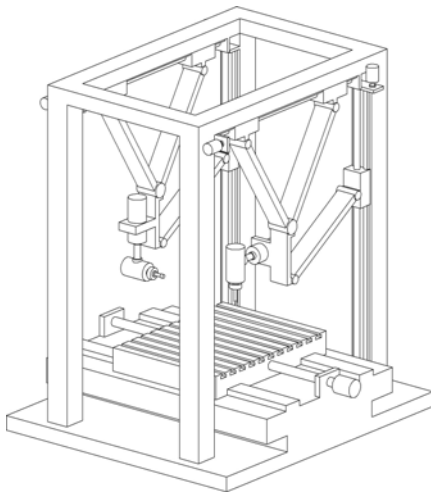
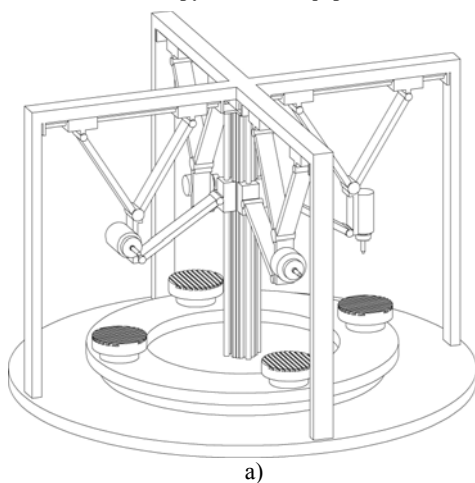


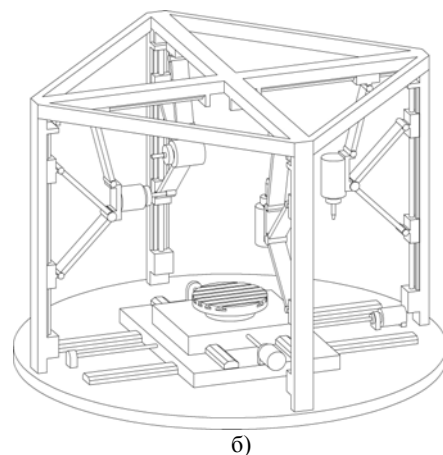
Рис. 3. Двошпиндельна компоновка свердлильно-фрезерного верстату з модулем повороту шпинделя на рухомій платформі

Для зменшення габаритів і металоємності верстату потрібно оснастити інструментальний шпиндель пристроєм повороту на рухомій платформі відносно осі X і (або) Y (рис. 3). Тоді компоновка буде складатися з двох секцій з МПС, кожна з яких включає властивості чотирьох секцій з МПС по рис.2. Наприклад, обертання навколо осі X - секції 1, 2, 3, 4; обертання навколо осі Y - секції 3, 4, 5, 6. Таким чином, введення одного модуля повороту знижує металоємність і габарити в три рази і дає можливість використати один верстатний стіл.

Суттєвим резервом підвищення критерію якості компоновки може бути виконання дискретних змін [8]: положення горизонтальне - вертикальне - з нахилом, поворот на 45° , 90° , 180° , заповнення вільного простору, розташування в точці – по лінії, декількох ліній – по площині і т.ін. Результатом перетину робочих площин МПС будуть каркасні компоновки з спільною колоною і круговим конвеєром палет (рис.4, а) або з зустрічним розташуванням МПС в зоні дії хрестового верстатного столу (рис.4, б).



а)



б)

Рис. 4. Компоновка чотирьохшпиндельного свердлильно-фрезерного верстату:
а – з різними робочими зонами МПС; б – з робочими зонами МПС, що перетинаються

Для визначення кінематичних властивостей розглянутих компоновок з МПС побудуємо схему механізмів біпод і біглайд в залежності від того, що буде прийнято за керовані приводні координати (рис. 5, а), і також

відповідає змішаній кінематиці в різних комбінаціях керованих координат x_A , x_B , l_A , l_B . Схема механізму утворена двома кінематичними ланцюгами AK і BK , спільна точка з'єднання яких належить до вершини трикутного замкнутого контура AKB .

