

УДК 621.9.04

П.В. КЕБА, Д.О. ДМИТРІЄВ, Д.Д. ФЕДОРЧУК
Херсонський національний технічний університет

АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ, ТОЧНОСТІ ТА ДИНАМІКИ ПІРАМІДАЛЬНОЇ КОМПОЗИЦІЇ ВЕРСТАТА З МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

В роботі було проведено експериментальний аналіз переміщення вихідної ланки, за результатами вимірювань розраховано кінематичні похибки механізмів паралельної структури (МПС). В статті вказується математична модель, яку покладено в основу комп'ютерних програм «Tools Glide» — розв'язання задач кінематики, «Tools Response» — модуль оцінки пружного стану і динамічного відгуку верстатної системи та «Tools App» — динамічний відгук. В процесі проектування верстатів з МПС дане програмне забезпечення дозволяє проаналізувати властивості будь-яких варіантів конструкцій, що проектуються, та зробити вибір конструктивних вузлів, агрегатів та деталей.

Ключові слова: кінематична похибка, механізми паралельної структури, математична модель.

P.V. KEBA, D.O. DMYTRIEV, D.D. FEDORCHUK
Kherson National Technical University

KINEMATIC, ACCURACY AND DYNAMIC ANALYSIS OF PYRAMIDAL CONFIGURATION MACHINE TOOL WITH THE MECHANISM OF PARALLEL STRUCTURES

The main purpose was to study efficiency of the executive branch and the carriages of pyramidal arrangement to determine possible sources of errors in the positioning and further processing. Also vibration resistance of platform was examined. Experimental analysis of displacement output unit was carried out, according to the calculated cinematic mechanisms of parallel structure (MPS) measurement error. The article provides mathematical model, which is the basis for computer programs «Tools Glide» - solving kinematics, «Tools Response» - module for evaluation of elastic state and dynamic response system and tool «Tools App» - dynamic response. During the design tools from MPS this software allows you to analyze the properties of any options structures, and design, and a choose structural components, assemblies and parts.

Keywords: cinematic error, mechanisms of parallel kinematics, the mathematical model.

Постановка проблеми

В сучасних умовах вітчизняного верстатобудування пріоритетним напрямком розвитку вважається створення конкурентоспроможних зразків верстатів, які задовольнили б потреби галузі. В ринкових умовах перед виробничими підприємствами постають задачі, характер яких швидко змінюється, майже не щоденно. В сфері оброблювального обладнання необхідно мати різноманітне верстатне устаткування яке б дозволило забезпечити виконання вимог замовника із мінімальними капіталовкладеннями для одного підприємства на верстатне устаткування. Такими можна виділити верстати каркасного компонування з низькою металоємністю і високою продуктивністю оброблення. В свою чергу наявні деякі питання щодо керування такими верстатами у зв'язку з присутністю допоміжних ступенів рухомості. Вирішення питань якісного адаптивного управління верстатами нового покоління вирішить ряд питань і дозволить виготовляти спеціалізоване обладнання нестандартних комплектацій з широкими технологічними можливостями.

Аналіз проведених раніше досліджень

На сьогоднішній день велику увагу приділяють верстатам з механізмами паралельної кінематики, в роботі [1] було розроблено конструкцію спеціальних пристроїв (калібрів) для ідентифікації геометричних параметрів точності верстата з МПС та визначення параметрів його точності. В роботі [2] розглядаються основні типи багатокоординатних верстатів паралельної структури і можливості орієнтації її робочого органу відносно системи координат та проведена робота щодо забезпечення жорсткості шарнірних опор робочого органу верстата «пентапод» під дією радіального та осевого навантаження. Однак не було проведено досліджень щодо створення програмного забезпечення яке б в процесі проектування верстатів з МПС дозволило проаналізувати властивості будь-яких варіантів конструкцій, що проектуються, зробити вибір конструктивних вузлів, агрегатів та деталей.

Мета та задачі

Основною метою роботи було дослідження працездатності виконавчого органу та кареток верстата пірамідального компонування для визначення можливих джерел виникнення похибок при позиціонуванні та подальшій обробці. Також за мету взято розглядання вібростійкості несучої платформи. Однією з проблем у створенні верстатів з паралельною кінематикою є складність забезпечення точності переміщення виконавчого органу, а також забезпечити взаємозв'язок у переміщеннях рухомих кареток вздовж напрямних.

