

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.06

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.68-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.68-74)

Д. В. Вахніченко, канд. техн. наук, М. О. Годунко, доц., канд. техн. наук, С. В. Писанка  
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: vakhnichenkod@gmail.com, maksimgodunko83@gmail.com, sergii.pysanka@gmail.com

## Дослідження рухових можливостей кінематичних ланок МПС при формоутворюючих рухах осьовим інструментом

В статті виконано кінематичний аналіз формоутворюючих рухів верстату з механізмом паралельної структури (МПС) при виконанні типових технологічних операцій. Розглянуто математичну модель верстату типу «гексапод» при виконанні даних операцій, таких як свердління та фрезерування. Досліджено рухові можливостей кінематичних ланок МПС при лінійних, площинних та просторових формоутворюючих рухах. Визначено залежності між координатними рухами інструменту в процесі обробки та зміною довжини кінематичних ланок МПС.

**механізм паралельної структури, верстат з паралельною кінематикою, гексапод**

**Постановка проблеми.** Сучасне верстатобудування ставить перед собою ряд завдань щодо розвитку, вдосконалення існуючого обладнання та пошуку нових інноваційних рішень, які призводять до створення нового обладнання. Не оминуло це і верстати з механізмами паралельної структури (МПС), які після етапу впровадження у верстатобудування перейшли до етапу вдосконалення їх функціональних та технологічних можливостей. Будь-яка запропонована конструкція верстату з МПС потребує обґрунтування вибору конструктивних параметрів та технічних характеристик для можливості подальшого впровадження даного обладнання у виробництво.

Функціональні можливості верстату з МПС пов'язані насамперед з компоновкою і конструктивним виконанням основних елементів МПС та верстатної системи в цілому. Технологічні можливості верстату залежать від конструкторсько-геометричних параметрів оброблюваних деталей, методу обробки, схем формоутворюючих поверхонь та реалізації координатних рухів пов'язаних з процесом обробки.

Компоновка верстату з МПС зазвичай має модульне виконання, до основних модулів якої можна віднести: несучу систему (каркас), виконавчий орган з приводом головного руху та інструментом, кінематичні ланки з індивідуальним приводом та опорними вузлами. Також присутні функціональні сервісні системи, до яких належать системи числового програмного управління (ЧПУ), контролю та діагностики, зміни інструменту, змащення та інші.

На обґрунтування вибору параметрів верстату впливає відповідність між технічними характеристиками МПС та величиною необхідних координатних рухів, узгодженість технічних характеристик верстата з вимогами до виконання технологічної операції та конструкторсько-геометричні параметрами оброблюваної деталі.

Так як координатні переміщення виконавчого органу для реалізації технологічної операції пов'язаною з обробкою деталей виконуються кінематичними ланками, то пропонується дослідити показник рухових можливостей кінематичних ланок МПС при виконанні процесу формоутворення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні проведено багато різних

досліджень самих механізмами паралельної структури та верстатів побудованих на їх основі. Визначено, що для доцільного вибору верстату на основі механізму паралельної структури необхідно визначити робочий простір самого МПС та простір в якому виконується безпосередньо сама обробка [2, 3, 8, 9].

Після визначення робочого простору МПС, визначаються необхідні координатні переміщення інструменту в межах робочого простору, що характеризуються, як рухові можливості верстату [1, 5] для забезпечення виконання технологічної операції обробки

Технологічні операції пов'язані з процесом обробки можуть характеризуватися простими рухами, наприклад виконання операції свердління [2, 4] так і складними просторовими рухами, наприклад виконання формоутворюючих рухів на багатоцільовому токарному верстаті з МПС [7].

**Постановка завдання.** Переважним напрямком використання верстатів з МПС є виконання обробки деталей складної форми за рахунок високої рухомості виконавчого органу. Найбільше розповсюдження отримав верстат з МПС типу «гексапод», оскільки має 6 кінематичних ланок, що забезпечує достатню жорсткість та рухливість.

