



**Дмитрієв Д. О.**  
д.т.н., професор

**Русанов С. А.**  
к.т.н., доцент

**Федорчук Д. Д.**  
студент

**Херсонський  
національний технічний  
університет**

**УДК 621.9.06**

## **МЕТОДОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З МПС ЗА КРИТЕРІЯМИ ТОЧНОСТІ, ЖОРСТКОСТІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ**

*Проведено порівняння типових стратегій обробки і базування деталі в найбільш розповсюджених каркасних компоновках верстатів з МПС. Запропоновано методуку врахування в процесі синтезу технологічного обладнання з МПС обмежень, що враховують аналіз відклику каркасної системи МПС на зовнішні навантаження в ракурсі оцінки жорсткості системи, точності позиціонування, аналізу вібрацій обладнання.*

***Ключові слова:** стратегії обробки, каркасні компоновки, оцінка жорсткості системи, точне позиціонування, аналіз вібрацій.*

**Вступ.** Задача синтезу кінематичних схем механізмів паралельної структури (МПС) не має однозначного рішення у зв'язку з тим, що одні і ті ж переміщення вихідної ланки можуть бути виконані з використанням різних кінематичних схем [1]. Тому синтез технологічного обладнання, побудованого на базі мехатронних систем з використанням МПС, має бути узгоджений з конкретними виробничими задачами.

Метою даної роботи є аналіз синтезу МПС з обмеженнями, що враховують зовнішні збуджуючі фактори, які безпосередньо впливають на точність позиціонування та загальну функціональність обладнання.

**Викладання основного матеріалу.** Якщо МПН є складовою металообробного обладнання для виготовлення складнопрофільних деталей, то із міркувань забезпечення достатньої точності обробки необхідна окрема алгоритмічна гілка для аналізу відклику каркасної системи МПС на зовнішні навантаження в ракурсі оцінки жорсткості системи. Для цього необхідно, з одного боку, виконати декомпозицію задачі з врахуванням властивостей деяких груп елементів або окремих ланок, що може бути сьогодні реалізовано за методом скінчених елементів, з іншого ж боку, необхідне врахування складних режимів обробки, що може вносити значну нелінійність та/або зворотній зв'язок в задачу при завданні особливого вигляду для закону зміни

зовнішнього навантаження. В роботі МПС реалізуються складні просторові значення жорсткості як залежності не тільки від радіусу-вектору положення інструменту, але й напряму 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 достатньо «важких» обробок. Окремо необхідно виділити проблеми віброаналізу та пошук резонансних частот конструкції. Таким чином до задач синтезу в кінематичному сенсі додаються задачі генерування стратегії обробки, завдання пошуку оптимальних (в сенсі несучої спроможності обладнання) траєкторій та взаємних конфігурацій розташування системи «інструмент-деталь». Вказані обмеження потребують розробки систем наскрізного аналізу множини можливих компоновок МПС, що включають відповідні до перерахованих задач модулі та мають достатню гнучкість для швидкого реагування на зміну вхідних даних.

Розглянемо детально реалізацію вищевказаної послідовності за допомогою лінійки програмних продуктів Tools Glide [2], Tools Response та Tools Apps [3], що розроблені на кафедрі транспортних систем та технічного сервісу Херсонського національного технічного університету. 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. 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. 1 вказана схема для отримання MPN-файлу з типових стратегій –

траєкторій обробки обмежених поверхнею еліпсоїду.

Вказані сімейства кривих є вхідними даними як для етапу генерування L-координат (модуль Tools Glide, рис. 2, а), так і для процедур порівняння функціональної здатності обладнання до виконання заданих стратегій з точки зору точності реалізації траєкторій в умовах наявності зовнішніх зусиль як функцій положення інструменту, його орієнтації, властивостей матеріалу та режимів технологічного процесу (модуль Tools Response, рис. 2, б).

