

UDC 621.914.3

Manzhola M., Ph.D.-student,
Kuznetsov Y., DThSc., Prof., Stepanenko O., Ph.D.

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute»

KINEMATIC ANALYSIS OF A MULTI AXIS MILLING MACHINE WITH THE MECHANISM OF PARALLEL STRUCTURES

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ БАГАТОКООРДИНАТНОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ З МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Abstract: The work carried out kinematic analysis of a multiaxis milling machine frame layout with parallel kinematics, as a result of which the rational design is gained and inverse kinematic problem is solved.

Keywords: kinematic analysis, multiaxis milling machine, parallel kinematic mechanisms.

Анотація: В роботі проведений кінематичний аналіз багатокординатного фрезерного верстату каркасного компонування з паралельною кінематикою, в результаті якого отримано раціональну конструкцію та вирішено обернену кінематичну задачу.

Ключові слова: кінематичний аналіз, багатокординатний фрезерний верстат, механізми паралельної структури.

INTRODUCTION

Using of parallel kinematic mechanisms (PKM) in machine tool caused the following advantages: high rigidity, low metal content, low inertial masses moving units, increased acceleration of the tool and others [1].

Providing these indicators are the most important in a multi bulk processing of parts using four or five working coordinates, as in this case, as a rule, the number of idle movements of the tool relative to the workpiece, which increases the processing time on the machine. Implementation of these indicators in machines with PKM achieved usually by introducing additional parallel kinematic chains, as done in machines such as "heksapod" and "pentapod."

However, there are some difficulties associated with an increase in the number of overlapping coordinate complex system calibration, and limited angle platforms, etc.

PROBLEM STATEMENT

To solve these problems intention is structural and kinematic analysis of a multiaxis milling machine with PKM aimed at finding rational kinematic structure.

MAIN ARTICLE

Kinematic analysis [2] was promoted to computer-aided design SolidWorks with using moving solid models. Overall was investigated 6 basic models to obtain 4-coordinate system spatial motion (three linear coordinates and one rotating) using four drives. The kinematic schemes were examined with different versions of the guide orientation in space, as well as various combinations of hinges and rods of constant length.

Table. 1 shows the analysis of the principal kinematic scheme describing the formative movements and classification joints.

ВСТУП

Використання механізмів паралельної структури (МПС) у верстатобудуванні обумовлене наступними перевагами: високою жорсткістю, низькою металоємністю, низькими інерційними масами рухомих вузлів, підвищеними прискореннями руху виконавчого органу (ВО), та ін. [1].

Забезпечення цих показників є найбільш важливим при багатокординатній, об'ємній обробці деталей із використанням чотирьох, або п'яти робочих координат, оскільки в даному випадку, як правило, зростає кількість холостих переміщень ВО відносно оброблюваної деталі, що збільшує час обробки на верстаті. Реалізація вказаних показників у верстатах з МПС досягається, як правило, шляхом введення додаткових паралельних кінематичних ланцюгів, як виконано у верстатах типу "гексапод", та "пентапод".

Однак, наряду з цим виникають певні складнощі, пов'язані з підвищенням кількості дублюючих координат, складною системою калібрування, а також обмеженим кутом нахилу платформи та ін.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ



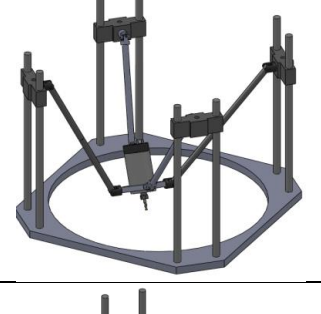


Для вирішення даних проблем метою роботи є структурно-кінематичний аналіз багатокординатного фрезерного верстату з МПС, направлений на пошук раціональної кінематичної структури.


ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Кінематичний аналіз [2] проведено в системі автоматизованого проектування SolidWorks із використанням рухомих твердотільних моделей. Загалом було досліджено 6 основних моделей з метою отримання 4-координатної системи просторового переміщення (три лінійних координати та одна обертова) із використанням чотирьох приводів. Для цього кінематичні схеми були розглянуті з різними варіантами орієнтації напрямних у просторі, а також з різними комбінаціями шарнірів і штанг постійної довжини.

В табл. 1 наведено проаналізовані основні кінематичні схеми з описом формоутворюючих рухів і класифікацією шарнірів.