Для більш якісного проектування даного обладнання необхідний обґрунтований вибір його конструктивних параметрів від яких залежать його рухові можливості по лінії, в площині та просторі.

Так, з попередніх досліджень конструктивних параметрів при виконанні свердлильних операцій визначено, що найбільший вплив на показник рухових можливостей має довжина кінематичних ланок, так як вона забезпечує координатні переміщення інструменту в процесі обробки [4].

Пропонується дослідити показник рухових можливостей кінематичної ланок верстату з МПС при більш складних формоутворюючих рухах інструменту при виконанні технологічної операції механічної обробки, наприклад фрезерування.

**Викладення основного матеріалу.** Функціональні можливості верстата з МПС насамперед залежать від геометричного простору в якому відбувається функціонування.

В даних дослідженнях розглядається технологічна частина робочого простору верстату з МПС, яка формується вершиною ріжучого інструменту і включає в себе зону установчих рухів, технологічну зону (зона обробки) і резервну технологічну зону (рис.1).

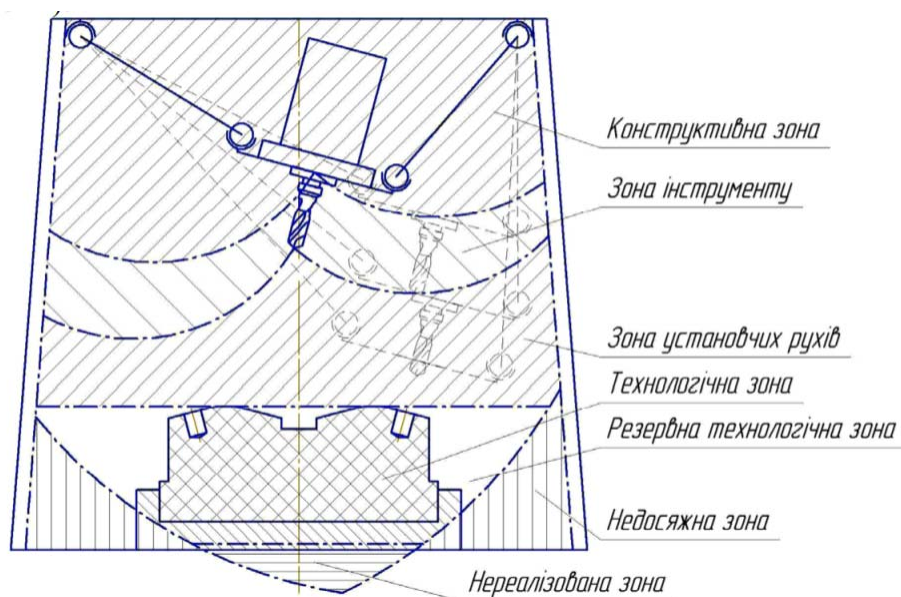


Рисунок 1 – Поділ робочого простору верстату з МПС на зони

Джерело: розроблено на основі [2]

Обґрунтування величини робочого простору в залежності від виконуваної технологічної операції дозволяє встановити габаритні і конструкторсько-технологічні розміри верстату з механізмом паралельної структури та його основних модулів. В залежності від виду технологічної операції оцінка робочого простору може оцінюватись різними показниками, так для виконання лінійних переміщень достатньо оцінки по лінії та в площині (свердління, розточування), для операцій фрезерування треба виконувати оцінку робочого простору слід виконувати в площині та об'ємному просторі.

Після визначення робочого простору для виконання технологічної операції механічної обробки необхідно врахувати координатні рухи кінематичних ланок МПС, що забезпечують просторову орієнтацію виконавчого органу та забезпечують його лінійні та обертові формоутворюючі рухи.

Важливо, при проектуванні верстатів з МПС необхідно забезпечити його подальше ефективне функціонування, що має вплив на формоутворення та обробку деталі в цілому.

