

Плаксій Юрій Андрійович – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-64-36; e-mail: plaksiyya@rambler.ru.

Плаксій Юрій Андреевич – кандидат технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-64-36; e-mail: plaksiyya@rambler.ru.

Plaksiy Yuriy Andreevich – Candidate of Engineering Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv; tel.: (057) 707-64-36; e-mail: plaksiyya@rambler.ru.

УДК 621.9.06

С. В. СТРУТИНСЬКИЙ

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ТЕОРІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ МЕХАТРОННИХ ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМ ПРИВОДІВ

Розроблено концепцію та основні принципи теорії проектування інноваційних мехатронних просторових систем приводів. Концепція включає розробку інноваційних просторових систем приводів на новій елементній базі. Елементна база створена на основі аналізу робочих процесів у просторових системах приводів. Запропоновано основні етапи теорії проектування, які у своєму взаємозв'язку дають можливість розробити систему приводів просторового типу. Системи приводів призначені для маніпулювання об'єктами машинобудування, в тому числі в екстремальних умовах експлуатації. Вони забезпечують роботу в замкнених об'єктах та переміщення об'єктів по стінках. Етапи включають синтез схемних рішень, розрахунків, макетування, визначення статичних і динамічних характеристик, створення елементної бази та алгоритмічного забезпечення роботи мехатронної системи і апробацію дослідних зразків систем.

Ключові слова: просторові приводи, теорія проектування, синтез схем, розрахунок, макетування, статика, динаміка, апробація.

Вступ. Просторові системи приводів є основою прогресивного технологічного обладнання з паралельними кінематичними структурами. Розвиток просторових систем приводів стримується відсутністю теорії їх проектування.

Проблема в загальному вигляді полягає у створенні ефективного технологічного обладнання. Ця проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями розвитку машинобудування.

Аналіз останніх досліджень. В [1] наведена значна кількість розробок просторових систем приводів. В [2] значну увагу приділено дослідженню кінематики просторових систем та розробці їх основних вузлів. Розглянуто перспективні напрямки розробки просторових систем приводів. Одним із ефективних напрямків є розробка пристроїв мікромеханіки на основі просторових систем приводів [3, 4]. В окремих публікаціях [5, 6] наведені рекомендації по розробці схемних рішень просторових систем та розрахунку їх параметрів. Відзначена надзвичайна складність синтезу просторових механізмів.

В літературних джерелах і мережі Internet не виявлено розробок теорії проектування просторових систем приводів. Тому розробки в даному напрямку є актуальними.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка концептуальних принципів теорії проектування інноваційних просторових систем приводів.

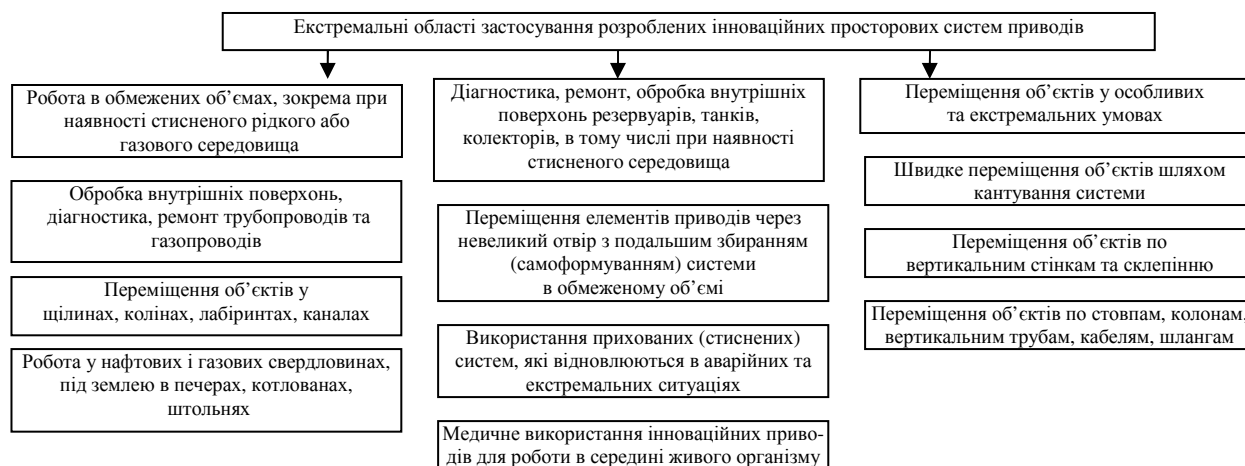


Рис. 1 – Застосування інноваційних мехатронних просторових систем приводів у екстремальних умовах.

Постановка задачі. Для широкого впровадження просторових систем приводів необхідно розробити тео-

рію їх проектування. Тому метою досліджень поставлено розробку концептуальних принципів теорії проектування інноваційних мехатронних просторових систем приводів. Задачами досліджень поставлена розробка концепції та формування основних положень теорії проектування, формування основних етапів теорії проектування та пропозицій по їх реалізації і практичне підтвердження розроблених концептуальних принципів.