Table 1

Structural analysis / Структурний аналіз					
№ п/п	Загальний вигляд компоновання МПС у 3D / General view layout PKM in 3D	Вісі МПС / Axis PKM	Шарніри / Joints		Опис / Description
			Ступінь Рухомості / The degree of mobility	Тип / Type	
1.		X, Y, Z, A	2	Карданний (оберт + нахил) / Cardan (rotation + slope)	МПС має 3 лінійні координати (X, Y, Z) і одну обертину (A), 4 штанги постійної довжини, одна пара яких зв'язана з однією напрямною, а інша пара з двома іншими, що лежать в одній площині з першою, і перпендикулярні їй. / PKM has 3 linear coordinates (X, Y, Z) and one rotary (A), 4 bar constant length, one pair of which is associated with one guide rail, and another couple with two others that are in the same plane with the first and perpendicular to it.
2.		Кінематично невизначений / Kinematic uncertain	2 і 3 / 2 and 3	Карданний (оберт + нахил) / Cardan (rotation + slope)	МПС містить карданні шарніри, причому 4 з них мають додаткову ступінь вільності і обертаються навколо своєї осі, а інші 4, що розміщені перпендикулярно, мають лише 2 ступеня вільності. Механізм має кінематичну невизначеність. / PKM has the universal joints, 4 of them have a greater degree of freedom and rotate around its axis, and the other 4 that are perpendicular, with only 2 degrees of freedom. Kinematic mechanism is uncertain.
3.		Кінематично невизначений / Kinematic uncertain	2	Карданний + обертаний / Cardan + rotating	МПС включає в себе поєднання карданних і обертаних шарнірів, пари яких розміщені перпендикулярно. Механізм має кінематичну невизначеність через надлишковий ступінь вільності. / PKM includes the combination of rotating and cardan joints, which are perpendicular pairs. Kinematic mechanism is uncertain because of excessive degree of freedom.
4.		Кінематично невизначений / Kinematic uncertain	2	Обертаний (оберт + нахил) / Rotating (rotation + slope)	МПС містить лише обертані шарніри, розміщені попарно і перпендикулярно один до одного. Механізм має кінематичну невизначеність через надлишковий ступінь вільності. / PKM contains only rotating joints placed in pairs and perpendicular to each other. Kinematic mechanism is uncertain because of excessive degree of freedom.
5.		X, Y, Z	2	Карданний (оберт + нахил) / Cardan (rotation + slope)	МПС містить карданні шарніри з двома ступенями вільності. З цієї причини механізм має лише 3 лінійні координати (X, Y, Z). Напрямні розміщені під кутом 70° до горизонту. / PKM provides cardan joints with two degrees of freedom. For this reason, the mechanism has only three linear coordinates (X, Y, Z). The guides are at an angle of 70° to the horizontal.

6.		X, Y, Z, A	2	Паралелограм + обертовий / Parallelogram + rotating	<p>МПС містить поєднання паралелограмних штанг і штанг з обертовими шарнірами, що розміщені T-подібно.</p> <p>При синхронному русі штанг з обертовими шарнірами МПС функціонує як триглайд, при різносторонньому русі додається координата А. / PKM contains the combination of parallelogram bars and rods with rotating joints that are T-shaped.</p> <p>In synchronous motion rods with rotating joints PKM functions as Triglide, the versatile motion attached coordinate A.</p>
----	---	---------------	---	---	---

Structural and kinematic analysis shows that the most optimal layout option № 6 4-coordinate mechanism (Table. 1), which is implemented by means of PKM three linear coordinates (X, Y, Z) and a rotating (A), with 5 coordinate (B) can be implemented using a rotating table.

This constructive realization Machine allows to simplify the kinematic structure of PKM compared with such a multiaxis machines "heksapod" and "pentapod", ensuring the rotation tool 180 ° and three linear coordinates.

On the basis of the kinematic structure developed version constructive implementation of the machine, in which two guides are at an angle to the horizontal plane.

Machine (Fig. 1) [3] consists of upper and lower bases 1 and 2 which are still linked by linear motion modules 3, 4, 5 and 6 [4].

З проведеного структурно-кінематичного аналізу видно, що найбільш оптимальним є варіант компонування № 6 4-координатного механізму (табл. 1), в якому за допомогою МПС реалізовано три лінійні координати (X, Y, Z) та одну обертову (A), при цьому п'яту координату (B) можливо реалізувати за допомогою обертового столу.