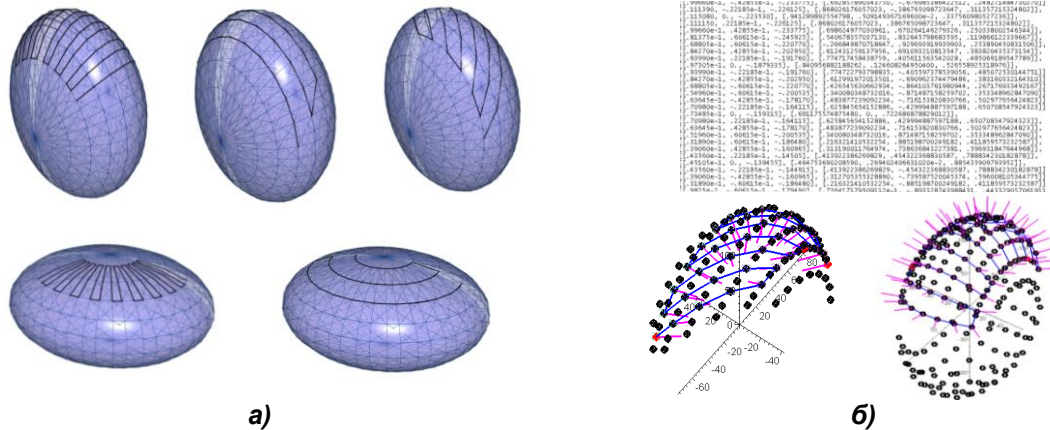


Рис. 1. Типові стратегії – траєкторії обробки обмежені поверхнею еліпсоїду (а) та MPN-файл з його візуалізацією (б)

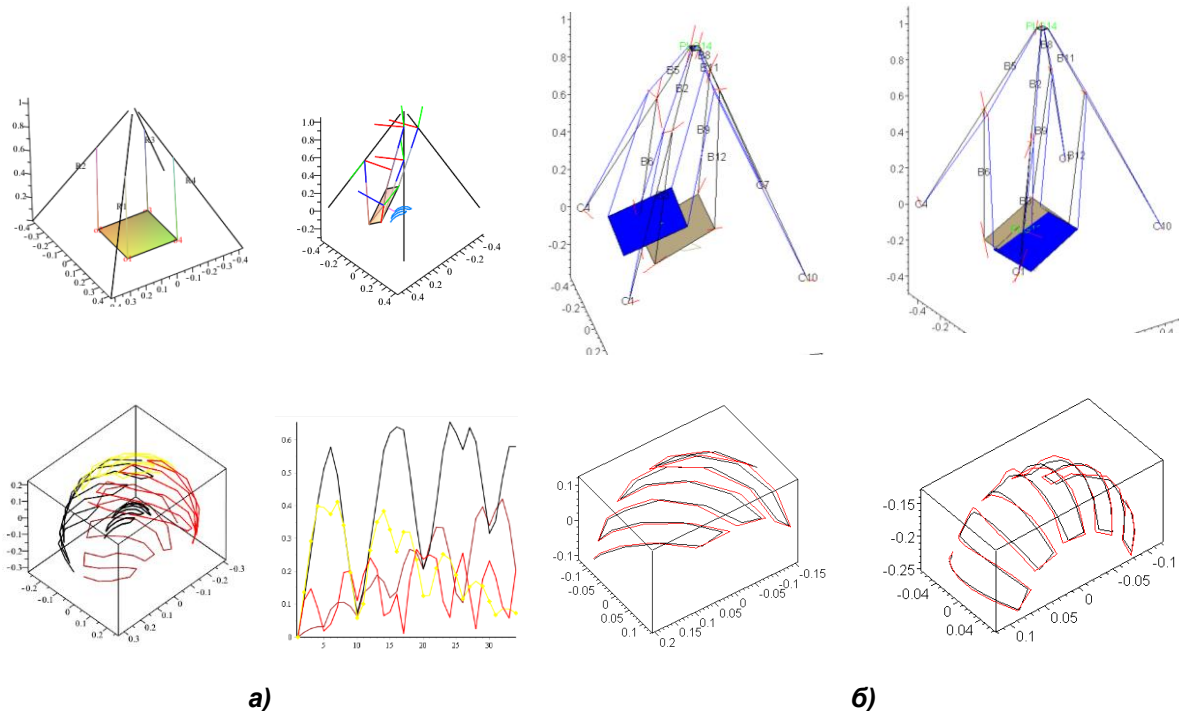


Рис. 2. Етапи опрацювання МПС в системі Tools Glide (а) та Tools Response (б)

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 [4-5]. Бібліотека скінченних елементів Tools Response пристосована для задач такого типу, з підтримкою можливості з'єднання компонентів шарнірами різних типів, бібліотеки ж останніх можуть бути поповнені додатковими об'єктами.