Основні етапи теорії проектування. Інноваційними мехатронними просторовими системами приводів вважаються перспективні розробки в галузі машинознавства, що забезпечують суттєвий ріст якісних властивостей обладнання, що включає систему приводів [2].

Інноваційна мехатронна просторова система приводів має вузли, що можуть змінювати свою довжину або форму та з'єднані в точках, які розташовані в просторі довільним чином і переміщуються під час роботи за допомогою системи керування з потужним інтелектуальним блоком.

Традиційно просторові системи приводів застосовуються в технологічному обладнанні, зокрема маніпуляторах, промислових роботах, металорізальних верстатах, вимірвальних машинах, тренажерах та інших.

Інноваційні мехатронні просторові системи приводів найбільш ефективні для вирішення екстремальних задач (рис. 1).

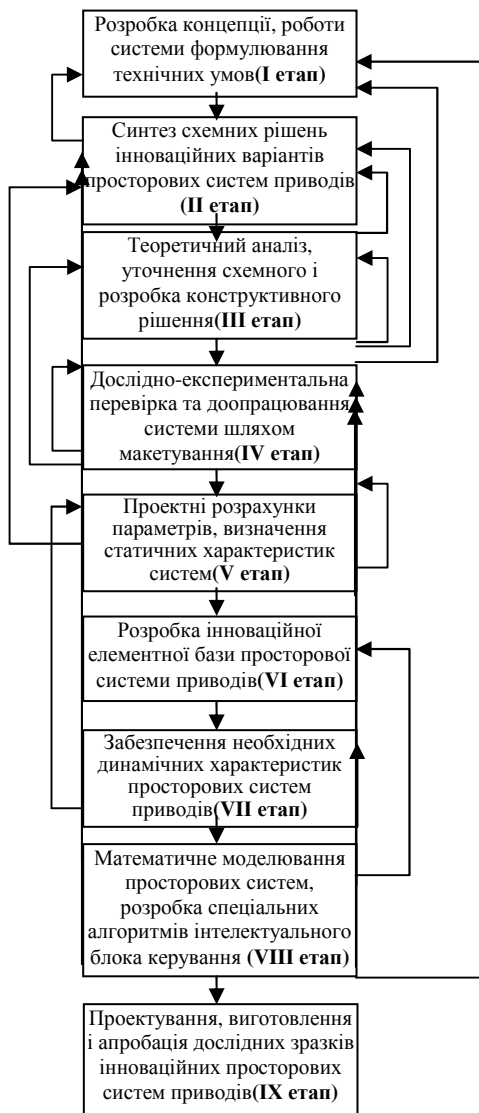


Рис. 2 – Основні етапи теорії проектування інноваційних мехатронних просторових систем приводів та їх взаємний зв'язок.

нові сильфонних пневмодвигунів є запропоновані безшарнірні просторові системи приводів.

Третій підхід полягає у використанні запропонованих пластично деформованих шарнірних та безшарнірних систем, які об'єднують термомеханічні мехатронні приводи на основі сплавів з пам'яттю форми.

Технічні умови на просторові системи приводів, які розробляються, визначають регламентні функціональні можливості системи, діапазони змін силових і кінематичних параметрів, необхідні масо-габаритні характеристики систем та інші параметри.

До таких задач відноситься робота в обмежених об'ємах, таких як трубопроводи, ємності, резервуари, колектори тощо. Ефективним є застосування пристроїв маніпулювання на основі просторових систем приводів для механізації важких, небезпечних робіт, робіт в складних екологічних умовах. Зокрема це пристрої фарбування, гідроструменевої або піскоструменевої очистки. Пристрої маніпулювання ефективні при розбиранні завалів на сміттєзвалищах, для розбирання та сортування сміття та брухту. Для пакувальної промисловості, в тому числі токсичних матеріалів.

Окремі застосування просторових систем приводів орієнтовані на роботу в небезпечних зовнішніх умовах.

Згідно розроблених концептуальних принципів теорія проектування просторових систем приводів включає ряд послідовних етапів від розробки концепції системи та формулювання технічних умов до апробації дослідних зразків (рис. 2).

Розглянемо окремо кожний із етапів теорії проектування.

Перший етап. На ньому проводиться розробка концепції та формулювання технічних умов.

Розробки концепції роботи просторової системи приводів базується на створенні принципово нових (інноваційних) приводів. Запропоновано три принципово різні концептуальні підходи до реалізації інноваційних просторових систем приводів.

Перший відповідає використанню традиційних приводів у вигляді пневмоциліндрів, з'єднаних шарнірами. Вони реалізуються у вигляді комплектних багатопозиційних пневмоциліндрів із відповідними системами дискретного керування. Для забезпечення необхідної точності комплектні дискретні приводи оснащені лінійними приводами мікропереміщень.