До типових технологічних рухів верстату з МПС можна віднести переміщення виконавчого органу з інструментом при розточуванні, свердлінні, фрезеруванні в яких виконавчий орган з інструментом здійснює рух подачі, а також допоміжні рухи – переміщення, підведення і відведення інструмента.

Пріоритетними схемами обробки осьовим інструментом для даного обладнання є виконання свердлильних і фрезерних операцій. Тому було розглянуто свердління під кутом в просторі (переміщення інструменту із зміною кількох координат одночасно) та фрезерування у площині та просторі за різними технологічними схемами.

При обґрунтуванні конструктивних параметрів МПС, із попередніх досліджень, було запропоновано ряд співвідношень між конструктивними параметрами верстату з МПС. Оскільки найбільший вплив на рухові можливості версту з МПС має зміна довжини кінематичної ланки, в даних дослідженнях її оцінку виконаємо відповідним показником, який являє собою відношення поточної довжини кінематичної ланки ( $l_{nom}$ ) до максимально можливої ( $L_{max}$ ) [4,5]:

$$i = \frac{l_{nom}}{L_{max}} \quad (1)$$

Для виконання досліджень в програмному середовищі MathCad було використано загальну математичну модель конструкції верстату з МПС враховуючі розташування його опорних вузлів у вигляді матриці [6] та відповідно створено математичну модель кожної кінематичної ланки (рис.2) з урахуванням координатних переміщень у просторі.

