

УДК 621.9

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.4.4>

Ю.Г. РОЗОВ

Херсонський національний технічний університет  
ORCID : 0000-0002-7377-5566

Д.О. ДМИТРИЄВ

Херсонський національний технічний університет  
ORCID : 0000-0001-8200-351X

С.А. РУСАНОВ

Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-1003-4867

С.О. ЧУРСОВ

Херсонський національний технічний університет  
ORCID : 0000-0002-6746-530X

Є.В. ЛЕЩУК

Херсонський національний технічний університет

## РАЦИОНАЛЬНІ СХЕМИ І ЕНЕРГО-СИЛОВІ ПОКАЗНИКИ ОБРОБКИ ТИСКОМ ЗОВНІШНІХ ПРОФІЛЬОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ШЛЯХОМ ОБКАТУВАННЯ РОЛИКАМИ

На основі розгляду кінематичних схем програмно-керованої обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД) тіл обертання і відповідних до них компонок верстатів каркасної компоновки із аналізом напружено-деформованого стану системи виконано аналіз найбільш придатних до фінішної розмірної обробки тиском технологічних режимів і умов. Показано нові технологічні схеми обробки ППД що передбачають прогресивні і більш ефективні стратегії руху інструменту відносно заготовки з складною кривизною оброблювальної поверхні що жорстко спирається або закріплюється в верстатному пристосуванні. Даний підхід дозволяє підвищити точність обробки ППД до класу розмірної обробки за рахунок жорсткого закріплення і реалізувати будь який геометричний рух програмно керованого переміщення обробного інструменту в робочому просторі верстата. Різноманітні комбінації різноманітних рухів обробного інструменту їх циклічність і кратність докладання навантаження на поверхню оброблюваного матеріалу дозволяє забезпечити зниження жорсткості поверхні як цілком прогнозованого режимного параметру і закладати його при проектуванні операцій ППД. Показано реалізацію запропонованих рішень у виді виготовлених програмно-керованих пристосувань на основі просторових приводів царнірно-стиржневих систем і рухомої платформи з рухомим інструментом. На основі векторного числення створено математичні залежності що покладено в алгоритм керування технологічним обладнанням для запропонованої обробки ППД.

Ключові слова: поверхнєве пластичне деформування; якість обробки, жорсткість стратегії руху інструменти енерго-силові параметри.

Ю.Г. РОЗОВ

Херсонский национальный технический университет  
ORCID : 0000-0002-7377-5566

Д.О. ДМИТРИЄВ

Херсонский национальный технический университет  
ORCID : 0000-0001-8200-351X

С.А. РУСАНОВ

Херсонский национальный технический университет  
ORCID : 0000-0002-1003-4867

С.А. ЧУРСОВ

Херсонский национальный технический университет  
ORCID : 0000-0002-6746-530X

Е.В. ЛЕЩУК

Херсонський національний технічний університет

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И ЭНЕРГО-СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ВНЕШНИХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПУТЕМ ОБКАТКИ РОЛИКАМИ

На основе рассмотрения кинематических схем программно-управляемой обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) тел вращения и соответствующих им компоновок станков каркасной компоновки с анализом напряженно-деформированного состояния системы выполнен анализ наиболее подходящих к финишной размерной обработке давлением технологических режимов и условий. Показаны новые технологические схемы обработки ППД предусматривающие прогрессивные и более эффективные стратегии движения инструмента относительно заготовки со сложной кривизной обрабатываемой поверхности жестко опирается или закрепляется в станочном приспособлении. Данный подход позволяет повысить точность обработки ППД к классу размерной обработки за счет жесткого закрепления и реализовать любой геометрический движение программно-управляемого перемещения обрабатывающего инструмента в рабочем пространстве станка. Различные комбинации различных движений обрабатывающего инструмента их цикличность и кратность приложения нагрузки на поверхность обрабатываемого материала позволяет обеспечить снижение жесткости поверхности как вполне прогнозируемого режимного параметра и закладывать его при проектировании операций ППД. Показано реализацию предложенных решений в виде изготовленных программно-управляемых приспособлений на основе пространственных поводов шарнирно-стержневых систем и подвижной платформы с подвижным инструментом. На основе векторного исчисления созданы математические зависимости, которые положено в алгоритм управления технологическим оборудованием для предложенной обработки ППД.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирования; качество обработки, жесткость стратегии движения инструмента энерго-силовые параметры.