Особливістю механізмів паралельної структури є те, що залежно від їх конструктивного виконання, похибки викликані зазорами в підшипникових парах, неточністю виготовлення в одних випадках можуть підсумовуватися, в інших – вибираються найменші значення.

Основний зміст

Для розв'язання задач про положення складено систему рівнянь, що зв'язує геометрично положення опорних шарнірів на рухомій платформі і на напрямних верстата:

Розрахунок положень кінематичних ланок в площині ZOZ

$$\begin{cases} x_k = K_1 \cdot (z - z_1) + y_1 \quad (k = 2) \\ (x - x_{0i})^2 + (z - z_{0i})^2 = l_i^2 \quad (i = 2), \end{cases} \quad (1)$$

Розрахунок положень кінематичних ланок в площині ZOY

$$\begin{cases} y_k = K_2 \cdot (z - z_1) + x_1 \quad (k = 2) \\ (y - y_{0i})^2 + (z - z_{0i})^2 = l_i^2 \quad (i = 2), \end{cases} \quad (2)$$

де $K_1 = \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1}; K_2 = \frac{y_2 - y_1}{z_2 - z_1}$.

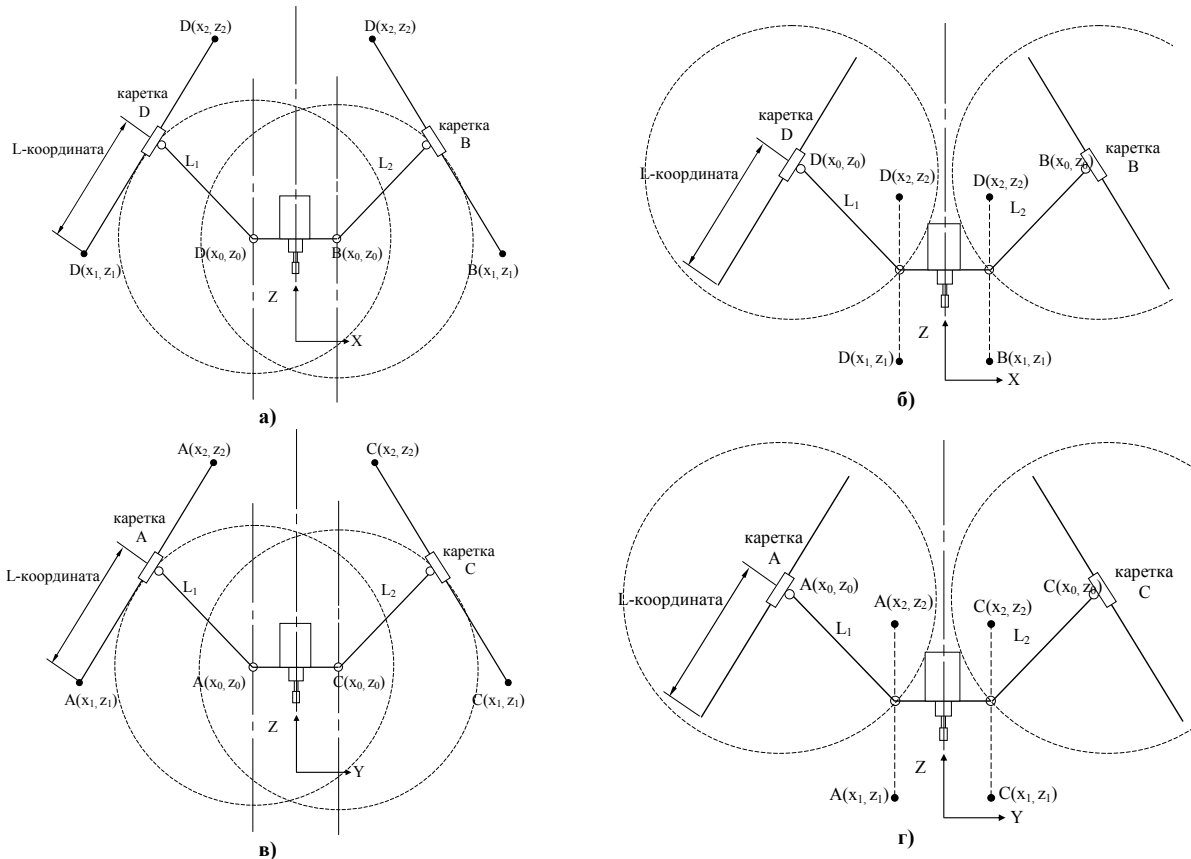


Рис. 1. Схема розкладання МПС на плоскі стрижневі системи з позначеннями змінних при розв'язанні прямої (а), (в) і зворотної (б) і (г) задач кінематики аналітичним методом

Прийнято, що положення ВО існує в робочому просторі, якщо існують дійсні корні x, y, z , що визначає напрямну в просторі, - пряма задана двома точками $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ і кола радіусом, що дорівнює довжині штанги l з координатами центрів шарнірів на рухомій платформі (x_0, y_0, z_0) ; k – кількість напрямних; i – кількість штанг.

Кінематичні похибки механізмів паралельної структури в першу чергу визначаються похибками в з'єднаннях ланок. Зношування підшипників і похибки збірки з'єднань в першу чергу призводять до похибок довжин ланок, що у розрахунках при плануванні траєкторії руху інструмента щодо оброблюваного виробу, і безпосередньо до похибок при відтворенні руху. Похибки довжин ланок включають температурні розширення, а також похибки їх виготовлення.

Після опускання РО фіксуються фактичні значення переміщення кареток та робочого органу. Система виводиться у початкове положення та реєструється похибка виходу в нуль. Для перевірки адекватності результатів цикл повторюється 50 разів.

Під час проведення експерименту були використані механічні індикатори з ціною поділки 0,01 мм. Для визначення похибки переміщення кареток, індикатори 1,2,3,4 фіксуються на ребрах каркасу, при цьому індикаторна ніжка опирається в циліндричний шарнір. Для визначення похибки позиціонування рухомої платформи індикатор 5 встановлюється на робочому столі опираючись в кінець мотор-шпинделя. На рис. 2 зображено верстат, налаштований для проведення експериментальних досліджень у верхньому положенні.