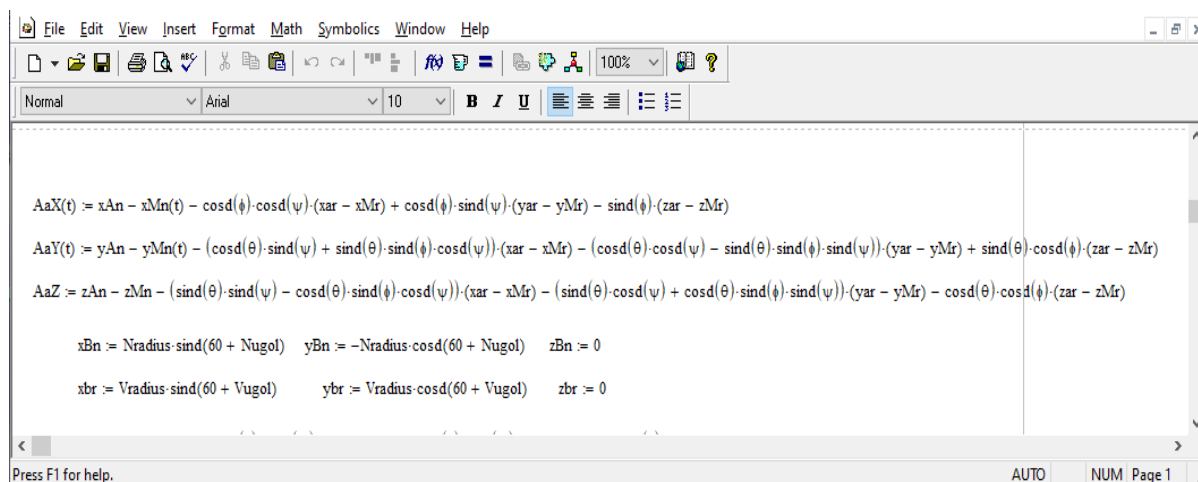


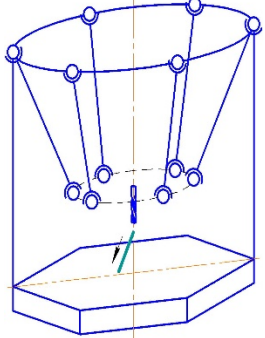
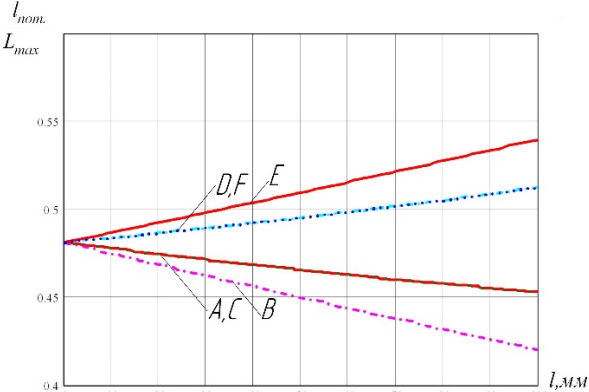
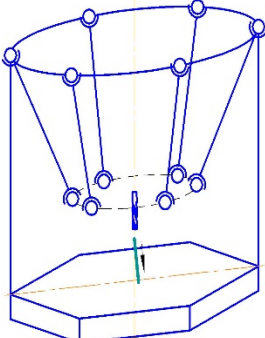
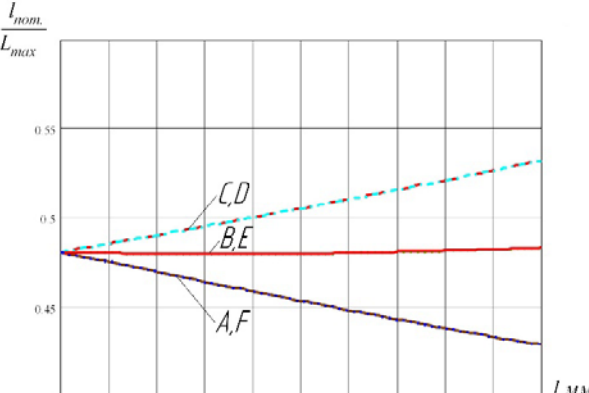
Рисунок 2 – Математична модель кінематичної ланки змінної довжини верстату типу «гексапод»  
Джерело: розроблено на основі [2,6]

Для виконання технологічної операції було створено математичні моделі траєкторій формуючого руху вершини інструменту, який встановлено на виконавчому органі верстату. Виконавчий орган орієнтується в просторі кінематичними ланками змінної довжини, рухові можливості яких і досліджуються в даній роботі. При цьому в дослідженнях не було враховано обмеження, що можуть бути накладені системою опорних шарнірів за рахунок максимальних кутів обертання відносно їх осі.

Схеми типових формуючих рухів та аналіз рухових можливостей кінематичних ланок (які позначено А,В,С,Д,Е,Ф) наведено нижче (табл.1-табл.3).

Першими розглянуто схеми за якими виконуються операції розточування, свердління чи підвід інструменту, при якому переміщення інструменту відбувається вздовж однієї з координат або кількох одночасно. Зміни довжини кінематичних ланок при переміщенні по кількох координатах одночасно представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Формуючі рухи верстатом типу «гексапод» при переміщенні вздовж кількох координат