U.H. ROZOV

Kherson National Technical University

ORCID : 0000-0002-7377-5566

D.O. DMYTRIEV

Kherson National Technical University

ORCID : 0000-0001-8200-351X

S.A. RUSANOV

Kherson National Technical University

ORCID : 0000-0002-1003-4867

S.O. CHURSOV

Kherson National Technical University

ORCID : 0000-0002-6746-530X

E.V. LESHCHUK

Kherson National Technical University

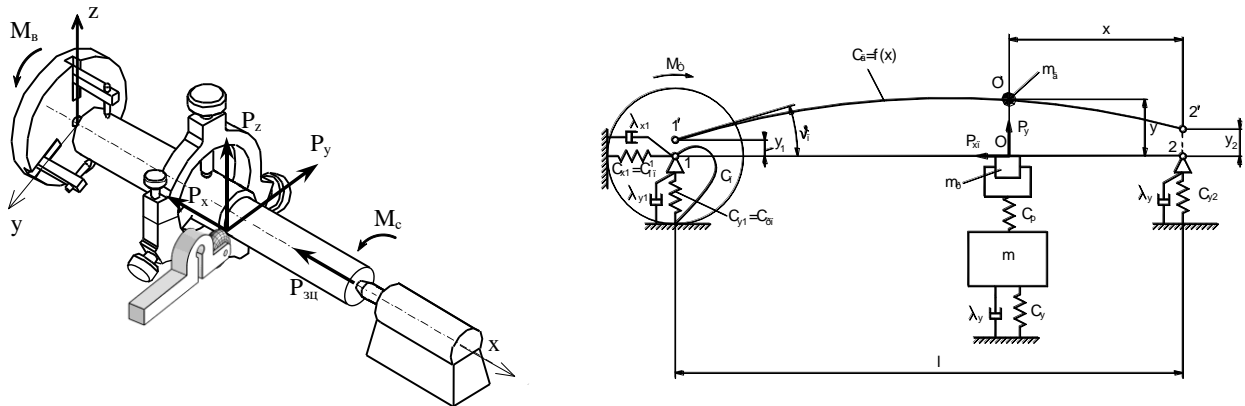
## **RATIONAL SCHEMES AND ENERGY POWER INDICATORS OF PRESSURE TREATMENT OF EXTERNAL PROFILED SURFACES BY ROLLING BY ROLLERS**

*Based on the consideration of kinematic schemes of software-controlled processing by surface plastic deformation (SPD) of rotating bodies and corresponding configurations of frame layout machines with analysis of stress-strain state of the system, the analysis of technological modes and conditions most suitable for dimensional pressure treatment is performed. New technological schemes of SPD processing are provided, which provide progressive and more effective strategies of tool movement relative to the workpiece with a complex curvature of the machining surface that is rigidly supported or fixed in the machine tool. This approach allows to increase the accuracy of SPD processing to the class of dimensional processing due to rigid fixing and to implement any geometric movement of the program-controlled movement of the machining tool in the working space of the machine. Various combinations of various movements of the machining tool, their cyclicity and multiplicity of load on the surface of the workpiece allows to reduce the surface stiffness as a completely predictable mode parameter and lay it in the design of SPD operations. The realization of the offered decisions in the form of the made software-controlled adaptations on the basis of spatial drives of hinge-rod systems and the mobile platform with the mobile tool is shown. On the basis of vector calculus, mathematical dependences are created and placed in the algorithm of control of technological equipment for the proposed processing of SPD.*

*Key words: surface plastic deformation; quality of processing, rigidity of strategy of movement tools energy and power parameters.*