Другий підхід до реалізації схемних рішень просторових систем приводів полягає у застосуванні пружно-деформованих сильфонних приводів або приводів на основі шлангових пневмодвигунів (пневмом'язів). Особливим видом просторових систем приводів на ос-

Другий етап теорії проектування. Проводиться синтез схемних рішень (рис. 2). Синтез схемних рішень необхідної кількості варіантів систем проводиться відповідно технічних умов. Синтез схемних рішень здійснюється на основі розроблених і систематизованих базових схем механізмів, призначених для переміщення одного або кількох виконавчих органів у просторі.

Запропоновано близько 100 базових схем, які відрізняються просторовим положенням елементів та характером руху окремих приводів у системі [7]. Серед базових схем наявні *основні*, які апробовані позитивним досвідом розробки і використання, та *перспективні схеми*, які мають особливі властивості. До основних базових схем відноситься схема відповідна механізмам-гексаподам чи гексаглайдам (рис. 3).

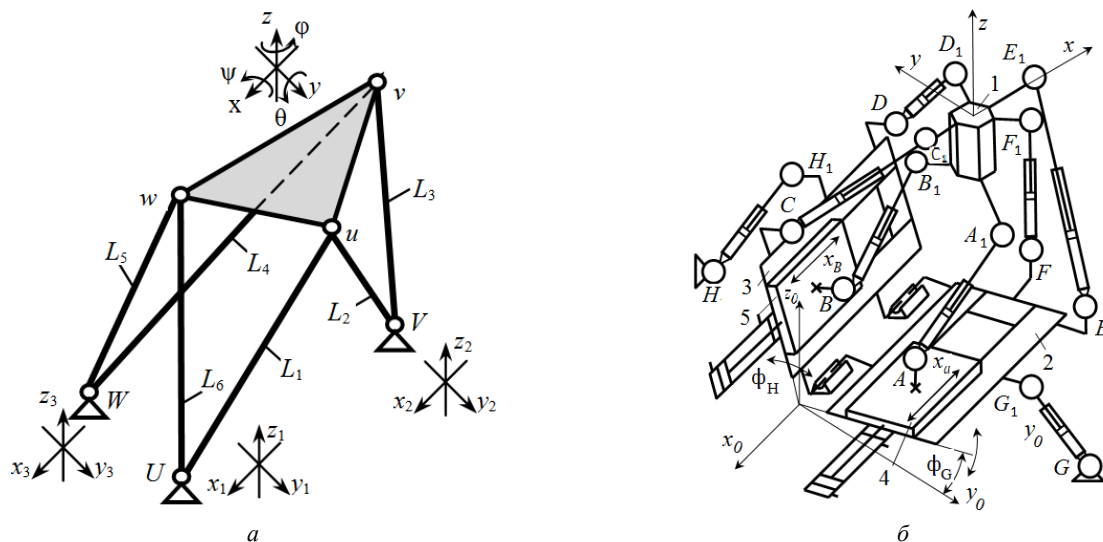


Рис. 3 – Одна із основних базових схем просторових систем приводів: *a* – механізм-гексапод або механізм-гексаглайд; *б* – варіант схемного рішення просторової системи 10 приводів.

Наведена схема (рис. 3, *a*) має шість штанг змінної або постійної довжини $L_1 \dots L_6$ та три суміщені опори штанг U, V, W , опори яких $U, V, W \in$ нерухомі або переміщуються в напрямках $x_1, y_1, z_1, \dots, x_3, y_3, z_3$. Система має виконавчий орган uvw , який переміщується в просторі. Положення виконавчого органу характеризується шестивимірним вектором x – координат з компонентами:

$$(x_i) = [x, y, z, \psi, \theta, \varphi]^T. \quad (1)$$

Дана система приводів має 15 ступенів вільності. Для забезпечення переміщення виконавчого органу достатньо шести ступенів вільності, наприклад L – координат у вигляді довжин штанг:

$$(L_i) = [L_1 \dots L_6]^T,$$

при нерухомих опорах U, V, W . При цьому реалізується механізм-гексапод із суміщеними опорами.

Згідно запропонованих концептуальних принципів побудови системи приводів опорні вузли U, V, W та з'єднання штанг із виконавчим органом u, v, w реалізуються у вигляді шарнірів або у вигляді пружно-деформованих чи пластично-деформованих елементів.

Основні базові схеми доповнені різноманітними схемними рішеннями із взаємозалежними переміщеннями опорних вузлів та різними варіантами встановлення приводів. Як приклад наведено варіант схемного рішення системи, що має 10 приводів, які утворюють просторову систему (рис. 3, *б*). Основою даного схемного рішення є механізм-гексапод із виконавчим органом 1. При цьому опорні вузли механізму A і B мають дві додаткові ступені вільності, а вузли C, D, E, F мають попарно взаємопов'язані додаткові ступені вільності.