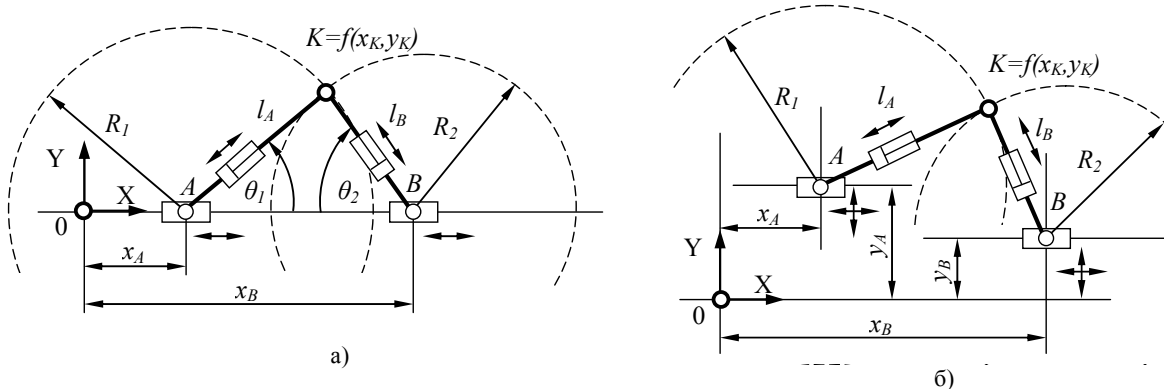


Рис. 5. Схема визначення положень точки K в двокоординатному МПС:
а – керовані координати x_A , x_B , l_A , l_B ; б – керовані координати x_A , x_B , l_A , l_B , y_A , y_B

Очевидно, що положення точки K є однозначним, так як трикутник має властивість "жорсткої" форми. Тому ВО верстату з МПС такого виду може бути розташовано в точці K , або навіть на одному зі стрижнів l_A , l_B . Частіше трикутні структури використовують для побудови більш складних плоских і просторових МПС, а спільну точку перетину стрижнів приймають в якості шарнірного з'єднання з вихідною ланкою МПС. Тому необхідно мати математичну модель функціонування МПС трикутного контуру і функції положення точки K в різних компоновках верстатів.

Для схеми (рис. 5, а) положення точки K традиційно визначається шляхом проєкціювання замкнутого векторного контура на осі координатної системи XOY .

$$\begin{cases} l_A \cos(\theta_1) + l_B \cos(\theta_2) = x_B - x_A; \\ l_A \sin(\theta_1) - l_B \sin(\theta_2) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Після визначення проміжних координат θ_1, θ_2 по відомим керованим координатам x_A , x_B , l_A , l_B здійснюється розрахунок положення точки $K(x_K, y_K)$ в системі координат XOY . Однак задача ускладнюється, якщо МПС має додаткові керовані координати по осі Y - (рис. 5, б). В такому разі необхідно введення додаткової системи координат $X'O'Y'$ з початком, наприклад, в точці $A=O'$ і віссю $O'X'$, що проходить через точку B (на рис.5, б не показано). Такий підхід потребує в подальшому перетворення розрахованих $K(x'_K, y'_K)$ в системі координат $X'O'Y'$ до системи координат нерухомої основи XOY .

Розв'язок даної задачі суттєво спрощується, якщо відмовитися від розрахунку проміжних координат θ_1, θ_2 , і поставити умову існування шуканої точки K на перетині двох кіл з радіусами, що дорівнюють довжині штанг $R_1 = l_A$, $R_2 = l_B$, з положенням центру відповідного кола на керованих координатах (x_A, y_A) та (x_B, y_B) (рис. 5, б)

$$\begin{cases} (x_K - x_A)^2 + (y_K - y_A)^2 - R_1^2 = 0; \\ (x_K - x_B)^2 + (y_K - y_B)^2 - R_2^2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Розв'язком системи (2) відносно x_K , y_K будуть квадратні рівняння

$$S_1 \cdot y_K^2 + S_2 \cdot y_K + S_3 = 0; \quad P_1 \cdot x_K^2 + P_2 \cdot x_K + P_3 = 0, \quad (3)$$