**Постановка проблеми**

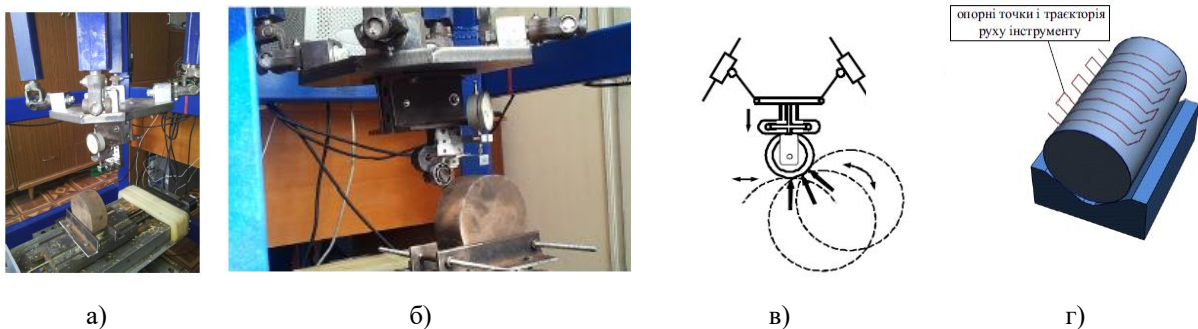
Традиційні технології фінішної обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД) поверхонь обертання передбачають використання універсального верстатного обладнання, наприклад, більшість деталей типу стрижнів оброблюють шляхом вигладжування або обкатування роликм на токарних верстатах із закріпленням в центрах із застосуванням люнетів. Однак весь процес обробки супроводжується не властивими для даних верстатів умовами, а саме, співвідношення навантажувальних зусиль не відповідає технічним характеристикам системи пристосування-інструмент-деталь (ПІД). Зміна положення вектору сили притискання уздовж напрямку подачі викликає зміни значень пружних відтискань.



**Рис. 1. Обкатуванням роликм на токарних верстатах з розрахунковою схемою**

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Відомо, що в роботі МПС реалізуються складні просторові значення жорсткості, як залежності не тільки від радіусу-вектору положення інструменту, але й напрямку дії відтискних навантажень, що еквівалентно формуванню тензорного поля жорсткостей в робочій зоні обробки. При цьому діапазон значень жорсткості навіть в рамках єдиного сценарію обробки може бути досить широкий – від екстремально низьких значень, до достатніх для проведення обробки ППД. Таким чином до генерування стратегії обробки відносяться завдання пошуку оптимальних в сенсі несучої спроможності траєкторій та взаємних конфігурацій розташування системи «інструмент-деталь». На рис.2. вказані два варіанти реалізації процесу обкатування роликм циліндричної деталі за допомогою МПС. В першому варіанті траєкторія реалізуються як множина напрямних кіл циліндричної поверхні, у другому – як множина твірних.



**Рис.2. Загальний вигляд верстату з МПС і жорстке кріплення оброблюваного циліндру**

$$\vec{n}_u = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} = \begin{bmatrix} \frac{x_{cp} - x_{cn}}{\sqrt{(x_{cp} - x_{cn})^2 + (y_{cp} - y_{cn})^2 + (z_{cp} - z_{cn})^2}} \\ \frac{y_{cp} - y_{cn}}{\sqrt{(x_{cp} - x_{cn})^2 + (y_{cp} - y_{cn})^2 + (z_{cp} - z_{cn})^2}} \\ \frac{z_{cp} - z_{cn}}{\sqrt{(x_{cp} - x_{cn})^2 + (y_{cp} - y_{cn})^2 + (z_{cp} - z_{cn})^2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