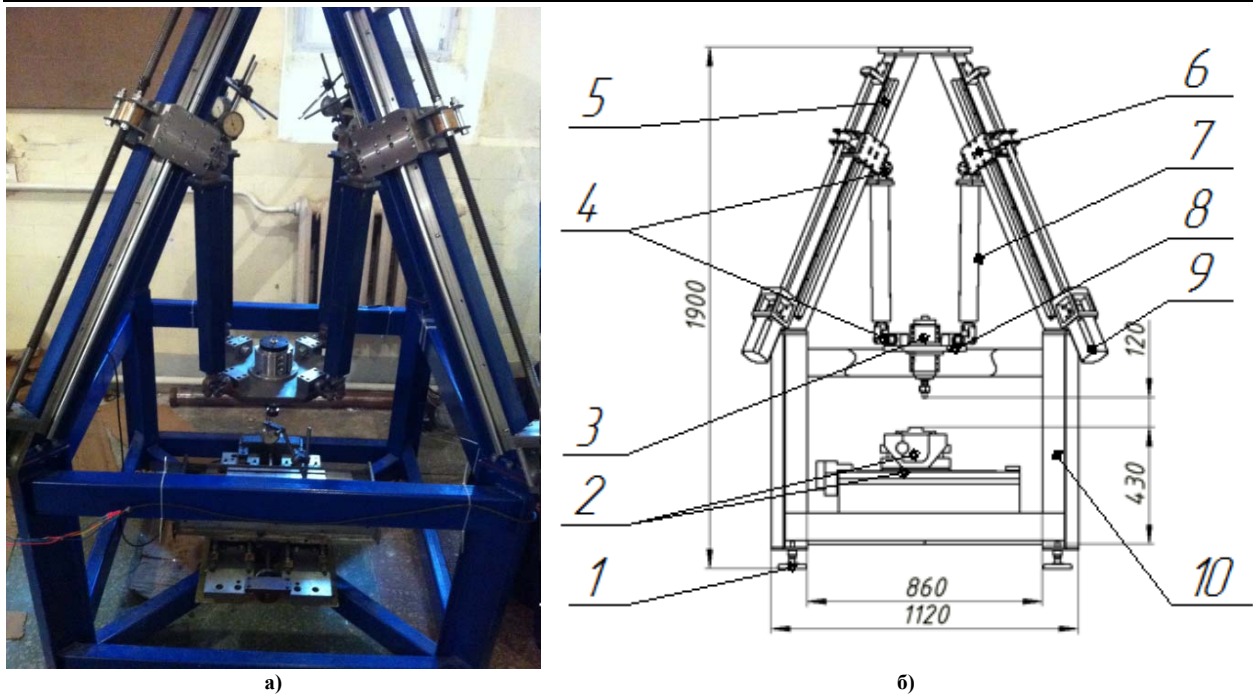


Рис. 2. Свердильно-фрезерний верстат пірамідальної компоновки: а – фото зі встановленими індикаторами; б – загальний вид – опора 1, хрестовий стіл 2, мотор-шпиндель 3, шарнір 4, напрямна 5, каретка 6, штанга постійної довжини 7, рухома платформа 8, лінійний двигун 9, каркас 10.

Отримано результати вимірювання. На їх основі були побудовані графіки залежності величини похибки від переміщення ВО (рис. 3, 4).