де $S_1, S_2, S_3, P_1, P_2, P_3$ - коефіцієнти: $S_1 = 4(y_B^2 + y_A^2 + x_B^2 + x_A^2 - 2 \cdot (y_A \cdot y_B + x_A \cdot x_B))$;

$$S_2 = 4(R_1^2 \cdot y_A - R_2^2 \cdot y_A + R_2^2 \cdot y_B - R_1^2 \cdot y_B - y_B^3 - y_A^3 - x_A^2 \cdot y_A - x_A^2 \cdot y_B + y_B^2 \cdot y_A - x_B^2 \cdot y_A - x_B^2 \cdot y_B + y_A^2 \cdot y_B + 2(x_B \cdot x_A \cdot y_A + x_B \cdot x_A \cdot y_B));$$

$$S_3 = -4 \cdot (x_A \cdot x_B (y_B^2 + y_A^2 - R_1^2 - R_2^2) + (x_A^3 \cdot x_B - x_B^3 \cdot x_A)) + 2 \cdot (y_B^2 \cdot (R_1^2 - R_2^2)^4 + (x_A^2 \cdot y_A^2 + x_B^2 \cdot y_B^2 + x_A^2 \cdot y_B^2 - y_A^2 \cdot y_B^2 + y_A^2 \cdot x_B^2)) + 6x_A^2 \cdot x_B^2 + x_A^4 + y_A^4 + y_B^4 + x_B^4 - 2R_2^2 \cdot (x_B^2 + y_A^2 - x_A^2) - 2R_1^2 \cdot (x_A^2 - y_A^2 - x_B^2) + R_2^4 + R_1^4 - 2R_1^2 \cdot R_2^2;$$

$$P_1 = S_1; \quad P_2 = S_2; \quad P_3 = \frac{(S_3 \cdot y_B) - x_A^2 - y_A^2 + x_B^2 + y_B^2 + R_1^2 - R_2^2}{(x_A - x_B)};$$

При розв'язанні (3) отримаємо два кореня для кожного значення x_K, y_K координат вихідної ланки

$$x_{K1,2} = \frac{-S_2 \pm \sqrt{S_2^2 - 4S_1 \cdot S_3}}{S_1}; \quad y_{K1,2} = \frac{-P_2 \pm \sqrt{P_2^2 - 4P_1 \cdot P_3}}{P_1}, \quad (4)$$

тому остаточно треба прийняти ті значення x_K, y_K , які відповідають реальній робочій зоні вихідної ланки згідно конструктивного виконання МПС і компоновці верстату.

Отримання функції положення даним методом спрощується до лінійних рівнянь, якщо лінія переміщення або розташування нижніх кінців штанг співпадає з однією з осей системи координат нерухомої основи (рис. 5, а)

$$\begin{cases} (x_K - x_A)^2 + y_K^2 - R_1^2 = 0; \\ (x_K - x_B)^2 + y_K^2 - R_2^2 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

отримаємо
$$x_K = (x_A^2 - x_B^2 + R_2^2 - R_1^2) / 2 \cdot (x_B - x_A);$$

$$y_K = 2 \cdot \sqrt{x_A^2 \cdot (R_2^2 + R_1^2) + x_B^2 \cdot (R_2^2 + R_1^2) - \frac{R_1^4 - R_2^4}{2} + R_1^2 R_2^2 + 2(x_A^3 x_B - x_B^3 x_A) - 2x_A \cdot x_B \cdot (R_1^2 + R_2^2) - \frac{x_A^4 - x_B^4}{2} - 3x_A^2 x_B^2}. \quad (6)$$

Для схеми біглайду з штангами постійної довжини, що дорівнюють одна одній $R_1 = R_2 = R$, положення точки K дістанемо

$$x_K = (x_A - x_B) / 2; \quad y_K = \sqrt{4R^2 - x_A^2 - x_B^2 + 2x_A \cdot x_B}. \quad (7)$$

Отримані рівняння відповідають функції положення точки спільного з'єднання штанг МПС в трикутному контурі і можуть бути використані при моделюванні інших МПС, наприклад, при додаванні до точки K відрізка KM вихідна ланка приймає вигляд відрізка (проекції платформи) (рис. 6).

