

П.В. Кеба, м.н.с.
С.М. Півень, аспір.
Херсонський національний технічний університет

ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ ОБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

На сьогоднішній день область використання механізмів паралельної структури постійно розширюється і в той самий час ускладнюються конструкції верстатів та маніпуляторів, побудованих із використанням структур зазначеного типу. Найбільшого розповсюдження механізми із замкнутою структурою ланцюгів набули у робото-технічних комплексах, в яких маніпулятор виконує складні просторові рухи по заданій траєкторії. Однак, і на сьогоднішній день залишається відкритим питання розробки керуючих програм для нового обладнання, оскільки розроблені пост-процесори розраховані на створення програм вже існуючого обладнання.

Розглянуті питання, пов'язані з програмно-апаратним забезпеченням механізмів паралельної структури в системах автоматизованого моделювання. Розроблено програму для розрахунку зворотньої задачі кінематики для механізмів паралельної структури, яка в свою чергу може використовуватися як пост-процесор для визначення працездатності будь-якої нової компоновки верстатів. Наведено варіанти методів аналізу кінематики і розрахунку даних, отриманих в системах комп'ютерної математики на прикладі програми «Tools Glide».

Ключові слова: програмно-апаратне забезпечення; верстати з механізмами паралельної структури методи кінематичного аналізу; системи автоматизованого моделювання; комп'ютерна програма «Tools Glide».

Вступ. Механізми паралельної структури (МПС) як найпоширеніші серед виконавчих механізмів – маніпуляторів, випробувальних стендів та різних типів верстатів повністю забезпечують необхідні показники точності, продуктивності та функціональності. Економічні умови вимагають постійно створювати нове обладнання з МПС для рішення нових завдань, що постійно виникають в обробці матеріалів. Концепція каркасних компоновок дозволяє швидко створювати нове обладнання з МПС з потрібним ступенем вільності виконавчої ланки для виконання багатофункціональних задач [6]. Керування рухом виконавчої ланки передбачає контроль за функціональними рухами обробного інструменту в просторі і в часі, що обумовлює необхідність прогнозувати рух усіх ланок, вузлів та шарнірів [11]. Тому це обладнання може працювати лише в САМ-(computer aided manufactory) системах керування. Існуючі системи керування таким обладнанням містять у собі постпроцесори, які розроблені під вже існуючі моделі обладнання, а будь-який новий або модернізований верстат вимагає нового математичного опису. Ця задача потребує оптимізації розрахунків траєкторії руху ланок в узагальнених координатах і робочого органу – у глобальній системі координат [9]. Також під час створення нової компоновки верстату виникає необхідність адаптувати програму керування згідно з кінематичною структурою і одночасно виконувати аналіз характеристик жорсткості й динаміки технологічної системи. Компоновка – це найбільш відповідальніший етап проектування верстату та безпосередньо залежить від даних критеріїв та напрямку, впливає на конкурентоспроможність верстатного обладнання. Тому необхідність попереднього наскрізного аналізу компоновок як складних просторових стрижнево-полігональних систем це перша вимога до цього етапу проектування. Необхідно мати таку систему керування обладнання, яка може проводити кінематичні, жорсткісні та динамічні розрахунки верстатів на стадії вибору компоновки. Кінематичний аналіз в цьому переліку є одною з базових та найвідповідальніших стадій розробки обладнання з МПС, за результатами якого відбувається як порівняння компоновок, так і формування методики вибору варіантів компоновки. Також кінематичний аналіз є необхідною складовою вибору стратегій обробки та формування керуючої програми для існуючого обладнання [10].

Проведені дослідження виконано згідно з планом науково-дослідних робіт за держбюджетною темою «Створення нової техніки і технологій машинобудування з робочими процесами взаємодії твердих, плинних і сипких тіл та середовищ», № державної реєстрації 0115U003062.