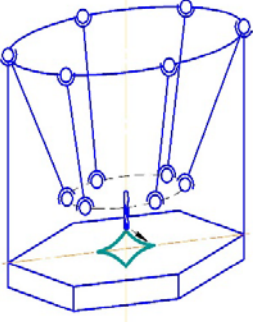
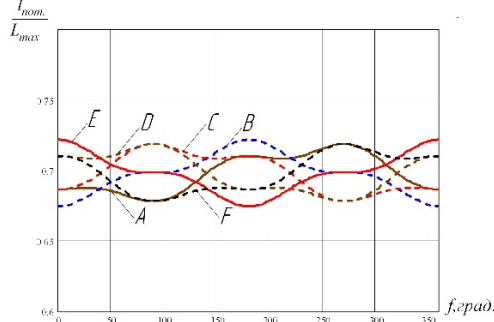
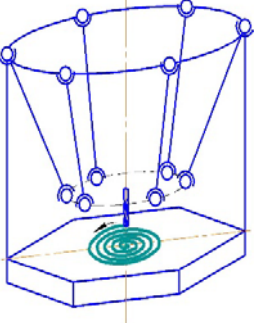
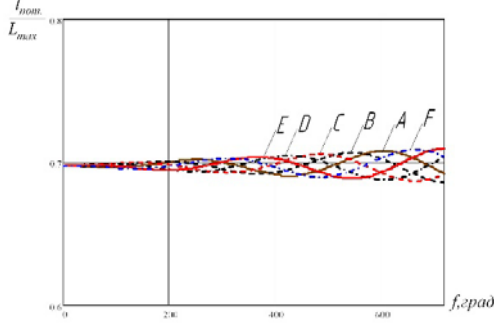
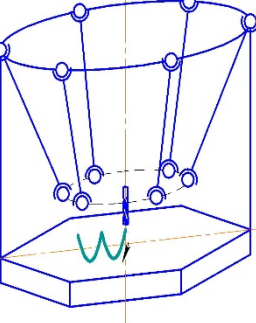
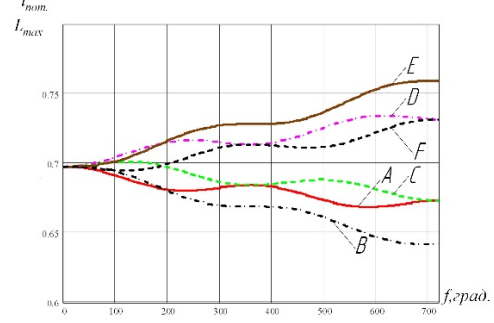
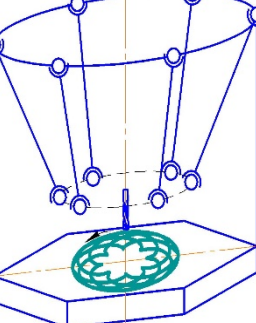
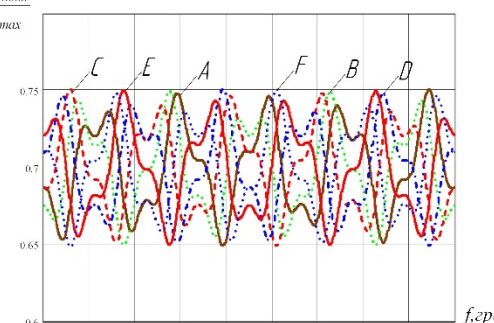
Формуючий рух та його типова схема		Показник рухових можливостей кожної кінематичної ланки при формуюванні
Рух інструменту по XZ		
Рух інструменту по YZ		

Джерело: розроблено авторами

Однією з переваг верстатів з МПС є обробка складних фасонних поверхонь та обробка за технологічними схемами із складними траєкторіями руху інструменту. Розглянемо процес фрезерування за деякими типовими технологічними схемами. Зміну показника довжини кінематичних ланок при фрезеруванні в площині за технологічними схемами: «по астроїда», «по архімедовій спіралі», «по подовженій циклоїді» та «по епіциклоїді» представлено в таблиці 2.