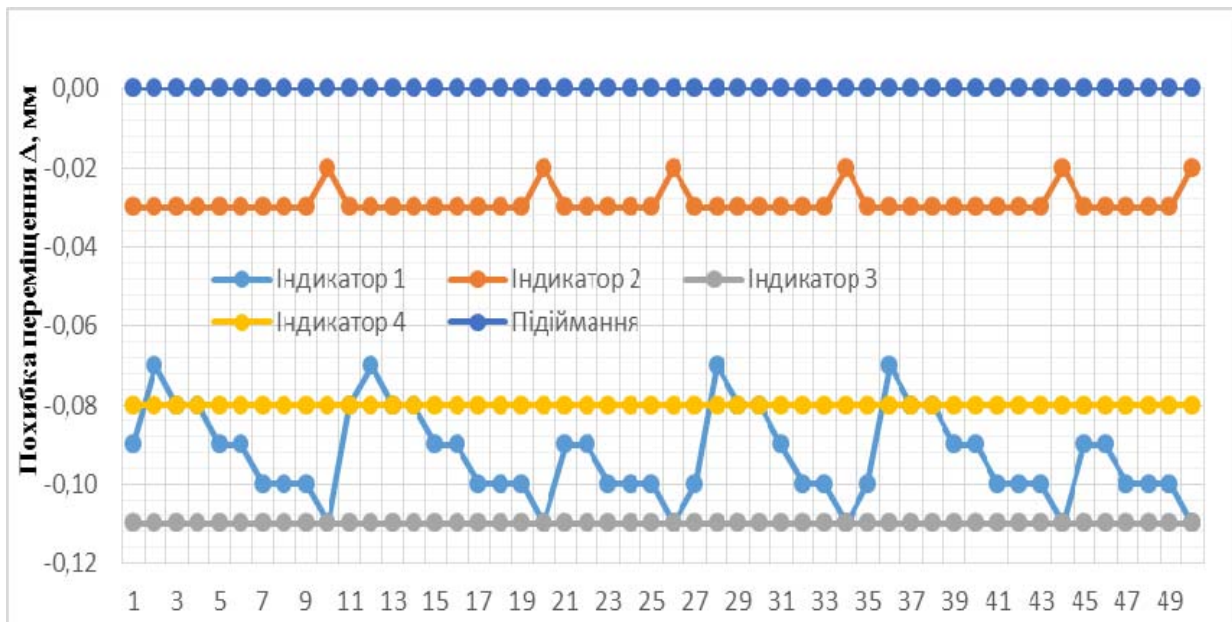


Рис. 3. Результати вимірювання похибки переміщення кареток

Максимальна похибка при опусканні складає $\Delta_{O(\max)} = -0,02$ мм на індикаторі 2, а мінімальна - $\Delta_{O(\min)} = -0,11$ мм в індикаторі 3. Похибка повернення усіх чотирьох кареток у своє вихідне положення (підйом) дорівнює 0.