Дана конструктивна реалізація верстату дозволяє суттєво спростити кінематичну структуру МПС, порівняно з подібними багатокоординатними верстатами типу "гексапод", та "пентапод", забезпечивши при цьому оберт ВО до 180° і три лінійні координати.

На основі отриманої кінематичної структури розроблено варіант конструктивної реалізації верстату, в якому дві протилежних напрямні розташовані під кутом до горизонтальної площини.

Верстат (рис. 1) [3] складається з нижньої та верхньої основ 1 і 2, які нерухомо зв'язані між собою модулями лінійного переміщення 3, 4, 5 та 6 [4].

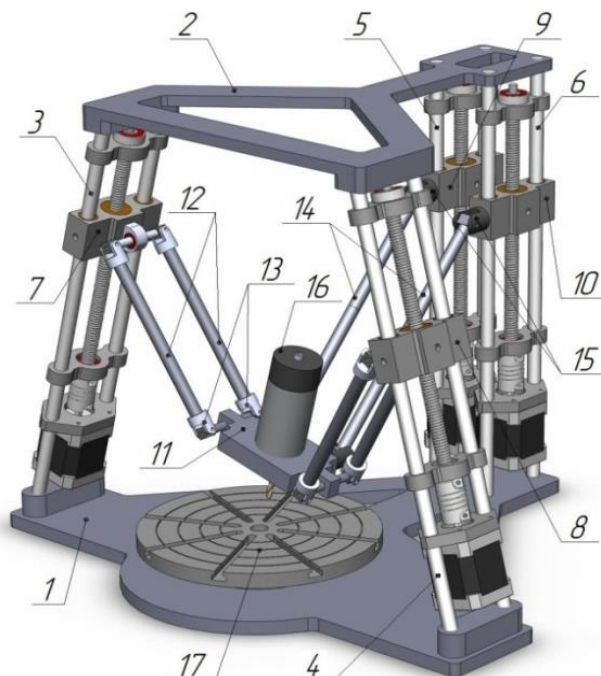


Fig. 1 – The multiaxis milling machine with PKM (3D model) and include racks at an angle / Багатокоординатний фрезерний верстат з МПС (3D модель) з розміщенням стійок під кутом

Modules 3 and 4 form a wedge shape with bases and modules 5 and 6 are set perpendicular to the basics and form a rectangular parallelepiped. Modules 3 and 4 contain carriage

Модулі 3 і 4 утворюють з основами клиноподібну фігуру, а модулі 5 та 6 встановлені перпендикулярно основам і утворюють прямокутний паралелепіпед. Модулі 3 і 4 містять каретки 7 та 8, а

7 and 8, and module 5 and 6 contain carriage 9 and 10. Carriages 7 and 8 are connected to the platform 11 parallelogram rods 12 and 13. Carriages hinges 9 and 10 are connected to the platform 11 single rods 14 by a hinge 15. The platform 11 mounted motor spindle 16. To expand the technological capabilities of the machine, based on 1 is rotating table 17.

The machine works like this: if all PKM carriage moves in one direction up or down - the platform moves along the axis Z (Fig. 2a); If the carriage 7 and 8 are moved in different directions, and the carriage 9 and 10 in one direction - platform moves along the axis X (Fig. 2b); If the carriage 7 and 8 are moved in one direction and the carriage 9 and 10 in the other - the platform moves along the axis Y (Fig. 2, a); If the carriage 7 and 9 are moved in one direction and the carriage 8 and 10 in the other - the platform rotates around the axis A.

So PKM Machine has 4 coordinates - three linear (X, Y, Z) and one rotary (A). Workpiece sets on the table 17 that rotates about an axis in the machine and provides additional fifth coordinate.

модулі 5 та 6 містять каретки 9 та 10. Каретки 7 і 8 зв'язані з платформою 11 паралелограмними штангами 12 і шарнірами 13. Каретки 9 та 10 зв'язані з платформою 11 одинарними штангами 14 за допомогою шарнірів 15. На платформі 11 встановлений мотор-шпindel 16. Для розширення технологічних можливостей верстату, на основі 1 розміщений обертний стіл 17.