Постановка завдання. Кінематичний аналіз руху при наскрізному аналізі компоновок з МПС та формуванні сценарію обробки для обладнання виконується декількома способами, кожен з яких має свою сферу застосування та використовують для різних типів аналізу. Визначення сфер застосування і вибору оптимального для даного конкретного завдання оптимального способу комп'ютерного моделювання в постпроцесорі САМ системи є комп'ютерні програми «Tools Glide» вибору варіантів і порівняння компоновок на стадії розробки обладнання з МПС. Аналіз методів кінематичного аналізу, та приклади застосування деяких з них в комп'ютерній програмі «Tools Glide», яка розроблена на кафедрі основ конструювання в Херсонському національному технічному університеті є задачею цієї роботи.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Класичне визначення рухомості кінематичних ланок і механізмів зазвичай з урахуванням геометричних в'язів, виконують за формулами академіка П.Л. Чебишева, проф. А.П. Малишева, але це не завжди забезпечує вірний результат, у зв'язку з тим, що не враховуються сили, які діють на ланки, наявність пасивних в'язів, загальні обмеження накладені на рух ланок, наявність ланок, які змінюють довжину та інші фактори.

Наступний спосіб заснований на принципі можливих переміщень розроблений Р.П. Войня і М.К. Атанасиу, полягає в тому, що необхідна та достатня умова рівноваги сил \vec{R}_i і пар сил \vec{M}_i , прикладених матеріальній системі з ідеальними зв'язками, полягає в рівності нулю суми роботи цих сил і пар сил на можливих переміщеннях \vec{s}_i і $\vec{\Omega}_i$ точок і ланок цієї системи:

$$\sum_i (\vec{R}_i \cdot \vec{s}_i + \vec{M}_i \cdot \vec{\Omega}_i) = 0.$$

Розділивши можливі малі переміщення \vec{s}_i і $\vec{\Omega}_i$ на приріст параметра Δt , після граничного переходу перетворимо рівність до рівності нулю сумарної потужності сил \vec{R}_i і пар сил \vec{M}_i , докладених до ланок системи:

$$\sum_i (\vec{R}_i \cdot \vec{v}_i + \vec{M}_i \cdot \vec{\omega}_i) = 0.$$

Рухливість оцінюється за рівняннями замкнутості векторів лінійних і кутових швидкостей руху ланок механізму. Це дозволяє скласти геометричну картину відповідності можливих розташувань множин осей обертальних кінематичних пар. Вибравши прямокутну систему координат і позначивши проекції векторів тими ж символами, але з індексами по відповідним вісям координат отримаємо суму скалярних добутків векторів

$$R_x \cdot v_x + R_y \cdot v_y + R_z \cdot v_z + M_x \omega_x + M_y \omega_y + M_z \omega_z = 0.$$

Таким чином, для кожного замкнутого контуру ланок механізму можна скласти два векторних або шість скалярних рівнянь у проекціях розглянутих векторів на осі прямокутної системи координат. Матриця коефіцієнтів такої системи рівнянь має шість рядків і кількість стовпців, що відповідає кількості ланок в контурі. Це означає, що ранг такої матриці не може бути більше 6, коли всі її рядки лінійно незалежні між собою, і може приймати менші значення. Це дає можливість розгляду властивостей механізму паралельної структури за рівняннями рівноваги сил і пар сил шляхом обчислення рангу матриці коефіцієнтів системи рівнянь рівноваги сил і пар сил. [7].

Викладення основного матеріалу. В роботі застосовано один з низькоресурсномістких методів контролю за виконавчими ланками, заснований на припущенні, що система є лінійною з глобальною в'язю, що надає однозначності математичним рішенням. Таким додатковим рівнянням може бути умова обмеження поворотних рухів навколо деякої вісі. В цьому випадку положення системи може описуватися як:

$$\vec{r}_i = [M] \vec{r}_k,$$

де \vec{r}_i – координати елементів системи (наприклад шарнірів) в i -му положенні, $[M]$ – матриця 4×4 повороту та зсуву, що переводить положення k в положення i . Такий метод використовується в комп'ютерній програмі «Tools Glide» в режимі розрахунків «Simple matrix scenario».

Наступний варіант – ітераційне моделювання зі зворотнім зв'язком між блоком кінематики та блоком пружного відклику. Такий метод, є досить ефективним, у зв'язку з тим, що силові параметри шарнірів можна досить легко контролювати. Наприклад, рівняння зв'язків для замороженого шарніру має вигляд:

$$\vec{u}_i = \vec{u}_j, \vec{\varphi}_i = \vec{\varphi}_j,$$

де \vec{u} – вектор деформації ланки, $\vec{\varphi}$ – вектор кутової деформації ланки i, j – номери ланок, що зв'язуються шарніром. Для сферичного шарніру зв'язки такі:

$$\vec{u}_i = \vec{u}_j, \vec{\varphi}_i = \mathbf{0}, \forall i, j \in \text{Joint},$$

де *Joint* – множина ланок, що з'єднуються шарніром.