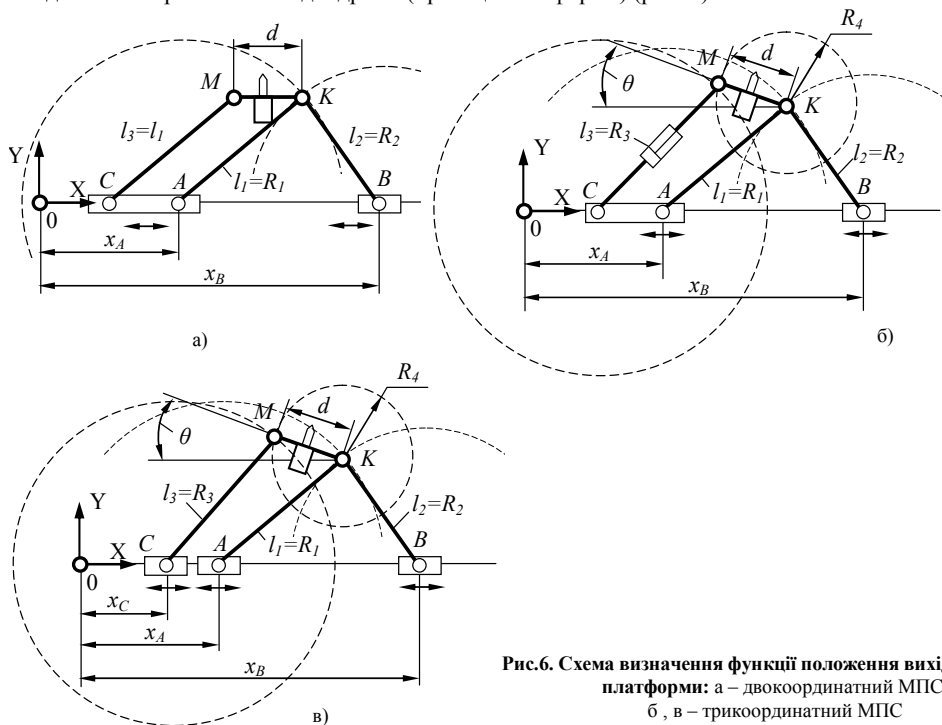


Рис.6. Схема визначення функції положення вихідної ланки платформи: а – двокоординатний МПС; б, в – трикоординатний МПС

При цьому, додаткова третя штанга CM може бути шарнірно з'єднана спільно з повзуном точки A (рис. 6, а, б) або мати власний привід поступального руху (рис. 6, в). Положення і орієнтація ВО на вихідній ланці визначається орієнтацією і положенням відрізка KM , тобто лінійними координатами точок K і M в системі координат нерухомої основи XOY . Для схеми (рис. 6, а) вихідна ланка KM має два лінійних ступені вільності уздовж декартових осей координат, а відрізок KM завжди займає горизонтальну орієнтацію. В такому випадку $y_M = y_K$, $x_M = x_K - d$ відповідно до рівняння (6). Для трикоординатних МПС (рис. 6, б, в) точка M визначається перетином двох кіл радіусами $R_3 = l_3$ і $R_4 = d$ з центром в точці C і K відповідно. Тому координати x_M, y_M розраховуються аналогічно (5) після визначення x_K, y_K , прийнявши їх як керовані координати положення центру кола $R_4 = d$. Кутова координата θ вихідної ланки розраховується маючи x_K, y_K, x_M, y_M, d .

Можливе одночасне переміщення кареток A і B з постійною швидкістю по напрямним верстату, яке в

сукупності задає складний рух точки K .

$$x_K = (x_A^2 - x_B^2 + L_2^2 - L_1^2) / 2 \cdot (x_B - x_A); \quad (8)$$

$$z_K = 2 \cdot (x_A^2 \cdot (L_2^2 + L_1^2) + x_B^2 \cdot (L_2^2 + L_1^2) - \frac{L_1^4 - L_2^4}{2} + L_1^2 L_2^2 + 2(x_A^3 x_B - x_B^3 x_A) - 2x_A \cdot x_B \cdot (L_1^2 + L_2^2) - \frac{x_A^4 - x_B^4}{2} - 3x_A^2 x_B^2)^{0.5}.$$

Якщо прийняти час відпрацювання переміщень приводів нижніх кінців штанг однаковий $t_A = t_B = t$, швидкості повзунів A і B не будуть дорівнювати одна одній $V_A \neq V_B$. Тобто, при переміщенні повзунів із A_1 в A_2 , B_1 в B_2 за однаковий час t їх швидкості знаходяться у співвідношенні

$$t = \frac{A_1 A_2}{V_A} = \frac{B_1 B_2}{V_B}, \quad (9)$$

звідки
$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{A_1 A_2}{B_1 B_2} \text{ або } V_A = \left(\frac{A_1 A_2}{B_1 B_2} \right) \cdot V_B = t \cdot V_B. \quad (10)$$

Таким чином, при підстановці в (8) замість x_A і x_B узагальненої координати t отримаємо траєкторію переміщень точки K при $V_A \neq V_B$ (рис.7). Дані отримано комп'ютерним моделюванням.