Третій етап теорії проектування. Проводиться теоретичний аналіз схемного рішення (рис. 2). Синтезоване схемне рішення просторової системи приводів аналізується з метою його уточнення. Насамперед перевіряється працездатність розробленої системи, її відповідність поставленим вимогам та можливість забезпечення необхідних статичних і динамічних характеристик. Для уточнення схемного рішення проводиться теоретичний аналіз механізму, що відповідає схемному рішенню.

Теоретичний аналіз здійснюється для малих змін положення системи приводів, а при необхідності – для кінцевих (великих) змін положення елементів системи. Для малих змін координат маємо лінійну залежність x – координат від L – координат у вигляді:

$$\delta x_i = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial x_i}{\partial L_j} \delta L_j, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad \text{або} \quad (\delta x_i) = (m_{ij})(\delta L_j), \quad (2)$$

де (m_{ij}) – матриця взаємозв'язку координат механізму (матриця Якобі).

Залежності (2) відповідають розв'язку прямої задачі кінематики, коли за змінами L – координат визначаються зміни x – координат виконавчого органу. Зворотна задача кінематики стосовно просторової системи приводів полягає у знаходженні L – координат по заданим змінам x – координат згідно залежностей:

$$\delta L_j = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial L_j}{\partial x_i} \delta x_i, \quad j=1, 2, \dots, 6, \text{ або } (\delta L_j) = (n_{ji})(\delta x_i). \quad (3)$$

Теоретичний аналіз схемного рішення при великих змінах координат здійснено аналітичними методами або твердотільним моделюванням. Для розрахунку геометрії і кінематики просторових систем запропоновано математичний апарат на основі просторових матриць, сформованих на основі методів Монте-Карло [7]. Відповідно даного методу задається ряд випадкових положень просторової системи із подальшою фільтрацією фізично нереальних співвідношень параметрів системи. Застосування методів Монте-Карло значно спрощує розв'язок прямої задачі кінематики просторових механізмів, не потребує формування ітераційної процедури для розв'язку прямої задачі кінематики.

Уточнення схемного рішення, насамперед, здійснюється перевіркою працездатності системи. Одна із причин втрати працездатності просторової системи приводів є наявність в межах її робочого простору особливих (сингулярних) положень. Причинами виникнення сингулярних положень є нераціональне схемне рішення, недостатня жорсткість системи або наявність люфтів і зазорів у рухомих з'єднаннях системи. Геометричні сингулярні положення виникають при невизначеності зв'язку між кінематичними параметрами елементів, які утворюють рухомі (шарнірні) з'єднання. Механізм-гексапод при нераціональних геометричних співвідношеннях має чітко визначені сингулярні положення (рис. 4, а).

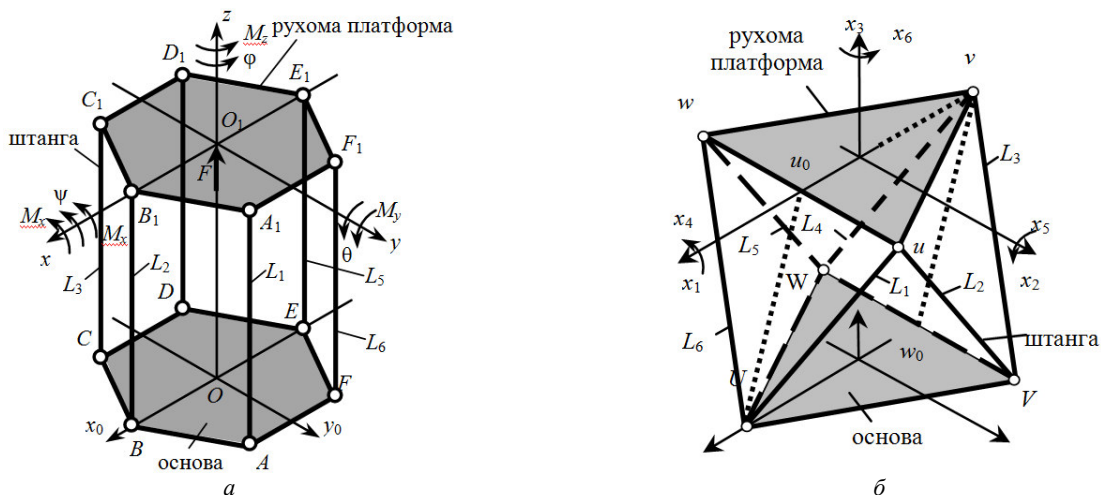


Рис. 4 – Порівняння двох схемних рішень: а – особливе (сингулярне) положення просторової системи приводів типу механізму-гексапода при його нераціональному схемному рішенні; б – раціональне схемне рішення механізму-гексапода відповідне октаедру.