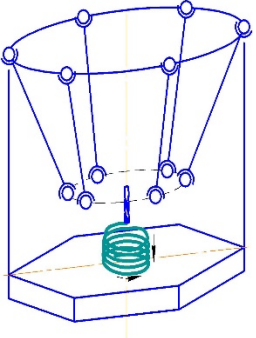
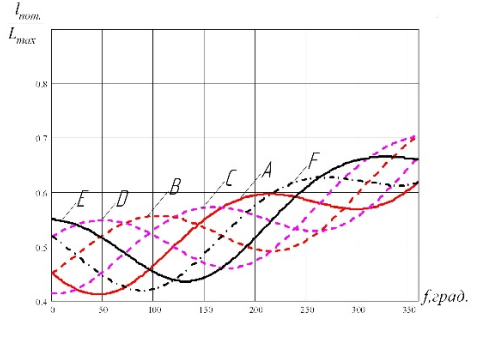
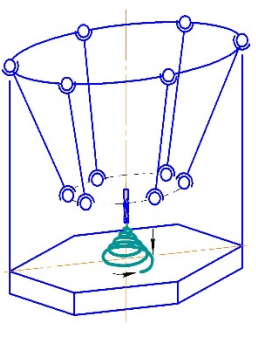
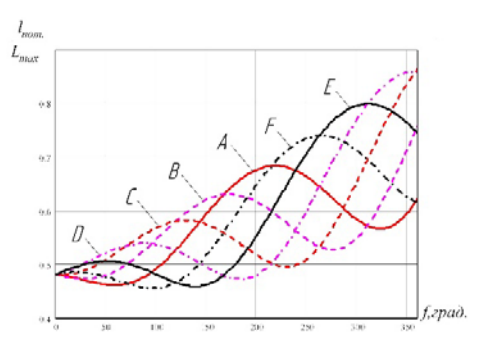
Зміна довжини кінематичних ланок при типових технологічних рухах в просторі розглянуто за схемами обробки по циліндричній і конічній гвинтовій лінії та відображено в таблиці 3.

Таблиця 2 – Формоутворюючі рухи верстатом типу «гексапод» в площині

Формоутворюючий рух та його типова схема		Показник рухових можливостей кожної кінематичної ланки при формоутворенні
<p>Рух інструменту «по астроді»</p>		
<p>Рух інструменту «по архімедовій спіралі»</p>		
<p>Рух інструменту «по циклоїді»</p>		
<p>Рух інструменту «по епіциклоїді»</p>		

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Формоутворюючі рухи верстатом типу «гексапод» в просторі

Формоутворюючий рух та його типова схема		Показник рухових можливостей кожної кінематичної ланки при формоутворенні
Рух інструменту по циліндричній гвинтовій лінії		
Рух інструменту по конічній гвинтовій лінії		

Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** При лінійному переміщенні інструменту в площинах XZ та YZ (табл.1) кожна кінематична ланка змінює довжину за відповідним законом: для схеми переміщення XZ довжина кінематичних ланок A, B, C зменшується, а D, E, F збільшується; для схеми YZ довжина кінематичних ланок C, D збільшується, B, E зменшується менш інтенсивно, а довжина кінематичних ланок A, F зменшується більш інтенсивно.

Зміна довжини кінематичних ланок при русі інструменту «по астріїді» та «по епіциклоїді» (табл.2) відбувається за відповідним законом при цьому збільшуючись і зменшуючись в невеликих межах. При русі «по архімедовій спіралі» довжина кінематичних ланок змінюється по синусоїді, при цьому довжина їх зростає по мірі віддалення від центру симетрії МПС. Рух «по подовженій циклоїді» змінює довжину кінематичних ланок за відповідним законом, довжина кінематичних ланок B, D, E збільшується, а A, C, F зменшується в залежності від того, в якому напрямку рухається інструмент від вісі симетрії МПС.

Розглянувши показник рухових можливостей кінематичної ланки при формоутворюючих рухах верстату з МПС в просторі (табл.3) бачимо, що для кожної із схем довжина кінематичних ланок змінюється по синусоїді та при цьому довжина їх збільшується по мірі переміщення інструменту по вісі Z. Відмінним є те, що для схеми «по циліндричній гвинтовій лінії» амплітуда коливання синусоїди зменшується, а для схеми «по конічній гвинтовій лінії» має протилежний характер.