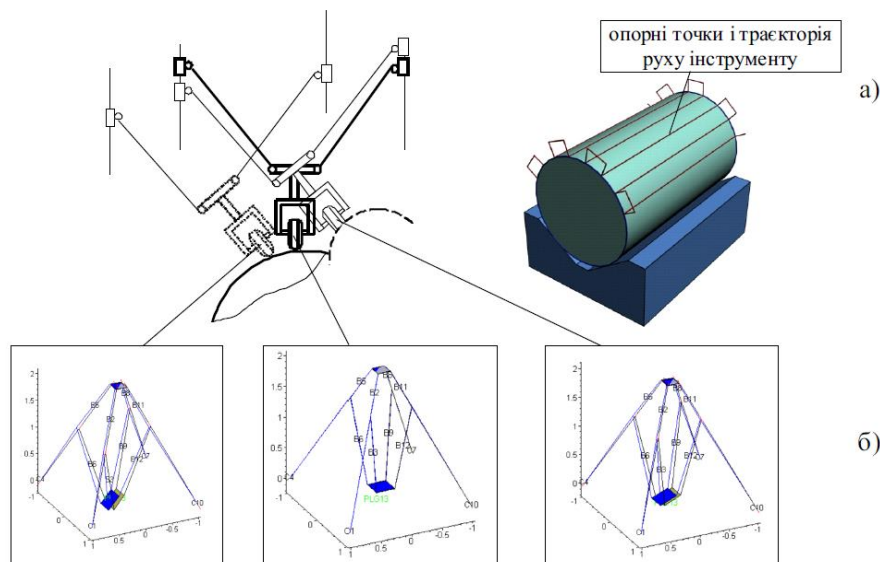
**Формулювання мети дослідження**

Метою дослідження є технологічне забезпечення сталих параметрів якості оброблених деталей з профільною поверхнею, таких як значення шорсткості, ступінь зміцнення, відхилення форми і ін. Тобто постає технічна задача виконання контрольованої в сенсі забезпечення розмірних параметрів обробки ППД.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

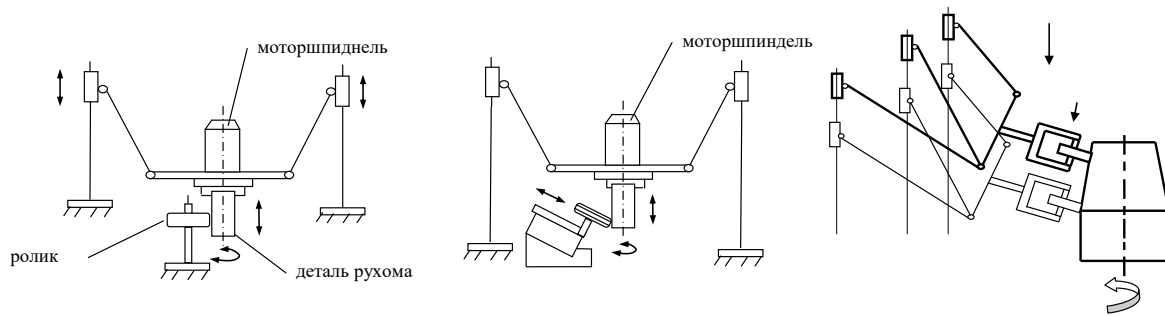
Для аналізу відклику конструкції на робочі зовнішні навантаження в усьому діапазоні технологічного процесу обробки система відокремлює статичні та динамічні навантаження – проходить наскрізний обмін даними між відповідними модулями: кінематика (пряма або зворотна задачі) – статичний відклик (формування тензорів коефіцієнтів жорсткості) – динамічний відклик. Бібліотека скінченних елементів пристосована для задач такого типу, з підтримкою можливості з'єднання компонентів шарнірами різних типів, бібліотеки останніх можуть бути поповнені додатковими об'єктами. Для реалізації стратегії в роботі використовувалась лінійка програмних продуктів Tools Glide, Tools Response та Tools Apps. Вказана лінійка призначена для генерування кінематики та аналізу статичного та динамічного відкликів глайд-обладнання без обмежень на форму зовнішніх навантажень, що можуть бути задані як довільні функції часу та внутрішніх параметрів системи з підтримкою зворотного зв'язку.

Проведено порівняння типових стратегій обробки (рухів обробного інструменту) і базування деталі в найбільш розповсюджених каркасних компоновках верстатів з МПС. Розвинуто область застосування верстатів з МПС до процесів обробки тиском ППД і науково обґрунтовано їх здатність виконувати дану обробку із відповідним рівнем якості.



**Рис. 3. Варіанти обробки ППД з траєкторіями у вигляді множини твірних циліндричної поверхні (а) та відклик обладнання на дану стратегію (б) (Tools Response)**