Із розгляду схеми випливає, що механізм у даному положенні є непрацездатним. Наприклад, при невеликих змінах кута φ виконавчий орган під дією гравітаційних сил буде повертатись в одному або іншому напрямках. З іншого боку, невеликі зміни довжини однієї із штанг (наприклад L_1) не приведуть до переміщення виконавчого органу.

Як правило, кінематичні сингулярні положення характеризуються невизначеністю частинних похідних $\delta x_i / \delta L_j$. Для визначення сингулярних положень системи приводів у всьому робочому просторі також рекомендовано застосувати методи Монте-Карло [7].

Надійним способом уникнення сингулярних положень в просторових системах приводів є застосування апробованих практично схемних рішень системи. Для вибору схемного рішення розглянуто різноманітні варіанти геометричних схем просторових систем приводів. Для теоретичного узагальнення набору можливих варіантів запропоновані системи на основі механізмів правильної геометрії, які відповідають тетраедру, кубу, октаедру та іншим правильним просторовим багатогранникам. Приводи в просторових системах розташовуються по ребрам багатогранників. Окремі механізми правильної геометрії відповідають поширеним просторовим системам приводів; наприклад, механізм-гексапод при відповідних співвідношеннях геометричних параметрів відповідає октаедру (рис. 4, б).

Цей механізм має нерухому основу UVW та рухому платформу uvw . Шість штанг змінної довжини $L_1 \dots L_6$ з'єднують нерухому основу та рухому платформу.

Для механізмів правильної геометрії визначені матриці Якобі (2). Для цього задавались елементарні зміщення та повороти платформи в різних напрямках і визначались відповідні зміни L -координат. Зокрема для механізму октаедричного виду (рис. 4, б) одержано матрицю:

$$(m_{ij}) = \begin{pmatrix} -2\sqrt{3} & \sqrt{3} & -2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} & \sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ 2/\sqrt{3} & \infty & -2/\sqrt{3} & 2/\sqrt{3} & \infty & -2/\sqrt{3} \\ \sqrt{2}/\sqrt{3} & \sqrt{3}/\sqrt{2} & \sqrt{3}/\sqrt{2} & \sqrt{3}/\sqrt{2} & \sqrt{3}/\sqrt{2} & \sqrt{2}/\sqrt{3} \\ \sqrt{6} & \sqrt{6} & 0 & 0 & -\sqrt{6} & -\sqrt{6} \\ -6/\sqrt{2} & -6/\sqrt{2} & \sqrt{3}/\sqrt{2} & \sqrt{3}/\sqrt{2} & -6/\sqrt{2} & -6/\sqrt{2} \\ 10 & -2\sqrt{3} & 2 & -2 & 2\sqrt{3} & 10 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

На основі синтезованого схемного рішення розробляється конструктивне рішення просторової системи приводів. Рациональним є твердотільне моделювання системи (комп'ютерне макетування).

Четвертий етап теорії проектування. Проводиться перевірка схемного і конструктивного рішення шляхом макетування (рис. 2). Макетування здійснюється шляхом побудови твердо тільної моделі системи, яка формується із типових елементів. Набір елементів включає шарніри 1, кронштейни різного виду 2, 3 та корпусні деталі 4, із яких монтуються вузли макетних зразків просторових систем (рис. 5).

Твердотільні моделі служать для відпрацювання конструктивних схем просторових систем приводів, вибору та уточнення їх основних параметрів.

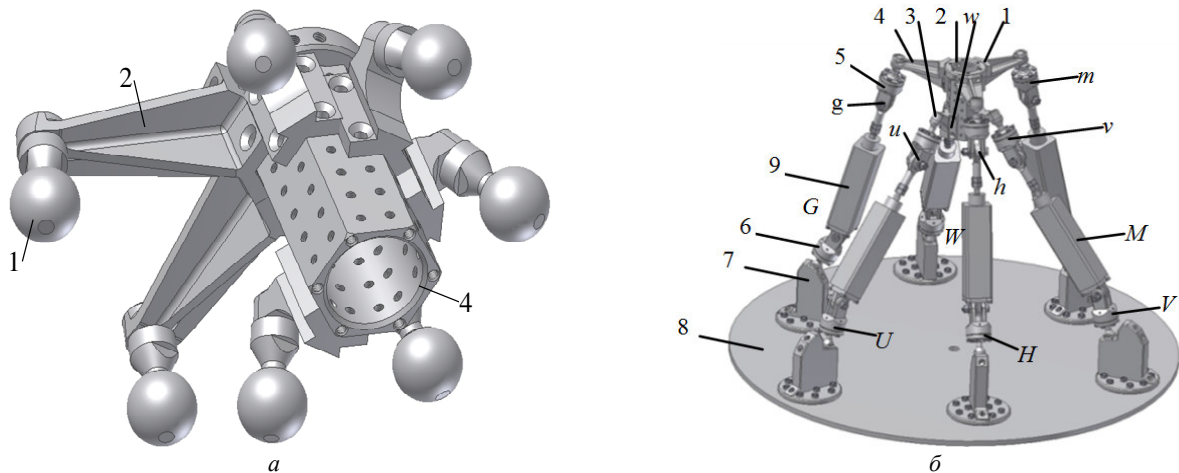


Рис. 5 – Твердотільні моделі: а – виконавчого органу; б – твердотільне комп'ютерне макетування просторової системи приводів.