Актуальним при дослідженні характеристик верстата є врахування динамічного відгуку системи «деталь-інструмент-верстат» в процесі обробки та прогнозування областей динамічної податливості стрижневих систем для забезпечення технологічних операцій [4]. Переважна більшість постпроцесорів в існуючих САМ-програмах розроблені під існуючі верстати та відомі компоновки [3]. При створенні нової компоновки виникає необхідність адаптувати програму керування згідно кінематичної структури і одночасно виконувати аналіз жорсткісних та динамічних характеристик технологічної системи.

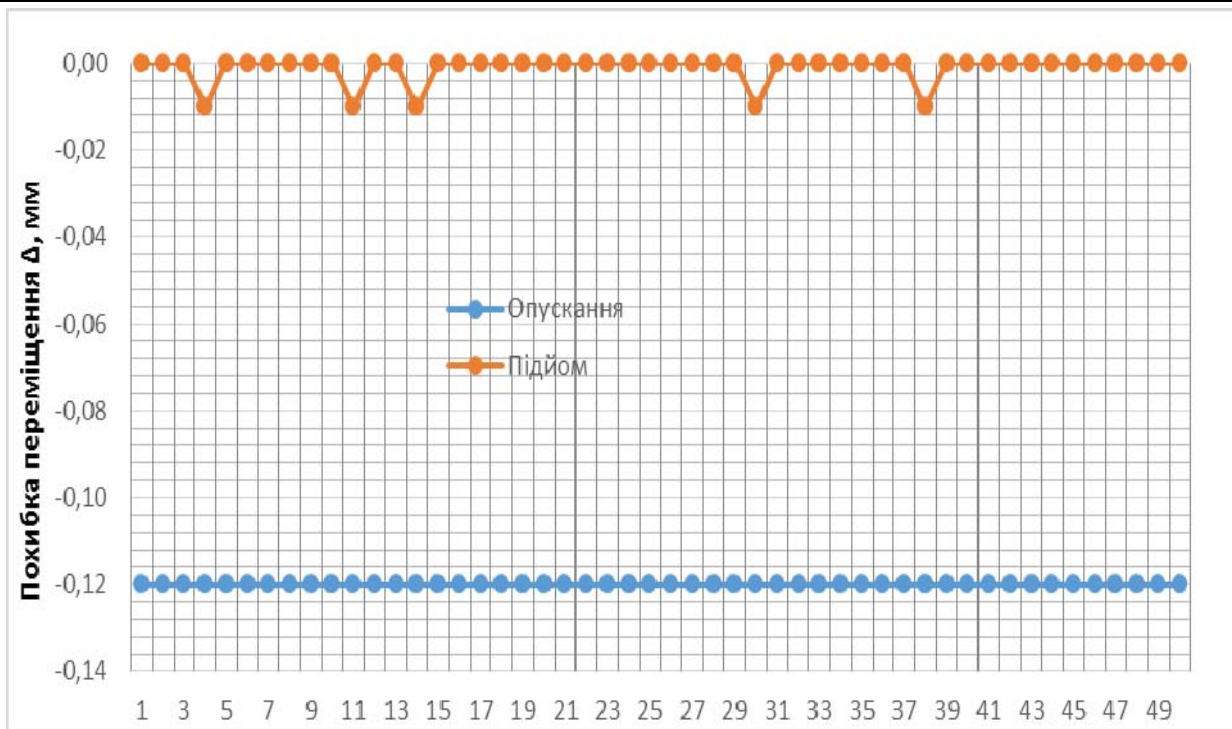


Рис. 4. Результати вимірювання похибки позиціонування РО

Запропоновано комплексний підхід оцінки якості компоновки, який включає: процедури структурно-схемного синтезу в залежності від геометричного образу деталі, що обробляється; математичні і програмні методи розв’язання задач кінематики і управління приводами каркасних компоновок; оцінку пружного стану і динамічного відгуку верстатної системи з МПС в заданих діапазонах роботи обладнання. Отримано математичну модель, яку покладено в основу комп’ютерних програм «Tools Glide» та «Tools Response». В процесі проектування верстатів з МПС дане програмне забезпечення дозволить проаналізувати властивості будь-яких варіантів конструкцій, що проектуються, та зробити вибір конструктивних вузлів, агрегатів та деталей (рис.5).