Головним недоліком цього ітераційного методу є його велика ресурсомісткість.

Для опису траєкторії руху системи, особливістю якої є наявність жорстких голономних в'язів, можливо використовувати наступний підхід, який є розширенням попереднього методу, жорстка в'яз описує можливу траєкторію руху зв'язаної точки за допомогою рівняння:

$$f(x, y, z, t) = \mathbf{0}.$$

З точки зору силового опису жорстких в'язів, будемо вважати, що відхилення за нормаллю до дозволеної для руху поверхні або кривої викликає появу нескінченних за модулем сил, що діють проти відхилення. Внаслідок цього силовий опис має дві проблеми: нескінченний модуль сил важко стикуються з розрахунковими алгоритмами, а зміна напрямку сили уздовж дозволеної в'язями поверхні (кривої) ускладнює математичний опис задачі. Крім того розгляд тільки геометричних умов, без силового опису, не дає змоги враховувати інерційні властивості системи [7].

Для спрощення задачі пропонується описувати сили реакції в'язей вводячи, за аналогією з віртуальними голономними в'язями віртуальний потенціал, який має мінімум у дозволених в'язями точках простору, а під час відхилення від них стрімко зростає (в ідеалі – стрибкоподібно), що забезпечує нульове значення сили у дозволених точках і появу нескінченної сили при намаганнях здійснити рух за нормаллю до дозволеної поверхні (кривої). Вказане зростання моделюється за допомогою дельта-функцій [3, 4]. Для чисельного застосування зручніше застосувати одну з наступних апроксимацій дельта-функції: поліноміальну

$$\delta(x) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{\pi(1 + \alpha^2 x^2)};$$

або експоненціальну

$$\delta(x) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{\sqrt{\pi}} \exp(-\alpha^2 x^2).$$

де керуючи значенням параметра α можна досягнути необхідного ступеня наближення.

Функція Лагранжа тоді має вигляд:

$$L = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - \left(\frac{1}{\delta((x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2 + (z-z_0(t))^2 - R^2)} + \frac{1}{\delta(l_x(t) \cdot (x-x_0(t)) + l_y(t) \cdot (y-y_0(t)) + l_z(t) \cdot (z-z_0(t)))} \right).$$

Відповідні рівняння Лагранжа записуються у класичному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = 0, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial L}{\partial y} = 0, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} - \frac{\partial L}{\partial z} = 0. \end{cases}$$

Застосування аналізу кінематичних моделей за методом віртуального потенціалу, дозволяє звзвити простір можливих рішень та врахувати кінематику різних типів шарнірів. У системі «Tools Glide» цей метод реалізовано як опцію «Virtual potential scenario» [1, 2, 5].

Останні два методи застосування використовуються в комплексі програм автоматизованого моделювання «Tools Glide», що дозволяють вирішувати кінематичні задачі для верстатів з МПС (пряма та зворотня задачі), проводити розрахунки жорсткісних та динамічних характеристик верстату з врахування різних типів шарнірів та загального завдання сил та

моментів різання, проводити динамічний аналіз обладнання з отриманням частотних характеристик ще на стадії проектування та дослідження варіантів компоновки.