Для підвищення ефективності доводки схемного і макетного зразка конструктивного рішення проводяться експериментальні дослідження системи (*фізичне макетування*). Запропонована універсальна методика макетування просторових систем на реальних фізичних моделях. Для цього розроблено і виготовлено набір елементів, блоків та модулів, що дозволяють скласти макетний зразок просторової системи, придатний для визначення її геометрії, статички та кінематики. Засоби макетування побудовані на блочно-модульному принципі і дають можливість реалізувати фізичні макети близько 200 конфігурацій різноманітних просторових систем приводів. Макетування просторових систем дає можливість експериментального виміру геометричних, кінематичних та силових параметрів систем, врахування можливих нелінійностей характеристик, виявлення і запобігання появи кінематичних та динамічних сингулярних положень в системах приводів, які проектуються. В результаті макетування уточнюються окремі конструктивні параметри та статичні характеристики просторових систем приводів. Для цього макетний зразок оснащується необхідною контрольно-вимірювальною апаратурою (рис. 6).

Розрахунок статичних характеристик просторових систем приводів здійснюється чисельними методами шляхом визначення напружено-деформованого стану системи. В окремих випадках для розрахунку геометрії і кінематики просторових систем приводів застосовуються аналітичні методи. При розрахунках рекомендується використання спрощених розрахункових схем просторових систем приводів у вигляді еквівалентних плоских механізмів, які є проекціями просторових систем на деякі характерні осі або площини.

Наприклад, для системи приводів октаедричного типу (рис. 4, б) еквівалентний плоский механізм U , w_0 , v , u_0 є проекцією просторового механізму на площину XOZ . Для плоского механізму формується розрахункова схема (рис. 7, а) і складаються рівняння статички.



Рис. 6 – Макетні зразки просторових систем приводів, оснащені контрольно-вимірювальною апаратурою: а – механізм-трипод; б – механізм-гексапод.

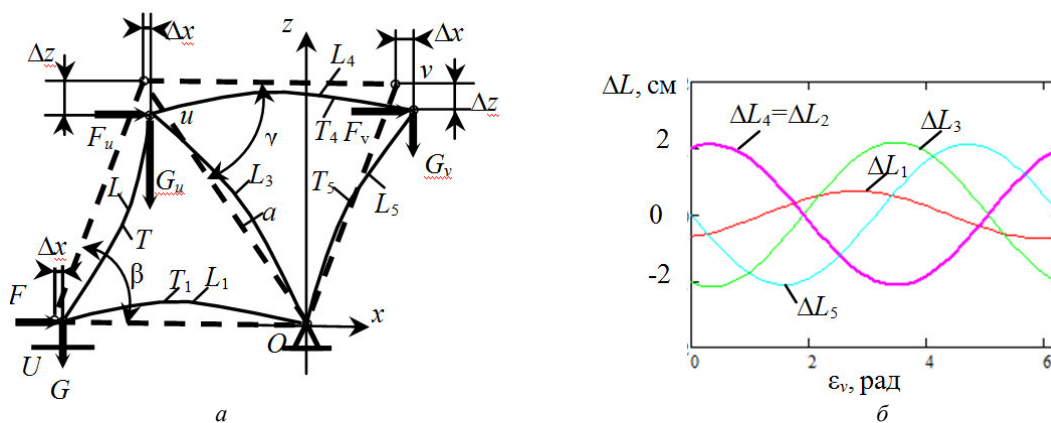


Рис. 7 – Розрахунок статичних характеристик: а – розрахункова схема механізму-гексапода у вигляді його плоскої проекції на площину XOZ ; б – результати розрахунку переміщень вершин механізму при циркуляційному навантаженні в точці v.

З розв’язання рівнянь статки для вузлів плоского механізму знаходяться зусилля в штангах в залежності від діючих навантажень:

$$T_1 = -F_u - (F_v + F_u) \frac{1}{3} + G_u \frac{1}{3\sqrt{6}} - G_v \frac{1}{6\sqrt{2}}, T_2 = (F_v + F_u) - G_u \frac{1}{\sqrt{6}} + G_v \frac{1}{2\sqrt{2}}, T_3 = \frac{-2}{\sqrt{3}} (F_v + F_u) - (G_u + G_v) \frac{1}{\sqrt{6}},$$

$$T_4 = F_v + G_v \frac{1}{2\sqrt{2}}, T_5 = -G_v \frac{3}{2\sqrt{2}}. \tag{5}$$

Практично важливою задачею статки є визначення зусиль і деформацій механізму при дії циркуляційного навантаження у його вершинах. Циркуляційне навантаження визиває синусоїдальні переміщення вершин механізму в залежності від кута ϵ_v дії циркуляційного навантаження (рис. 7, б).