Верстат працює таким чином: якщо всі каретки МПС переміщуються в одному напрямку вгору чи вниз - платформа рухається вздовж осі Z (рис. 2, а); якщо каретки 7 та 8 переміщуються в різних напрямках, а каретки 9 та 10 в одному напрямку - платформа рухається вздовж осі X (рис. 2, б); якщо каретки 7 та 8 переміщуються в одному напрямку, а каретки 9 та 10 в іншому - платформа рухається вздовж осі Y (рис. 2, в); якщо каретки 7 та 9 переміщуються в одному напрямку, а каретки 8 та 10 в іншому - платформа обертається навколо осі А.

Таким чином МПС верстату має 4 координати - три лінійні (X, Y, Z) і одну обертову (A). Оброблювана заготовка встановлюється на стіл 17, який обертається навколо осі В і забезпечує верстат додатковою п'ятою координатою.

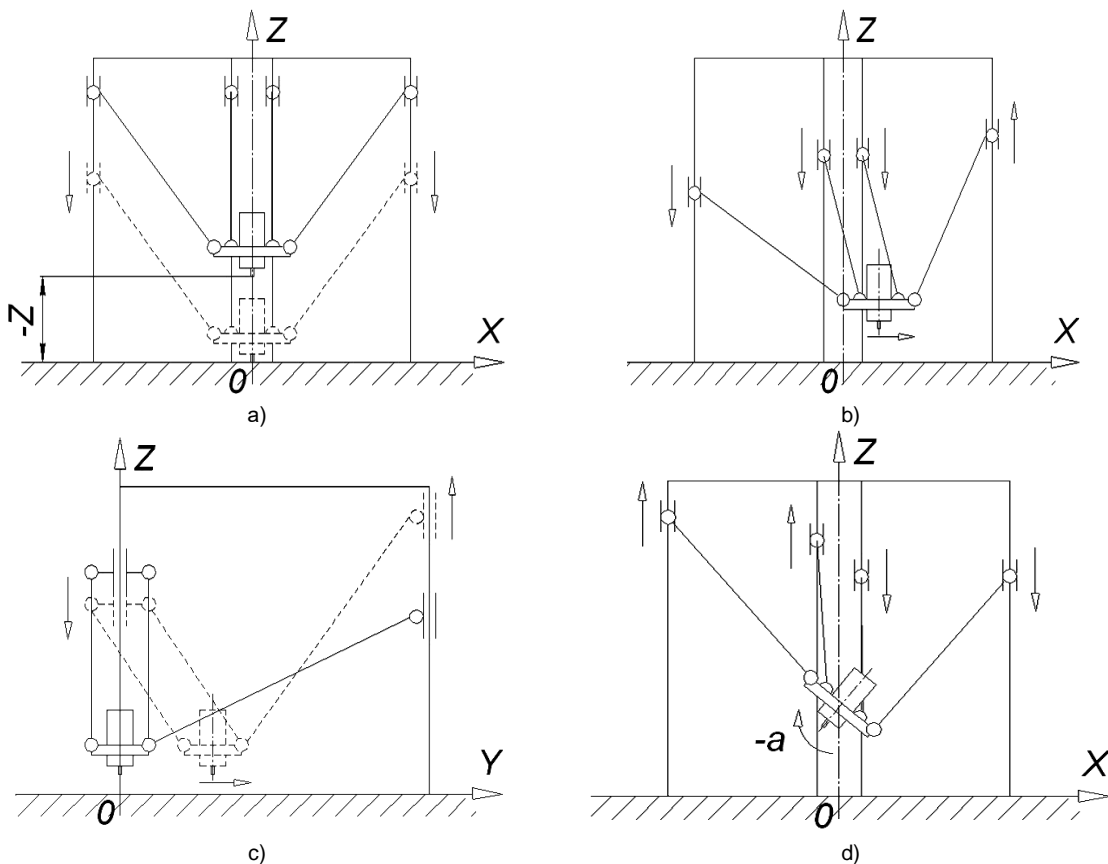


Fig. 2 - Mobility PKM Machine Vertical placement guides: a - move along the axis Z; b - the movement along the axis X; c - motion along the axis Y; d - rotation around the axis A / *Рухові можливості МПС верстату з вертикальним розміщенням напрямних: а - рух вздовж осі Z; б - рух вздовж осі X; с - рух вздовж осі Y; d - оберт навколо осі А*

Kinematic motion depending of the instrument will set the example circuit machine, which is located in the plane XY (Fig. 3).

It is necessary mathematically describe the relationship between the coordinates of the tool - the point S (x, y) and linear positioning module

Визначимо кінематичні залежності руху ВО на прикладі схеми верстату у площині XY (рис. 3).