Система дозволяє отримати параметри точності обробки як відхилення від заданої траєкторії та порівняти стратегії за нормами:

$$\Delta_1 = \sum_i (\mathbf{r}_i^* - \mathbf{r}_i)^2 / n;$$

$$\Delta_2 = \max(\mathbf{r}_i^* - \mathbf{r}_i)^2,$$

де  $\mathbf{r}_i^*$  та  $\mathbf{r}_i$  – вектор поточної координати інструменту з врахуванням відклику та цільової відповідно. За необхідністю таку ж оцінку можна провести щодо відхилення напрямків орієнтації інструменту.

Модуль Tools App дозволяє розрахувати резонансні частоти для всіх конфігурацій МПС за умови імпорту тензору податливостей розмірності 6x6 (з врахуванням крутильної складової) з модулю Tools Response (рис. 3). Окремо вкажемо на наявність модулю розрахунків задачі прямої кінематики TAngle.

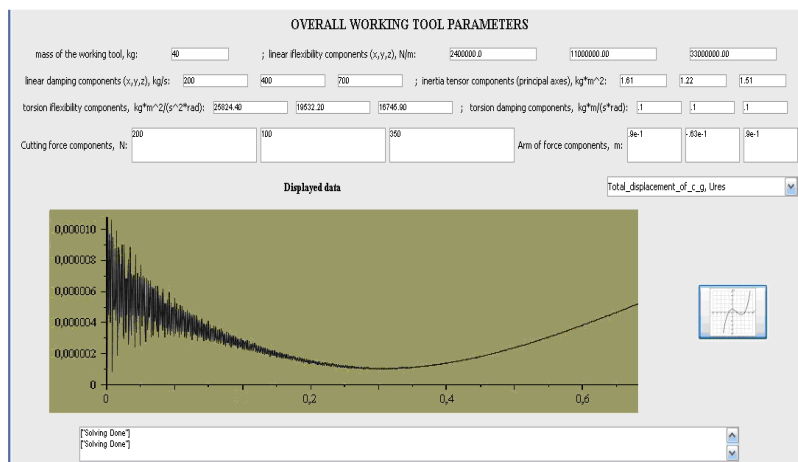


Рис. 3. Аналіз вібрацій обладнання в модулі Tools App

**Висновки.** Розглянуто методику порівняння типових стратегій обробки (рухів обробного інструменту) і базування деталі в найбільш розповсюджених каркасних компоновках верстатів з МПС. Запропоновано методику врахування в процесі синтезу технологічного обладнання з МПС обмежень, що враховують гілку аналізу відклику каркасної системи МПС на зовнішні навантаження в ракурсі оцінки жорсткості системи, точності позиціонування, аналізу вібрацій обладнання тощо. Порівняння стратегій можна проводити за рівняннями (1).

#### Список використаних джерел

1. 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.
2. Комп'ютерна програма "ToolsGLIDE". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57913. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв, П.В. Кеба, Ю.М. Кузнєцов. – Заявл. 03.11.2016; Опубл. 29.12.2016.
3. Комп'ютерна програма "ToolsApp". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57913. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв,

М.І. Подольський, Ю.М. Кузнєцов. – Заявл. 03.11.2014; Опубл. 29.12.2014.

4. Русанов С.А. Комплексний аналіз механізмів паралельної структури засобами цільових систем автоматизованого моделювання / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв // Тези доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, 2016, с. 152-155.

5. Дмитрієв Д.О. Зовнішні модулі для прогнозування та управління складними рухами ланок механізмів паралельної структури / Д.О. Дмитрієв, С.А. Русанов, П.В. Кеба, С.М. Півень // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016): матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів: ЧНТУ, 2016.–С.44-47.

#### Список джерел у транслітерації

1. Kuznietsov Yu.M. Komponovky verstativ z mekhanizmamy paralelnoi struktury: Monografiia / Yu.M. Kuznietsov, D.O. Dmytriiev, H.Iu. Dinevych; pid red. Yu.M. Kuznietsova. – Kherson: PP Vyshemyrskiy V.S., 2009. – 456 s.
2. Kompiuterna prohrama "ToolsGLIDE". Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №57913. / S.A. Rusanov, D.O. Dmitriiev,



P.V.Keба, Yu.M. Kuznietsov. – Zaiavl. 03.11.2016; Opubl. 29.12.2016.