Одержані статичні характеристики є основою для доопрацювання схемного і конструктивного рішення просторової системи приводів.

Шостий етап. Розробляється інноваційна елементна база просторової системи приводів (рис. 2).

Основною проблемою теорії проектування є створення ефективної елементної бази просторових систем приводів. Розроблена елементна база включає комплектні пневмоприводи різноманітного виду, шарніри, які служать для з’єднання приводів у просторові механізми, виконавчі, сервісні та допоміжні пристрої і їх системи керування. Основними складовими елементної бази просторової системи приводів є шарнірні вузли. Запропоновано ряд конструкцій сферичних шарнірів, у тому числі безконтактні прецизійні аеростатичні та гідростатичні шарніри. Розроблено ряд оригінальних технічних рішень для шарнірів підвищеної точності та демпфуючої здатності. Розроблено ряд оригінальних регульованих сферичних шарнірів рідинного тертя. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження гідродинамічних процесів у шарнірах рідинного тертя. Встановлено розподіл гідродинамічних параметрів при течії рідкого середовища в шарнірах. Визначено траєкторії руху частинок рідини в зазорах, розподіл швидкостей та поля статичного тиску. Досліджено особливості вихроутворення, закономірності пристінних течій та течій в критичних областях контрольного об’єму рідини. Зокрема, визначено параметри течії в зазорах при наявності анізотропії властивостей (напрямку виступів і канавок) робочих поверхонь шарнірів, виготовлених із застосуванням комп’ютерно-інтегрованих методів технології машинобудування. Встановлено, що наявність особливостей мікропрофіля робочих поверхонь впливає на характеристики течії рідини. Запропоновано їх теоретичний опис тензорними коефіцієнтами гідравлічного опору.

Розроблені і досліджені різноманітні конструкції магнітних шарнірів із феромагнітною рідиною. На основі розв'язку рівнянь магнітної гідродинаміки визначені особливості робочих процесів у магнітних сферичних шарнірах. Теоретичні результати підтверджені проведеними експериментальними дослідженнями. Визначено вплив індукції магнітного поля на розподіл швидкостей у феромагнітній рідині, що рухається в порожнинах шарнірів.

Основу просторової системи приводів складають комплектні пневмоприводи. Як правило, вони реалізуються з використанням пневмодвигунів поступальної дії, агрегованих із приводами мікропереміщень (рис. 8).

Комплектні приводи мають сферичні гідростатичні або аеростатичні опори 1 і 2 із загальною лінією живлення 3 та дренажом 4. Штоки циліндрів 5 і 6 мають пристроїв 7 для визначення положення штока. Приводи мікропереміщень мають сильфони 8 та вимірювачі ходу сильфона 9. Система керування включає розподільники 10 та 11, які забезпечують як швидкі, так і точні переміщення привода. В разі необхідності привод оснащується вимірювачем зусилля 12.

Просторові системи приводів комплектуються гідро- або пневмоприводами відповідного виду. В якості пневмодвигунів використані пневмоциліндри, шлангові пневмодвигуни (пневмом'язи) та сильфонні пневмоприводи, укомплектовані пружинами зворотнього ходу та демпферними пристроями (рис. 8, в).