Рис. 5. Послідовність процедур зовнішнього постпроцесора

Сучасна робота з обладнанням з ЧПК базується на створенні програми обробки деталі, для чого необхідно задати поверхню обробки в САМ-модулі та отримати файл положення інструменту CL-data (cut-location data) [5]. В файлі CL-data наявні координати опорних точок траєкторії обробки з векторами напрямку інструменту. На основі цього файлу комп’ютерна програма «Tools Glide» виконує розв’язання зворотної задачі кінематики та прораховує для кожної координати зі списку CL-data значення координат органів керування верстатів з МПС. «Tools Response» дозволяє отримувати параметри жорсткості, податливості, силові характеристики складних багатоступеневих структур, з розрахунком взаємовпливу

ступенів рухливості, будь-яких наборів вузлів, агрегатів та шарнірів (рис.6). Отримані дані можуть передаватися в модуль аналізу динамічних властивостей «Tools App» [6].

Для побудови параметричної моделі в комп'ютерній програмі «Tools Glide» траєкторію робочого органу та його орієнтацію задають функцією скалярного параметру [6]

$$\mathbf{X} = [x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda), n_x(\lambda), n_y(\lambda), n_z(\lambda)], \quad (3)$$

де (x, y, z) – радіус-вектор відповідного положення, n_x, n_y, n_z – орієнтації робочого органу в глобальній системі координат, λ – шлях, що пройшов робочий орган вздовж траєкторії.

Структура програмних модулів «Tools Glide» та «Tools Response» складається з математичних блоків розрахунку кінематики і жорсткості (податливості) (рис.6). Блок кінематики («Tools Glide») включає можливості формування компоновки glide-обладнання та розрахунками кінематики з підтримкою зворотного зв'язку з модулем відгуку «Tools Response» для врахування роботи шарнірів різних типів. Основні модулі системи включають: модуль роботи з файлами CL-data (MPN) – формування та корегування масиву \mathbf{X} ; модулі розрахунку кінематичних задач (SolvingNuPhi, Rota, Coord Car, Basis, ...) – формується характер осі керування, матриць переходу від попередньої опорної точки до наступної, формування координат кареток тощо.