## Список літератури

1. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. Кіровоград: КНТУ, 2007, 420 с.
2. Павленко І.І., Вахніченко Д.В. Дослідження робочого простору верстата з паралельною структурою. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут": Машинобудування*. 2014. Вип.71. С. 66-70.
3. Струтинський В.Б., Кириченко А.М. Геометрична побудова робочого простору обладнання з механізмами паралельної структури. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного*

- технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2011. Вип. 24. С. 216-222.
4. Павленко І.І., Вахніченко Д.В., Годунко М.О. Аналіз впливу конструктивних параметрів МПК на рух платформи під кутом. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип. 24., Ч. 1. С. 279–283.
  5. Павленко І.І., Валявський І.А. Рухові характеристики верстатів з паралельною кінематикою. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2008. Вип. 21. С. 304-3010.
  6. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Математичне моделювання положення вихідного органу І-координатного механізму. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2003. Вип. 12. С. 223–229.
  7. Кузнецов Ю. М. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури у верстатах нових компоновок. *Вісник Тернопільського державного технічного університету: машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки*. 2008. Вип. 13. С. 61–70.
  8. Angeles J. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms*. Springer, 2002, 520 p.
  9. Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 372 p.

## References

1. Pavlenko, I.I. (2007). *Industrial robots: basics of calculation and design*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
2. Pavlenko I.I., Vahnichenko D.V. (2014) *Research of zones of working space of the machine with parallel structure mechanism*. Kyiv: NTUU “KPI” [in Ukrainian].
3. Strutinskij V.B., Kirichenko A.M. (2011) *Geometric construction of the working space of parallel structure mechanisms*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
4. Pavlenko, I.I., Vakhnichenko, D.V., Hodunko, M.O. (2011). *Research of influence of design data on geometric parameters of the parallel structure mechanism*. [in Ukrainian].
5. Pavlenko, I.I. & Valiavs'kyj, I.A. (2008). *Motor characteristics of machines with parallel kinematics*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
6. Valyavskij I.A., Krizhanivskij V.A. (2003) *Mathematical modeling of the position of the moving platform of the parallel structure mechanism*. Kirovohrad: KDTU [in Ukrainian].
7. Kuznyecov Yu. M. (2008) *Visualization of form-forming movements by parallel structure mechanisms*. Ternopil: TDTU [in Ukrainian].
8. Bi Angeles J. (2002) *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms*. Springer.
9. Merlet J.-P. (2000) *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers.

**Dmytro Vakhnichenko**, PhD tech. sci., **Maksym Hodunko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergii Pysanka**  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Research on the Motor Capabilities of the Kinematic Links of the Machine with PKM During Shaping Movements with an Axial Tool**

Any proposed design of a machine with parallel kinematics machine (PKM) requires justification of the choice of design parameters and technical characteristics for the further implementation of this equipment in production. Since the coordinate movements of the executive body for the implementation of the technological operation associated with the processing of parts are performed by kinematic links, the indicator of the motor capabilities of the kinematic links of the PKM during the shaping process was investigated.

To carry out research in the MathCad, a general mathematical model of the design of a machine with PKM. First of all, boring and drilling schemes are considered, in which the tool moves along one or more coordinates simultaneously. Then, processing according to technological schemes with complex tool motion trajectories is considered, milling in a plane according to the technological schemes: along an astroid, along an Archimedean spiral, along an elongated cycloid and along an epicycloid. The change in the length of kinematic links during typical technological movements in space is considered according to the processing schemes along a cylindrical and conical helical line.

During linear movement of the tool in the XZ and YZ planes, the length of some kinematic links increases, while others decrease. The change in the length of kinematic links during movement of the tool “along an astroid” and “along an epicycloid” increases and decreases within small limits. During movement “along an Archimedean spiral”, the length of the kinematic links changes according to a sinusoid. Movement “along an elongated cycloid” changes the length of the kinematic links according to the corresponding law. The change in the length of kinematic links during machining “along a helical line” occurs according to a sinusoid, and their length increases when the tool moves along the Z axis. For the machining scheme “along a conical helical line”, it has the opposite character.

**parallel structure mechanism, machine tool with parallel kinematics, hexapod**

*Одержано (Received) 12.03.2025*

*Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2025*

*Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025*