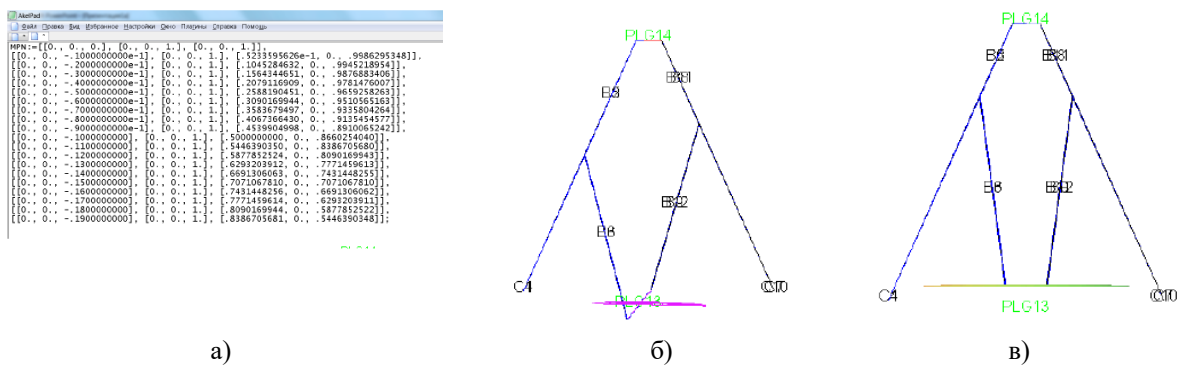
Вказана лінійка призначена для генерування кінематики та аналізу статичного та динамічного відкликів глайд-обладнання без обмежень на форму зовнішніх навантажень, що можуть бути задані як довільні функції часу та внутрішніх параметрів системи з підтримкою зворотного зв'язку.



**Рис. 4. Приклади компоувальних схем обробки (рухливий циліндр та обробка конусу)**

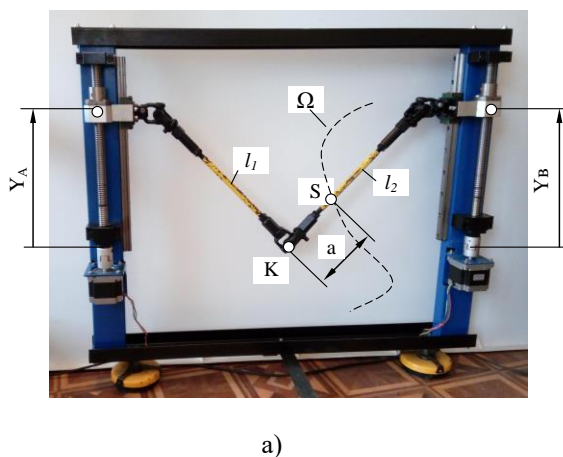
Як вхідні дані, окрім геометрії конструкції, імпортується MPN-файл, що являє собою список з координат точок контакту інструменту та деталі, напрям інструменту, вектор нормалі та дотичної до оброблювальної поверхні тощо. На рис. 4 (б) показано відклик наявної конструкції на відповідний варіант стратегії обробки.

Розрахунки еліпсоїдів податливості для кожної точки траєкторії дозволяють провести оцінку спроможності даної стратегії обробки та компоновки каркасного обладнання в цілому до реалізації обробки ППД. Додаткові приклади стратегій обробки (рухливий циліндр та обробка конусу) показані на рис. 5.



**Рис. 5. Приклади розрахунку стрижневої системи (а), Видгляд вхідного NPN файлу (б), (в) видгляд еліпсоїду жорсткості в одній точці робочого простору з різною орієнтацією рухомої платформи**

В роботі досліджено конструктивно-посилений шарнірний механізм [1-3], що може бути використано для обробки тиском не приводними роликами складних поверхонь (рис.6).



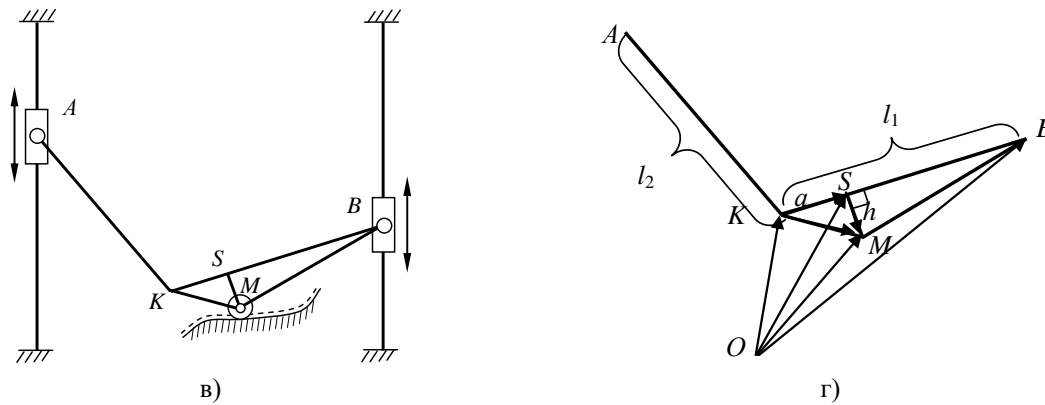


Рис. 6. Шарнірний механізм обробки (а), система керування і робоче місце (б) кінематична схема (в) і розрахункова векторна схема основних ланок (г)

Для аналізу роботи механізму та генерування керуючих команд необхідно по-перше вирішити відповідну зворотню кінематичну задачу – за заданою траєкторією ролика М знайти позиції кареток А і В як функції часу.