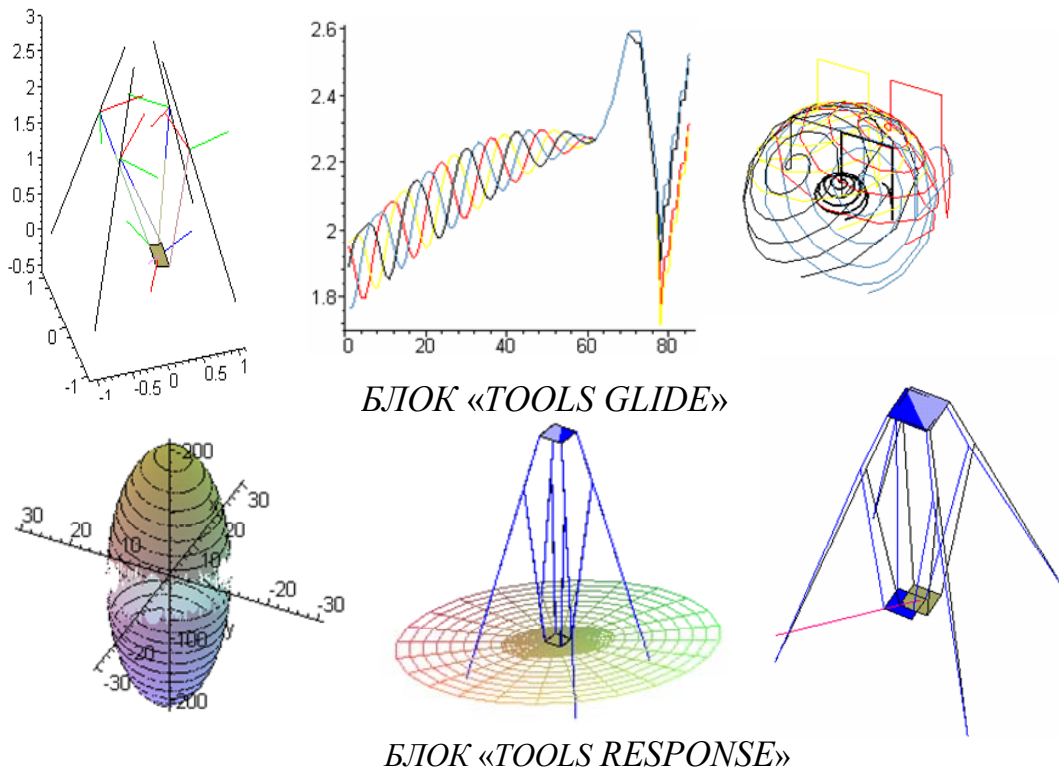


Рис. 6. Проміжні графічні об'єкти блоків «Tools Glide» та «Tools Response»

Блок аналізу податливостей («Tools Response») включає можливості розрахунку відгуку конструкції імпортованої з модуля «Tools Response» за методом скінченних елементів з врахуванням жорсткісних характеристик ланок, типів шарнірів, тощо. Основні модулі системи включають: модулі формування та корегування скінченних елементів (Balance, PhisEqs, ATP, ...) – підтримуються скінченні елементи типу консоль (CONS), балка (BEAM), полігон (ATP), шарніри (Joint), стойки (Bar) та ін.; окрім того процедура ATP враховує кінематичні зв'язки і поведінку абсолютно твердого тіла (rigid body) в просторі; модуль фізики PhisEqs містить закони деформування елементів, розраховує матриці жорсткості компонентів в локальних та глобальних системах координат; модуль рівноваги Balance встановлює балансові закони для усіх об'єктів навантаження; Joint – модуль врахування видів шарнірів по геометрії, кінематиці, зовнішніх силах і моментах, що виникають в шарнірах; Bar – модуль характеристик стойки (попереднє навантаження, орієнтація, рух шарнірів відносно системи координат стойки).

Зворотній зв'язок між модулями (імпорт-експорт) забезпечує можливість врахування взаємного впливу «кінематика – деформаційний відклик конструкції». Ця можливість забезпечує подальше оптимальне прогнозування роботи обладнання для різних компонок.

Отримані дані можуть бути передані в модуль «Tools App» (рис. 7), де властивості технологічної системи описуються функцією динамічної податливості, яка характеризує відгук технологічної системи у вигляді переміщень на задане силове збудження. Для кожної технологічної системи ця залежність різна і може бути визначена окремо, що дозволяє також використовувати програмний продукт на етапі проектування верстатів з МПС [7].

Модель динаміки програми «Tools App» побудовано на основі рівнянь Лагранжа другого роду. Для

n -ступеневого механізму математична модель в лагранжевій формі перетворюється до вигляду [7]:

$$\mathbf{I}(\mathbf{q})\frac{d^2\mathbf{q}}{dt^2} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \frac{d\mathbf{q}}{dt}) = \mathbf{Q} \quad (4)$$

де \mathbf{q} , $\frac{d\mathbf{q}}{dt}$, $\frac{d^2\mathbf{q}}{dt^2}$ – вектори ($n \times 1$) відповідно узагальнених координат, швидкостей та прискорень;

$\mathbf{I}(\mathbf{q})$ - матриця інерції механізму; $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \frac{d\mathbf{q}}{dt})$ – вектор ($n \times 1$) відцентрових, коріолісових та дисипативних сил; \mathbf{Q} – вектор ($n \times 1$) узагальнених сил, які прикладені до ланок і шарнірів механізму.