Для цього необхідно математично описати залежність між координатами кінця інструменту - точки S (x, y) і величиною позиціонування лінійного модуля - довжиною відрізка BK. Іншими словами

size – length of the segment BK. In other words to express terms of positioning end dependence on the position of the tool carriage which moves on directing a given length. Consider a flat mechanism shown in Fig. 3.

виразити залежність точки позиціонування кінця інструменту від положення каретки, яка переміщується по напрямній заданої довжини.

Розглянемо плоский механізм, зображений на рис. 3.

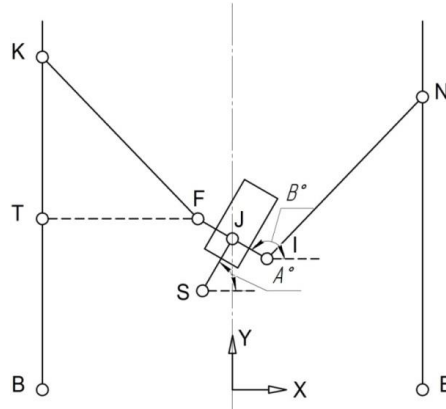


Fig. 3 – The kinematics of the machine in the XY plane / Кінематична схема верстату у площині X Y

The first step is to find the position of the J (the coordinates of x_J and y_J), depending on the position of the S, including the ability to change the length of the tool SJ, and instrument angle A° .

The next step is to find the coordinates of the point F (x_F , y_F) - position of the end of the platform, given its length FJ. It is also important to consider not only the tool angle α , but the angle of the platform β . Accordingly, we get:

На першому етапі необхідно знайти положення точки J (координати точки x_J та y_J), в залежності від положення точки S, враховуючи можливість зміни довжини інструменту SJ, а також кут нахилу інструменту A° .

Наступний крок це знаходження координат точки F (x_F , y_F) – положення кінця платформи, з урахуванням її довжини FJ. Важливо також врахувати не тільки кут нахилу інструменту α , а й кут нахилу самої платформи β . Відповідно, отримуємо:

$$\begin{aligned} x_F &= FJ \cdot \cos(\beta) + x_J = FJ \cdot \cos(\beta) + SJ \cdot \cos(A^\circ) + x \\ y_F &= FJ \cdot \sin(\beta) + y_J = FJ \cdot \sin(\beta) + SJ \cdot \sin(A^\circ) + y \end{aligned} \quad (1)$$

To calculate the length TF, it is enough to consider the coordinates of the axis of abscissas making a projection on a conventional length segment BK. Then it becomes apparent that the length of the segment TF is the difference between the coordinates of point B and F.

Для обчислення довжини TF, достатньо врахувати координати по вісі абсцис, зробивши проєкцію на умовний відрізок BK. Тоді стає очевидним, що довжина відрізка TF – це різниця між координатами точки B та F.

The resulting value TF is also a key component for finding the lengths of TK. It must be remembered that the length of the rod KF known, and it is the hypotenuse of the triangle TFK. Accordingly, angled triangle on the hypotenuse and legs, we find the second castets:

Знайдена величина TF – є також основною складовою для знаходження довжини відрізка TK. З урахуванням того, що довжина штанги KF відома, вона також є гіпотенузою трикутника TFK. Відповідно, в прямокутному трикутнику по гіпотенузі та катету, знаходимо другий катет:

$$TK = \sqrt{KF^2 - TF^2} = \sqrt{KF^2 - [x_B - [FJ \cdot \cos(\beta) + SJ \cdot \cos(A^\circ) + x]]^2} \quad (2)$$

The last part of the kinematic dependence is length of TB, which is in principle calculation interval TF, but as the sum of the coordinates on the axis y:

Остання складова кінематичної залежності – це довжина відрізка TB, яка знаходиться по принципу розрахунку відрізка TF, але як сума координат по вісі y:

$$TB = y_B + y_F = y_B + (FJ \cdot \sin(\beta) + SJ \cdot \sin(A^\circ) + y) \quad (3)$$

The length of the segment BK is calculated:

Довжина обчислюваного відрізка BK дорівнює:

$$BK = TK + TB = \sqrt{KF^2 - (x_B - [FJ \cdot \cos(\beta) + SJ \cdot \cos(A^\circ) + x])^2} + y_B + [FJ \cdot \sin(\beta) + SJ \cdot \sin(A^\circ) + y] \quad (4)$$

Thus, step by step executing this algorithm, we

Таким чином, покроково виконуючи цей

obtain a mathematical relationship, which describes the move tool (change in length of the segment BK), taking into account the position of the carriage and platform not only straight lines and angles of rotation of A° and B° .