При  $BK=l_1$ ,

$$\text{тобто } (X_B - X_K)^2 + (Y_B - Y_K)^2 = l_1^2 \text{ і } KA=l_2,$$

$$\text{тобто } (X_K - X_A)^2 + (Y_K - Y_A)^2 = l_2^2$$

отримаємо розв’язок кінематичної задачі:

$$Y_B = \left(1 - \frac{a}{l_1}\right) \left[ \mp \sqrt{l_1^2 - (X_K - X_B)^2} + \frac{Y_S}{1 - \frac{a}{l_1}} \right]; \quad (2)$$

$$Y_K = \frac{Y_S}{1 - \frac{a}{l_1}} - \left[ \mp \sqrt{l_1^2 - (X_K - X_B)^2} + \frac{Y_S}{1 - \frac{a}{l_1}} \right] \frac{a}{l_1}; \quad (3)$$

$$Y_A = \mp \sqrt{l_2^2 - (X_K - X_A)^2} + \frac{Y_S}{1 - \frac{a}{l_1}} - \left[ \mp \sqrt{l_1^2 - (X_K - X_B)^2} + \frac{Y_S}{1 - \frac{a}{l_1}} \right] \frac{a}{l_1}. \quad (4)$$

Вказаний алгоритм реалізовано в програмному середовищі Maple – для заданої траєкторії ролика отримується положення всіх значущих вузлів механізму.

Результати кінематичного розрахунку (зворотня задача) можуть бути використані для розрахунку напружено-деформованого стану системи. Для цієї мети було використано систему ToolsResponse скінченно-елементного аналізу просторових механізмів [4]. Основним питанням є завдання граничних умов, що відповідають задачі контакту ролика з оброблювальною деталлю, оскільки визначення сили відтискання є достатньо складною задачею. Більш фізичним є завдання безпосередньо відтискання по завданому напрямку ролика в контакт з заготовкою, при цьому можливо декілька варіантів розглядання:

- жорстке завдання відтисканням

- завдання відтискання за деяким напрямком  $\mathbf{n}$  та вільності уздовж дотичної до траєкторії  $\tau$ :

$$\mathbf{u}_M = \begin{bmatrix} u_{Mx}(t) \\ u_{My}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_M \cdot \mathbf{n} &= U(t), \\ \mathbf{P} \cdot \boldsymbol{\tau} &= 0, \end{aligned} \quad (6,7)$$

За вказаним алгоритмом проводиться розрахунок жорсткості за весь цикл обробки з прорахуванням зусиль в шарнірах та сили відтискання. Можливе швидке порівняння компонок (рис. 7).