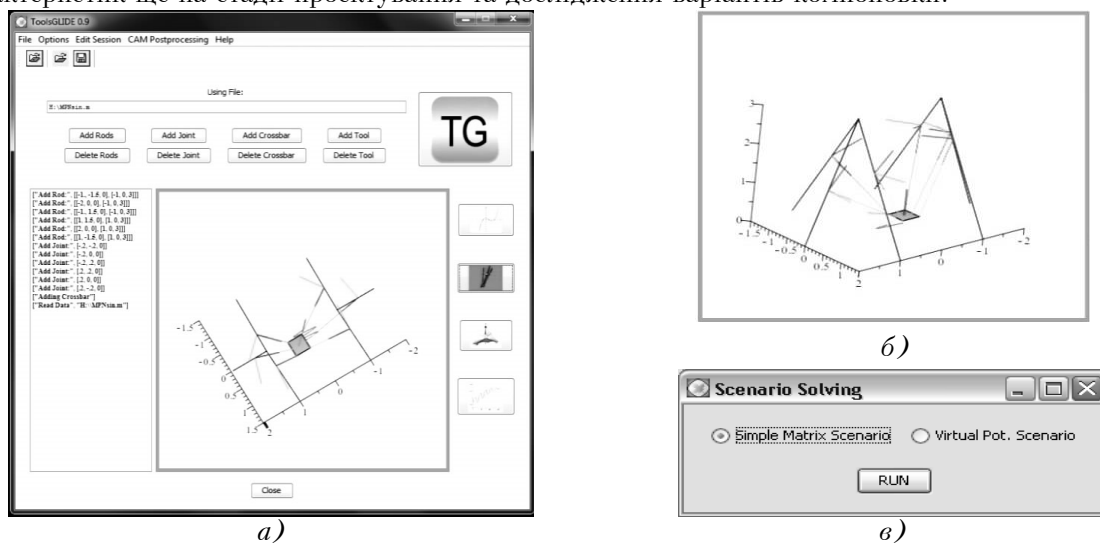


Рис. 1. Інтерфейс головного вікна системи «Tools Glide» (а), візуалізація анімованої стратегії обробки системи «Tools Glide» (б) та вибір моделей пошуку в просторі рішень (в)

Цей пакет спеціалізованих програмних продуктів представлено низкою систем «Tools Glide», «Tools Response» та «Tools App» [11]. У системі «Tools Glide» (рис. 1) проводиться кінематичний аналіз за одним із двох моделей врахування в'язів у системі, це «Simple matrix scenario» або «Virtual potential scenario». За даними імпортованого файлу траєкторій та орієнтацій інструменту (може бути використано файл CL-data отриманий засобами сторонніх САМ систем) проводиться пошук розв'язку зворотної кінематичної задачі з наступним експортом постпроцесорних даних, та даних для інших типів аналізу, анімації робочого процесу (рис. 3). Також це програмне забезпечення використовується для аналізу працездатності та створення керуючих програм верстатів з механізмів паралельної структури пірамідального типу. Розроблені системи «Tools Glide», «Tools Response» та «Tools App» використовуються як програмне забезпечення на дослідному зразку свердлильно-фрезерного верстату з механізмом паралельної структури СФВПК-4 (рис. 2) лабораторії кафедри основ конструювання Херсонського національного технічного університету.

Цей верстат функціонально використовується як для виконання наукових і дослідницьких програм університету, так й для ознайомлення студентів з діючими зразками механізмів паралельної структури та існуючими варіантами САМ-програм обробки.

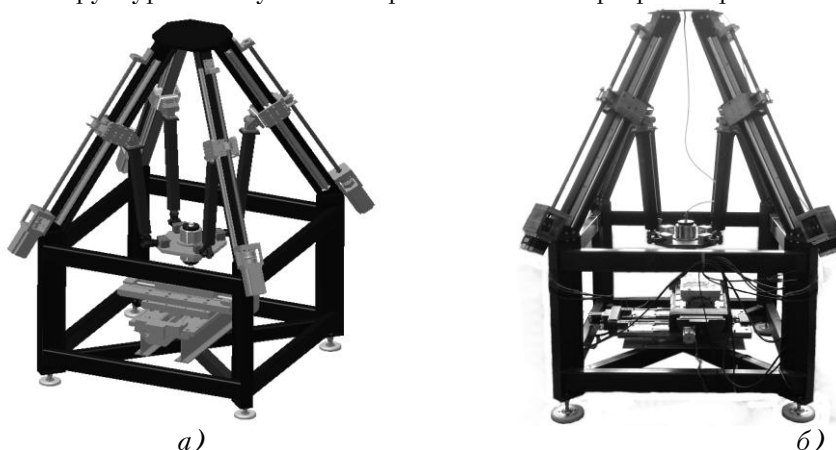


Рис. 2. Дослідний зразок свердлильно-фрезерного верстату з механізмом паралельної структури СФВПК-4 (а) схема верстату, (б) зовнішній вигляд

Для спрощення програмного коду для генерації G-кодів пост-процесора «Tools Glide», система керування верстатом виконана з можливістю перемикання функціональних режимів у чотирьох варіантах (табл. 1).