Having dependence which mathematically describes the structure of the mechanism on the plane, it is necessary to derive the dependence of the mathematical description and computer control in the scheme area.

Consider the calculation of the inverse kinematics problem in space (Fig. 4). The complexity of the calculation is needed to introduce a mathematical coordinates depending on another coordinate z.

алгоритм, отримаємо математичну залежність, яка описує переміщення інструменту (зміна довжини відрізка BK), з урахуванням положення платформи та каретки не тільки прямолінійно, а також з кутами повороту A° та B° .

Отримавши залежність, яка математично описує структуру даного механізму на площині, необхідно вивести залежність для математичного опису та комп'ютерного керування даною схемою у просторі.

Розглянемо розрахунок оберненої задачі кінематики у просторі (рис. 4). Складність розрахунку полягає в необхідності введення в математичні залежності ще однієї координати – z.

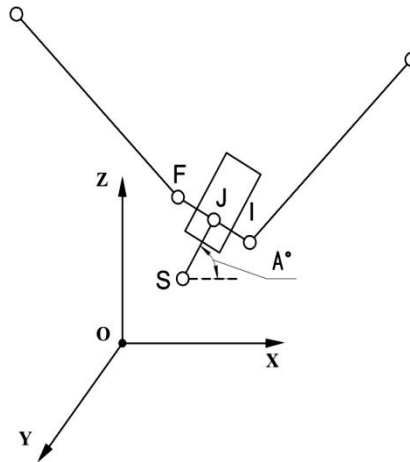


Fig. 4 – The kinematics of the machine in space / Кінематична схема верстату у просторі

It is necessary mathematically describe the relationship between the position of the segment in space, in which one end (coordinates of the tool) is point S (x, y, z), and the other is the point J (x_J; y_J; z_J), which lies in the plane of the platform.

Use the following mathematical algorithm:

1) Finding the coordinates of the segment using the known length of the segment:

$$SJ = \sqrt{(x_J - x)^2 + (y_J - y)^2 + (z_J - z)^2}, SJ = d \quad (5)$$

2) The segment SJ lies in the plane that passes through the point S parallel to the plane XOZ, so the equation of this plane will look like $y_J = y$.

Output: $SJ \parallel XOZ$ and $y_J = y$.

3) The angles between the plane $Ax + By + Cz + D = 0$ and segment SJ is calculated as follows:

$$\sin A = \frac{|x \cdot l + y \cdot m + z \cdot n|}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \cdot \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} \quad (6)$$

4) XOY plane has equation $zJ = 0$.

Its normal vector (0, 0, 1).

His unit is equal to 1.

The unit vector direct (x_J-x; y_J-y; z_J-z).

His unit is equal to d.

We make and solve the system of equations:

Для цього необхідно математично описати залежності положення відрізка у просторі, у якого один кінець – це координата кінця інструменту – точка S (x, y, z), а інший – точка J (x_J; y_J; z_J), яка лежить у площині платформи.

Використаємо наступний математичний алгоритм:

1) Знаходження координати точок відрізка через відому довжину даного відрізка:

2) Відрізок SJ лежить в площині, яка проходить через точку S паралельно площині XOZ, тому рівняння цієї площини матиме вигляд $y_J = y$. Вихідні дані: $SJ \parallel XOZ$ та $y_J = y$.

3) Кути між площиною $Ax + By + Cz + D = 0$ і відрізком SJ Знаходиться наступним чином:

4) Площина XOY має рівняння $zJ = 0$.

Її нормальний вектор (0;0;1).

Його модуль дорівнює 1.

Направляючий вектор прямої (x_J-x; y_J-y; z_J-z).

Його модуль дорівнює d.

Складаємо та розв'язуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (x_J - x)^2 + (y_J - y)^2 + (z_J - z)^2 = d^2 \\ y_J = y \\ |z_J - z| = d \cdot \sin A \end{cases} \quad (7)$$

Necessary resolutions:

$$\begin{cases} x_J = x \pm d \cdot \cos A \\ y_J = y \\ z_J = z \pm d \cdot \sin A \end{cases} \quad (8)$$

Obtained the coordinates of J (x_J ; y_J ; z_J), described through the known values and the coordinates of S (x ; y ; z), that is, depending on the position of point S, including the ability to change the length of the tool SJ, and instrument angle A : J ($x \pm d \cdot \cos A$; y_J ; $z \pm d \cdot \sin A$).