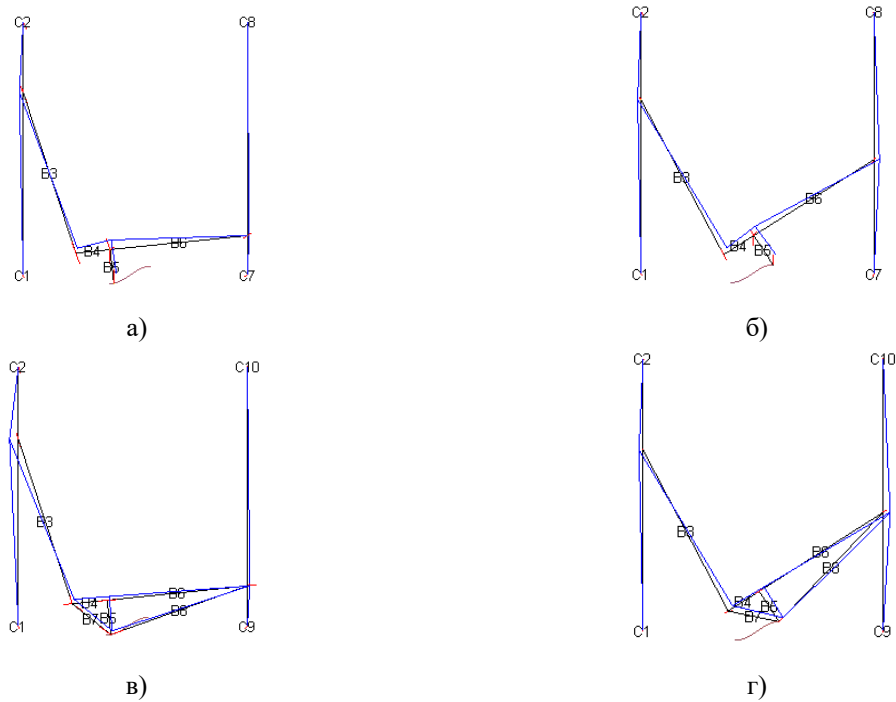


Рис. 7. Приклади швидкого порівняння компонок за критеріями пружності

За зусиллями, що відповідають навантаженню на каретки, можливе прогнозування потужностей двигунів, сила обробки (навантаження на ролик, що необхідна для проведення обробки з наперед заданим відтисканням) (рис. 8).

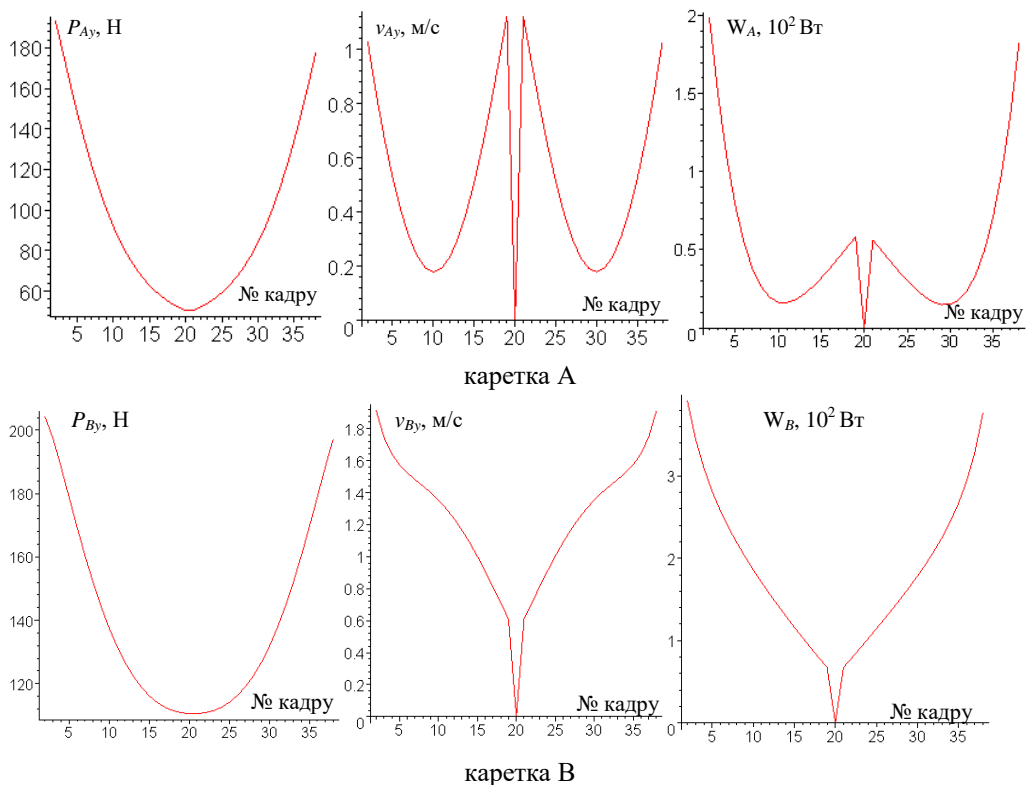


Рис. 8. Зусилля  $P$ , швидкість кареток  $V$  і потужність  $W$  на двигунах упродовж циклічної обробки дільниці синусоїди за рис. 7

**Висновки**

На основі розгляду кінематичних схем програмно-керованої обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД) тіл обертання і відповідних до них компонок верстатів каркасної компоновки із аналізом напружено-деформованого стану системи виконано аналіз найбільш придатних до фінішної

розмірної обробки тиском технологічних режимів і умов. Проведено порівняння типових стратегій обробки (рухів обробного інструменту) і базування деталі в найбільш розповсюджених каркасних компоновках верстатів з МПС. Розвинуто область застосування верстатів з МПС до процесів обробки тиском ППД і науково обґрунтовано їх здатність виконувати дану обробку із відповідним рівнем якості.