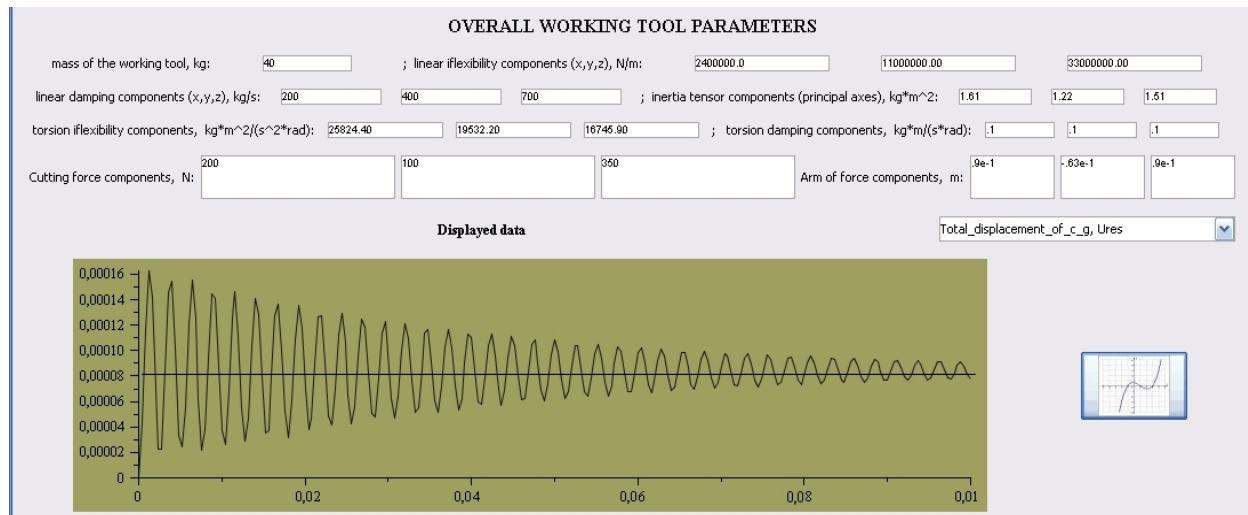


Рис. 7. Визначення часу стабілізації та величини динамічного переміщення стрижневої системи МПС

Висновки. Проведено експериментальне визначення похибок переміщення ВО та рухомих кареток, максимальне значення похибки позиціонування складає 0,11мм. Розроблене програмне забезпечення для кінематичного аналізу і визначення L-координат рухомих кареток, а також модуль динамічного відгуку для визначення жорсткості системи. Таким чином отримано фактично зовнішній постпроцесор для створення програм керування нових компоновок верстатів з МПС з одночасною оцінкою параметрів жорсткості і динамічного відгуку ланок при виконанні технологічних переходів обробки складно профільних поверхонь.

Література

1. Струтинський В.Б. Визначення похибки виходу робочого органу верстата з механізмами паралельної структури в позицію / Струтинський В.Б., Дем'яненко А.С. // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу». — Херсон, 2015.
2. Кириченко А.М. Експериментальне дослідження жорсткості шарнірів робочого органу багатокоординатного верстата паралельної структури «пентод» / Кириченко А.М., Шелепко О.В. // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2015.
3. Петраков Ю. В. Напрями розвитку САМ-систем / Ю. В. Петраков, В. В. Писаренко, О. С. Мацківський // Журнал інженерних наук. – 2015. – Том 2. – № 2 (2015). – С. А7–А13.
4. Залого В. О. Исследование влияния конфигурации технологической системы на ее динамическую податливость / В. О. Залого, Д. В. Криворучко, С. С. Емельяненко // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2011. – № 4. – С. 97–104.
5. Петраков Ю. В. Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів із ЧПУ : монографія / Петраков Ю. В. – К. : Січкара, 2011. – 220 с.
6. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір "Комп'ютерна програма « Tools App» – № 57913 від 29.12.2014 / Державна служба інтелектуальної власності.
7. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение / Подураев Ю. В. – М. : Машиностроение, 2006. – 286 с.
8. Кузнецов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури : монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич ; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.

Рецензія/Peer review : 13.2.2016 р.

Надрукована/Printed : 19.4.2016 р.
Рецензент : д.т.н., проф. Клевцов К.М.