Solving the inverse kinematics problem allows mathematically describe the resulting circuit design of the machine, combining obtained depending on the plane with dependencies in space, enables to control the machine with a computer, calculating dependencies for each drive.

CONCLUSIONS

We conducted a kinematic analysis of 4-coordinate PKM the bar of constant length, we also used a method of sorting options combination hinges and rod guides for different orientations in space. The result obtained is rational kinematic scheme in which there are three linear coordinates (X , Y , Z) and one rotating (A).

On the basis of the kinematic scheme is proposed structural example implementing a multi milling machine PKM. For this Machine it was decided inverse kinematics task, it is necessary for the implementation of computer control system. It is also important that obtained using mathematical relationships appropriate to carry out computer simulations formative movements Machine on various complex trajectories.

REFERENCES

- [1]. Y. Kuznetsov, D. Dmitriev, G. Dinevich (2010) – The Layouts of machines with mechanisms of parallel structure. Kherson: V. Vyshemyrsky company - 471 p.
- [2]. Y. Kuznetsov, O. Stepanenko (2011) – Structural and kinematic analysis of drilling-milling machine with tapered layout. Technological systems, Luck. – № 3.
- [3]. Y. Kuznetsov, O. Stepanenko, M. Manzhola (2012) - Multiaxis milling machine. Patent for useful model № 74716 Ukraine. IPC B23B 35/00; appl. 10.04.2012, Publ. 12.11.2012. Bull. № 21.
- [4]. Y. Kuznetsov, O. Stepanenko, (2012) - Linear motion module. Patent for useful model № 68238 Ukraine. IPC B23B B23Q 5/00, B23C 1/00; appl. 29.06.2011, Publ. 26.03.2012. Bull. № 6.

Отримано необхідні залежності:

Отримані координати точки J (x_J ; y_J ; z_J), які описані через відомі величини та координати точки S (x ; y ; z), тобто в залежності від положення точки S, враховуючи можливість зміни довжини інструменту SJ, а також кут нахилу інструменту A : J ($x \pm d \cdot \cos A$; y_J ; $z \pm d \cdot \sin A$).

Розв'язання оберненої задачі кінематики дозволяє математично описати отриману схему конструкторської верстату та, поєднавши отримані залежності на площині з залежностями у просторі, дає змогу керувати верстатом за допомогою комп'ютера, розрахувавши всі залежності для кожного з приводів.

ВИСНОВКИ

Проведено кінематичний аналіз 4-координатного МПС на штангах постійної довжини методом перебору варіантів комбінації шарнірів і штанг при різній орієнтації напрямних у просторі, в результаті якого вдалося отримати раціональну кінематичну схему, в якій реалізовано три лінійних координати (X , Y , Z) і одну обертову (A).

На основі отриманої кінематичної схеми запропоновано приклад конструктивної реалізації багатокоординатного фрезерного верстату з МПС, для якого вирішено обернену задачу кінематики, що необхідно для реалізації комп'ютерної системи керування. Крім того, за допомогою отриманих математичних залежностей доцільно проводити комп'ютерне моделювання формоутворюючих рухів верстату по різним складним траєкторіям.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

- [1]. Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А., Диневич Г.Е. (2010) – Компонировки станков с механизмами параллельной структуры. Изд-во: Херсон, ПП Вишемирский В.С. – 471 с.
- [2]. Кузнецов Ю.М., Степаненко О.О. (2011) – Структурно-кинематичний аналіз свердильно-фрезерного верстату клиноподібної компоновки. Технологічні комплекси, Луцьк. – № 3.
- [3]. Кузнецов Ю.М., Степаненко О.О., Манжола М.Ю. (2012) – Багатокоординатний фрезерний верстат. Патент України на корисну модель № 74716. МПК B23B 35/00; заявл. 10.04.2012; Опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21.
- [4]. Кузнецов Ю.М., Степаненко О.О. (2012) – Модуль лінійного переміщення. Патент України на корисну модель № 68238. МПК B23B B23Q 5/00, B23C 1/00; заявл. 29.06.2011; Опубл. 26.03.2012. Бюл. № 6.