#### Список використаної літератури

1. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.: Наука, 1991. – 95 с.
2. Воробьев Е.И., Диментберг Ф.М. Пространственные шарнирные механизмы. – М.: Наука, 1991. – 264 с.
3. Дмитрієв Д.О., Русанов С.А., Рачинський В.В. Передумови використання обладнання каркасних компоновок для обробки складних поверхонь пластичним деформуванням // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції «Механіка машин – основна складова прикладної механіки» Дніпро: НМетАУ, 2017. – С. 67-71
4. Дмитрієв Д.О., Русанов С.А., Рачинський В.В. Нелінійні задачі та зворотній зв'язок при моделюванні обробки обладнанням каркасних компоновок // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017): матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – с. 45-46
5. Дмитрієв Д.О., Русанов С.А., Федорчук Д.Д. Методологія синтезу технологічного обладнання з МПС за критеріями точності, жорсткості і функціональності // «Вібрації в техніці та технологіях» XVI Міжнародна науково-технічна конференція: збірник тез доповідей. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – с.26-29
6. Розов Ю.Г., Дмитрієв Д.О., Федорчук Д.Д., Русанов С.А. Прогнозування енергосилових факторів при поверхневій оздоблюваній обробці тиском неприводними роликками складних поверхонь // Тези доповідей X міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, 2019, С. 16-18.
7. Дмитрієв Д.О., Русанов С.А., Федорчук Д.Д. Прогнозування функціональних можливостей і закономірності керування просторовими системами приводів для технологічних задач // Тези доповідей IX міжнародної науково-технічної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів і систем», м. Чернігів, ЧНТУ, 14-18 травня 2019, С. 49-51.

#### References

1. Hlazunov V.A., Kolyskor A.SH., Kraynev A.F. Prostranstvennyye mekhanyzmy parallel'noy struktury. – Moscow: Nauka, 1991. – 95 p.
2. Vorob'ev E.Y., Dymenberh F.M. Prostranstvennyye sharnyrnye mekhanyzmy. – Moscow: Nauka, 1991. – 264 p.
3. Dmytriyev D.O., Rusanov S.A., Rachyns'kyu V.V. Peredumovy vykorystannya obladdnannya karkasnykh komponovok dlya obrobky skladnykh poverkhon' plastychnym deformuvannyam // Materialy vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Mekhanika mashyn – osnovna skladova prykladnoyi mekhaniky» Dnipro: NMetAU, 2017. – pp. 67-71
4. Dmytriyev D.O., Rusanov S.A., Rachyns'kyu V.V. Neliniyni zadachi ta zvorotniy zv'yazok pry modelyuvanni obrobky obladdnannya karkasnykh komponovok // Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZYATPS – 2017): materialy tez dopovidey VI mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. – Chernihiv: CHNTU, 2017. – pp. 45-46
5. Dmytriyev D.O., Rusanov S.A., Fedorchuk D.D. Metodolohiya syntezu tekhnolohichnoho obladdnannya z MPS za kryteriyamy tochnosti, zhorstkosti i funktsional'nosti // «Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh» KHVI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya: zbirnyk tez dopovidey. – Vinnytsya: VNTU, 2017. – pp.26-29
6. Rozov YU.H., Dmytriyev D.O., Fedorchuk D.D., Rusanov S.A. Prohnozuvannya enerhosylovykh faktoriv pry poverkhneviy ozdobyuvaniy obrobtisi tyskom nepryvodnymy rolykamy skladnykh poverkhon' // Tezy dopovidey X mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Teoretychni ta praktychni problemy v obrobtisi materialiv tyskom i yakosti fakhovoyi osvity», Kyiv – Kherson, 2019, pp. 16-18.
7. Dmytriyev D.O., Rusanov S.A., Fedorchuk D.D. Prohnozuvannya funktsional'nykh mozhlyvostey i zakonomirnosti keruvannya prostorovymy systemamy pryvodiv dlya tekhnolohichnykh zadach// Tezy dopovidey IX mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv i system», Chernihiv, CHNTU, 14-18 travnya 2019, pp. 49-51.