3. Kompiuterna prohrama "ToolsApp". Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №57913. / S.A. Rusanov, D.O. Dmitriiev, M.I. Podolskiy, Yu.M. Kuznietsov. – Zaiavl. 03.11.2014; Opubl. 29.12.2014.

4. Rusanov S.A. Kompleksnyi analiz mekhanizmv paralelnoi struktury zasobamy tsilovokh system avtomatyzovanoho modeliuвання / S.A. Rusanov, D.O. Dmytriiev // Tezy dopovidei VII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Teoretychni ta praktychni problemy v obrobtsi materialiv tyskom i yakosti fakhovoi osvity», Kyiv – Kherson, 2016, s. 152-155.

5. Dmytriiev D.O. Zovnishni moduli dlia prohnozuvannya ta upravlinnia skladnymy rukhamy lanok mekhanizmv paralelnoi struktury / D.O. Dmytriiev, S.A. Rusanov, P.V. Keба, S.M. Piven // Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZlaTPS – 2016): materialy tez dopovidei VI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Chernihiv: ChNTU, 2016.–С.44-47.

#### МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С МПС ПО КРИТЕРИЮ ТОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

**Аннотация.** Проведено сравнение типичных стратегий обработки и базирования детали в наиболее

распространенных каркасных компоновках станков с МПС. Предложена методика учета в процессе синтеза технологического оборудования с МПС ограничений, учитывающих анализ отклика каркасной системы МПС на внешние нагрузки в ракурсе оценки жесткости системы, точности позиционирования, анализа вибраций оборудования.

**Ключевые слова:** стратегии обработки, каркасные компоновки, оценка жесткости системы, точное позиционирование, анализ вибраций.

#### METHODOLOGY OF SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH MPS ON THE CRITERIA OF ACCURACY, RIGIDITY AND PERFORMANCE

**Annotation.** Comparison of typical strategies for machining and basing a part in the most common wireframe configurations of machine tools with MPS is described. The technique of accounting in the process of synthesis of technological equipment with MPS limitations, taking into account the analysis of the response of the MPS frame system to external loads in the view of system rigidity estimation, positioning accuracy, vibration analysis of equipment is suggested.

**Key words:** processing strategies, frame layouts, system rigidity estimation, precise positioning, vibration analysis.

#### Відомості про авторів

**Дмитрієв Дмитро Олексійович** – доктор технічних наук, професор кафедри: «Транспортних систем і технічного сервісу» Херсонського національного технічного університету (вул. Бериславське шосе, 22, Херсон, Україна, 73000, e-mail:dmitr\_da@ukr.net).

**Русанов Сергій Аркадійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри: «Транспортних систем і технічного сервісу» Херсонського національного технічного університету (вул. Іллюши Кулика, 130, Херсон, Україна, 73000, e-mail:ohvpbm@i.ua).

**Федорчук Дмитро Дмитрович** – студент Херсонського національного технічного університету (вул. Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73000, e-mail:vistelond.f@gmail.com).

**Дмитриєв Дмитрий Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортных систем и технического сервиса» Херсонского национального технического университета (ул. Бериславское шоссе, 22, Херсон, Украина, 73000, e-mail:dmitr\_da@ukr.net).

**Русанов Сергей Аркадиевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортных систем и технического сервиса» Херсонского национального технического университета (ул. Іллюши Кулика, 130, Херсон, Украина, 73000, e-mail:ohvpbm@i.ua).

**Федорчук Дмитрий Дмитриевич** – студент Херсонского национального технического университета (Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73000, e-mail:vistelond.f@gmail.com).

**Dmitriev Dmitry** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Systems and Technical Services of the Kherson National Technical University (Beryslavskoe Highway, 22, Kherson, Ukraine, 73000, e-mail: dmitr\_da@ukr.net).

**Rusanov Sergey** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Technical Services of the Kherson National Technical University (St. Ilyushi Kulika 130, Kherson, Ukraine, 73000, e-mail:ohvpbm@i.ua).

**Fedorchuk Dmitry** – student of the Kherson National Technical University (Beryslavskoe Highway, 24, Kherson, Ukraine, 73000, e-mail: vistelond.f@gmail.com).