Таблиця 1

№ режиму роботи	Доступні координати верстата					Технологічні можливості фрезерування
	X	Y	Z	A	B	
1	+	+		+		2.5D
2	+	+			+	2.5D
3	+	+	+			2.5D
4	+		+	+	+	3D

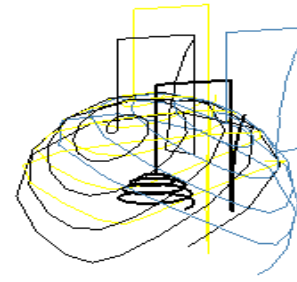


Рис. 3. Результат візуалізації отриманої траєкторії руху інструмента

Приклади виконавчих рухів верстата згідно з таблицею 1 наведені на рисунку 3. Такі переміщення виконавчих ланок забезпечуються розробленою системою керування, при чому режими відпрацювання траєкторії руху можливо виконувати як з використанням програмного коду, так і у ручному режимі завдяки «гарячим клавішам».

Система керування складається з основи 1, на якій встановлено блоки живлення з напругою 45 та 24 В (поз. 2 та 3 відповідно), які живлять чотири драйвери керування кроковими двигунами CW5045 та два драйвери CW7030 (поз. 4 та 5 відповідно), а також розподільчу плату 6 з живленням від USB-кабеля 7 та сигнальним кабелем LPT 8. Режими роботи верстата обираються пакетними перемикачами 9 з чотирма фіксованими положеннями. Розподільча плата з'єднується з драйверами за рахунок кабелів 10.



Рис. 4. Система керування приводами верстату

Принцип роботи системи керування з принципіальної точки зору достатньо простий, але з технічної сторони має ряд тонкощів. Ключовим елементом даної системи є розподільча плата (рис. 5) з вказаними номерами каналів LPT-порта (plugs and pins). На монтажній платі 1 розташований ряд мікро-чипів 2 з опторозв'язкою від LPT-порта 3. Також на платі є перемикач живлення 4 від USB-роз'єма 5 або зовнішнього блока живлення через роз'єм 6. На платі присутнє реле для вмикання мотор-шпинделя 7 та інтерфейси підключення модулів індикації положення та пульта керування 8. Присутня можливість керування верстатом через інші пристрої P&P через COM-роз'єм 9. Входи сигналів для плати розташовані на конекторах 10, а виходи до драйверів на конекторах 11.