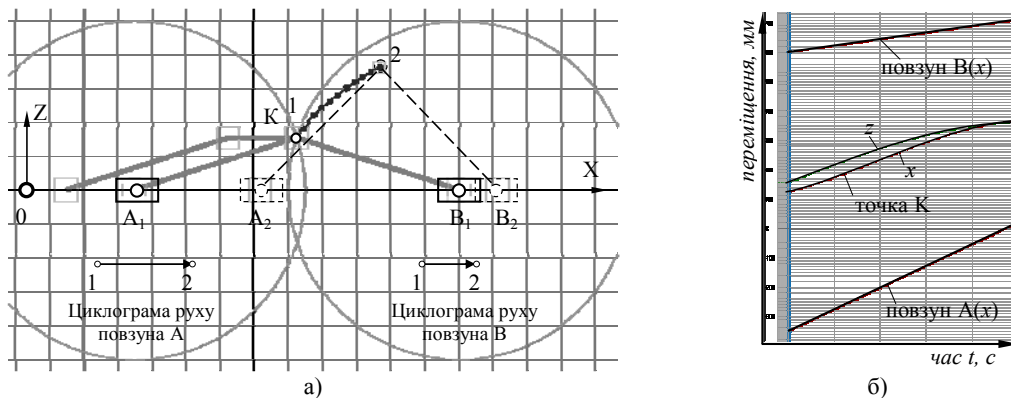


Рис. 7. Відпрацювання переміщень приводів з різними швидкостями повзунів: а – траєкторія вихідної ланки; б – графіки переміщень керованих ланок

Висновки. Таким чином, МПС з мінімальною кількістю ступенів вільності (два або три) здатні конкурувати з багатоступеневими кінематичними шарнірно-стрижневими структурами завдяки раціональній компоновці, узгодженій з технологічними задачами металообробного обладнання. Шляхи досягнення даної мети – дискретні просторові зміни складових змішаної кінематики верстатної системи. Загальну оцінку якості компоновки необхідно визначати кількісно комплексним показником вагових коефіцієнтів. Плоскі МПС мають досить зручний метод геометричного визначення для аналізу положень ВО, що дозволяє без розрахунку проміжних координат отримати значення функції положення вихідної ланки, спираючись на значення керованих координат МПС широкої групи, в тому числі і просторових. За рахунок деяких спрощень вихідної схеми МПС, не змінюючи саму структуру кінематичних замкнених ланцюгів, можна отримати аналітичне описання положень вихідної ланки і побудувати таким чином математичні моделі складних просторових стрижневих систем.

Список літератури

1. Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Валявський І.А., Склєров Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою.- Кіровоград, 2004. - 449с.
2. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компоновки. – М.: Машиностроение, 1978. – 208с.
3. Кузнєцов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Діневич Г.Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури/ Під ред. Ю.М. Кузнєцова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
4. Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В.Л. Афонин, А.Ф. Крайнев, В.Е. Ковалев и др.; Под ред. В.Л. Афонина. – М.: Машиностроение, 2001.-256 с.
5. Valasek M., Bauma V., Sika Z., Belda K., Pisa P. Design-by-Optimization and Control of Redundantly Actuated Parallel Kinematics Sliding Star // Multibody System Dynamics (2005) 14: P. 251–267
6. Tang X., Wang J., Gao M. Kinematic calibration of gantry hybrid machine tool based on estimation error and local measurement information // Int J. Adv. Manuf. Technol. (2005) 26: 382–390
7. Katz R., Li Z., and Pierrot F., Conceptual Design of a High Speed Drilling Machine (HSDM) Based on PKM Module, Technical Report, ERC/RMS, The University of Michigan, 2001.
8. Половинкин А.И., Бобков Н.К., Буш Г.Я. и др. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании)/ Под ред А.И. Половинкина. – М.: Радио и связь, 1981.- 344 с.