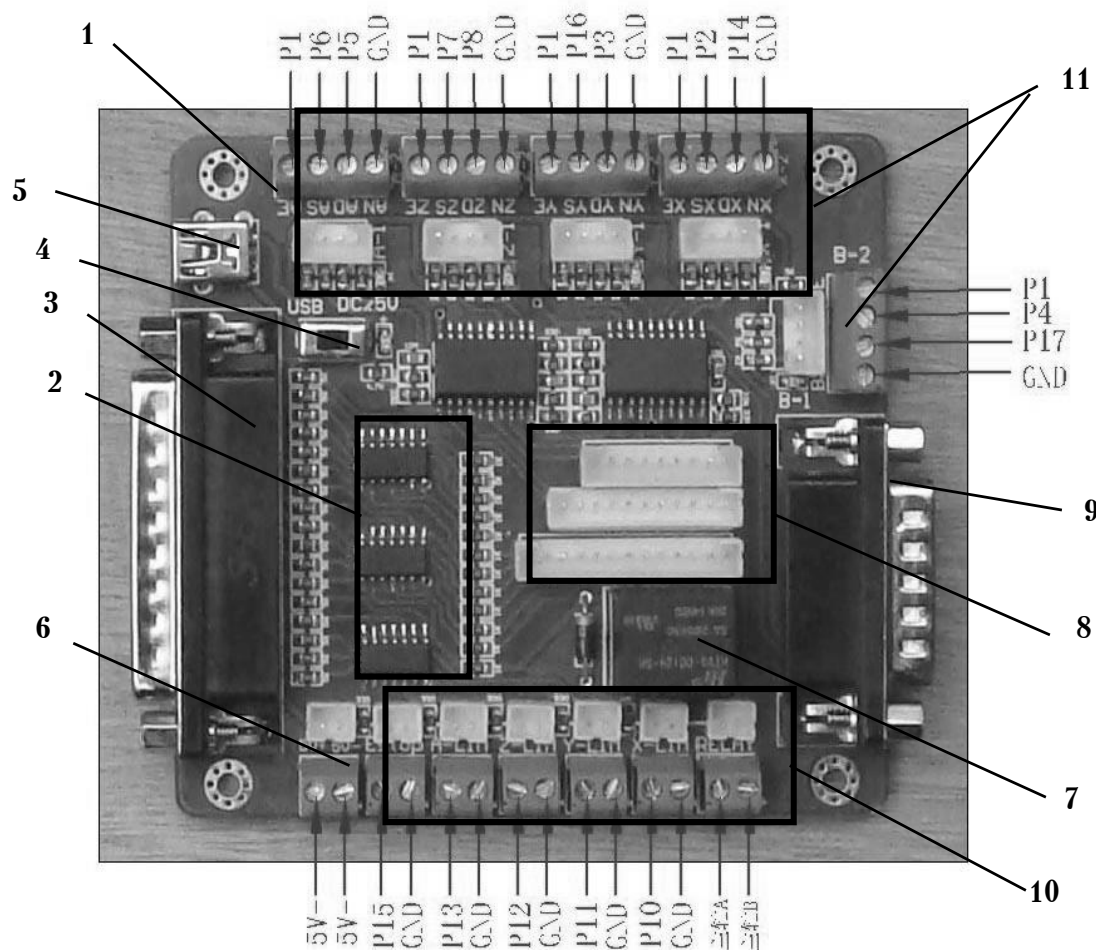


Рис. 5. Розподільча плата системи керування приводами верстату

Режим роботи верстата обирається залежно від виду обробки деталі (2.5D- або 3D-фрезерування), що залежить від оброблюваної деталі, а також від обраного варіанту генерації G-кодів у пост-процесорі «Tools Glide».

Висновки. Вказані вище варіанти методів кінематичного аналізу руху доцільно використовувати під час аналізу компонок з МПС та формуванні сценарію обробки з урахуванням динамічних характеристик. Визначення стратегії вибору оптимального для даного конкретного завдання способу комп'ютерного моделювання в постпроцесорі САМ-системи є пріоритетним на стадії розробки обладнання з МПС. Варіанти моделі пошуку рішень, що дозволяють звужити простір пошуку та врахувати кінематику шарнірів різних типів з успіхом використовуються у зовнішніх постпроцесорах на кшталт лінійки програмних продуктів розроблених на кафедрі основ конструювання Херсонського національного технічного університету «Tools Glide», «Tools Response» та «Tools App». Проведення тестових розрахунків та тестової обробки з використанням різних сценаріїв обрахунку показали відповідність отриманих результатів очікуванім, алгоритмічність побудови розрахункової системи рівнянь, легкість синтезу рівнянь при з'єднанні різних типів в'язів, що обумовлює можливість застосування цих програмних продуктів у системах автоматизованого моделювання та САМ-систем.

Список використаної літератури:

1. Баганов Є.О. Використання варіаційного підходу для кінематичного аналізу механізмів паралельної структури в системах автоматизованого моделювання / Є.О. Баганов, С.А. Русанов, С.М. Півень // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. – 2016. – № 3 (236). – С. 161–166.

2. *Баганов Є.О.* Застосування віртуального потенціалу для моделювання просторових механізмів із в'язями / Є.О. Баганов, Ю.М. Бардачов, С.А. Русанов // Вісник Херсонського нац. техн. ун-ту. – 2016. – № 1 (56). – С. 146–152.
3. *Гаральд Іро* Класична механіка / Іро Гаральд. – Львів : ЛНУ ім. І.Франка, 1999. – 464 с.
4. *Maggiore M.* Virtual Holonomic Constraints for Euler–Lagrange Systems / *M.Maggiore, L.Consolini* // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2013. – № 58 (4). – Pp. 1001–1008.
5. *Кеба П.В.* Аналіз кінематики, точності та динаміки пірамідальної компоновки верстата з механізмами паралельної структури / *П.В. Кеба, Д.О. Дмитрієв, Д.Федорчук* // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. – 2016. – № 2 (235). – С. 161–166.
6. *Кузнєцов Ю.М.* Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури : монографія / *Ю.М. Кузнєцов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич* ; під ред. *Ю.М. Кузнєцова* // Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
7. *Иосилевич Г.Б.* Прикладная механика / *Г.Б. Иосилевич, П.А. Лебедев, В.С. Стреляев* // М. : Машиностроение, 1985. – 351 с.
8. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма «Tools App» / *С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв, М.І. Подольський, Ю.М. Кузнєцов.* – № 57913 від 29.12.2014 // Державна служба інтелектуальної власності.
9. *Dmytriev D.* New layout and kinematic drill-milling machines with parallel structure mechanisms / *D.Dmytriev* // Technological Complexes № 1/1 (11). – 2015. – Pp. 25–29.
10. *Dmytriev D.* Method one-parametric families for analytical description of the end-effector curved motion of the machine-tools with the mechanisms of the parallel structure / *D.Dmytriev, S.Piven, P.Keba* // Technological Complexes. – 2015. – № 1/2 (12). – Pp. 12–18.
11. Method of determining dynamic characteristics of machine with bar support system / *Yu.N. Kuznetsov, D.O. Dmytriev, S.A. Rusanov, S.M. Piven* // Journal of the Technical University of Gabrovo. – Vol. 52'2016. – Pp. 18–23.

References:

1. Baganov, Je.O., Rusanov, S.A. and Piven', S.M. (2016), “Vykorystannja variacijnogo pidhodu dlja kinematychnogo analizu mehanizmv paralel'noi' struktury v systemah avtomatyzovanogo modeljuvannja”, *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu*, Vol. 3 (236), pp. 161–166.
2. Baganov, Je.O., Bardachov, Ju.M. and Rusanov, S.A. (2016), “Zastosuvannja virtual'nogo potencialu dlja modeljuvannja prostorovyh mehanizmv iz v'jazjamy”, *Visnyk Hersons'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu*, № 1 (56), pp. 146–152.
3. Iro, G. (1999), *Klasychna mehanika*, LNU im. I. Franka, L'viv, 464 p.
4. Maggiore, M. and Consolini, L. (2013), “Virtual Holonomic Constraints for Euler–Lagrange Systems”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, № 58 (4), pp. 1001–1008.
5. Keba, P.V., Dmytrijev, D.O. and Fedorchuk, D. (2016), “Analyz kinematyky, tochnosti ta dynamiky piramidal'noi' komponovky verstata z mehanizmany paralel'noi' struktury”, *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu*, № 2 (235), pp. 161–166.
6. Kuznjecov, Ju.M., Dmytrijev, D.O. and Dinevych, G.Ju. (2009), *Komponovky verstativ z mehanizmany paralel'noi' struktury*, in Kuznjecov, Ju.M. (Ed.), PP Vyshemyrs'kyj V.S., Kherson, 456 p.
7. Yosylevych, G.B., Lebedev, P.A. and Streljaev, V.S. (1985), *Prykladnaja mehanyka*, Mashynostroenye, Moscow, 351 p.
8. Rusanov, S.A., Dmytrijev, D.O., Podol's'kyj, M.I. and Kuznjecov, Ju.M. (2014), *Komp'juterna programa “Tools App”*, Derzhavna sluzhba intelektual'noi' vlasnosti, Kyiv, Ukraine, Pat. № 57913.

9. Dmytriev, D. (2015), "New layout and kinematic drill-milling machines with parallel structure mechanisms", *Technological Complexes*, № 1/1 (11), pp. 25–29.
10. Dmytriev, D., Piven, S. and Keba, P. (2015), "Method one-parametric families for analytical description of the end-effector curved motion of the machine-tools with the mechanisms of the parallel structure", *Technological Complexes*, № 1/2 (12), pp. 12–18.
11. Kuznetsov, Yu.N., Dmytriev, D.O., Rusanov, S.A. and Piven, S.M. (2016), "Method of determining dynamic characteristics of machine with bar support system", *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol. 52 (18–23).

КЕБА Павло Васильович – молодший науковий співробітник кафедри «Основи конструювання» Херсонського національного технічного університету.

E-mail: pavelkeba@mail.ru.

ПІВЕНЬ Сергій Миколайович – аспірант Херсонського національного технічного університету.

E-mail: pivensn@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2016.