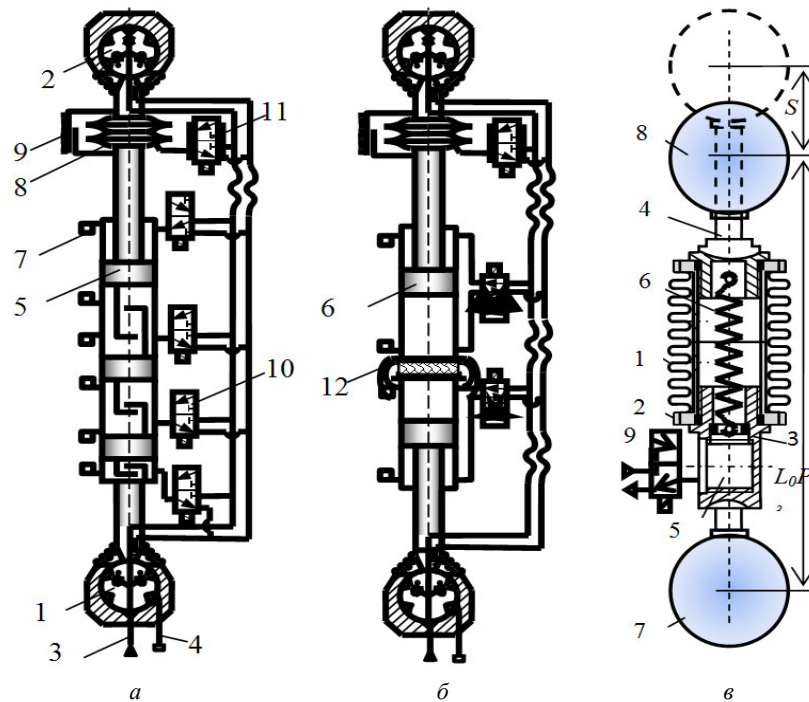


Рис. 8 – Комплектні інноваційні пневмоприводи просторових систем з приводами мікропереміщень та сферичними опорами: а – цифровий привід із додатковими поршнями; б – привід з тандем-циліндрами та вимірювачем зусилля; в – модульний сильфонний привід.

Привід має сильфон 1 із фланцями 2, в які поміщено хвостовики 3, 4; підвід повітря здійснюється через отвір 5. Сильфон стискається пружиною 6. На хвостовиках встановлені сфери 7, 8 шарнірів. Підвід і вихлоп повітря в порожнину сильфона забезпечується розподільником 9.

Для вибору параметрів приводів досліджено робочі процеси течії повітря в проточній частині приводів. Враховані особливості наповнення порожнин пневмоприводів повітрям при докритичних та надкритичних режимах течії повітря в пневмолінії.

Процес наповнення порожнин сильфонів повітрям для надкритичного режиму t_{H1} та підкритичного режиму t_{H2} визначено за формулами:

$$t_{H1} = \frac{V}{0,2588 \cdot k \mu f \sqrt{2gk/(k-1)} \sqrt{RT_m}} (\sigma_2 - \sigma_1), \quad t_{H2} = \frac{2V \left[\sqrt{1 - \sigma_K^{(k-1)/k}} - \sqrt{1 - \sigma_3^{(k-1)/k}} \right]}{\sqrt{2gk(k-1)} \mu f \sqrt{RT_m}}, \quad (6)$$

де V – об'єм сильфона; k – показник адиабати; R – газова стала; T_m – температура повітря; g – прискорення вільного падіння; μ – коефіцієнт витрати пневмолінії; f – ефективна площа перетину пневмолінії; $\sigma_1 = p_1/p_m$, $\sigma_2 = p_2/p_m$, відносні до атмосферного значення тисків в порожнині сильфона на початку та в кінці процесу.

Аналогічні залежності одержані для процесу витікання повітря із порожнини сильфона. Час витікання повітря при надкритичному режимі течії t_{c1} та час витікання повітря для підкритичного режиму t_{c2} визначено залежностями:

$$t_{c1} = \frac{2V \left(\sigma_5^{(k-1)/2k} - \sigma_4^{(k-1)/2k} \right)}{0,2588 \cdot \sqrt{2gk(k-1)\mu f \sigma_a^{(k-1)/2k} \sqrt{RT_M}}},$$

$$t_{c2} = \frac{0,875V}{k \sqrt{\frac{2gk}{k-1}} \cdot \mu f \sigma_a^{(k-1)/2k} \sqrt{RT_M}} \cdot \left[\frac{\sqrt{1 - \sigma^{(k-1)/k}} \cdot (3\sigma^{(k-1)/k} + 2)}{\sigma^{2(k-1)/k}} + 3 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 - \sigma^{(k-1)/k}}}{\sigma^{(k-1)/k}} \right) \right] \Bigg|_{\sigma_6}^{\sigma_{K1}}, \quad (7)$$

де відносні значення тисків: $\sigma_a = P_a / P_m$, $\sigma_4 = P_a / P_4$, $\sigma_5 = P_a / P_5$, $\sigma_{K1} = 0,528$, p_4 , p_5 – значення тиску у в порожнині сільфона на початку і в кінці процесу.

Розрахунки за формулами (6) і (7) при поточних значеннях тиску є основою визначення зусилля сільфонованого привода (рис. 9).

Закон зміни тиску має дві різні ділянки *A* і *B*, які відповідають процесу наповнення сільфона і процесу витікання повітря із порожнини сільфона. Дані ділянки апроксимовані спрощеними залежностями відповідними динамічним аперіодичним ланкам другого та першого порядку. При цьому зміни тиску на ділянках *A* і *B* визначаються залежностями:

$$p_A(t) = p_m \left(1 - \frac{T_{1A}}{T_{1A} - T_{2A}} e^{-t/T_{1A}} + \frac{T_{2A}}{T_{1A} - T_{2A}} e^{-t/T_{2A}} \right), \quad p_B(t) = p_m (1 - e^{-t/T_B}),$$

де p_m – максимальне значення тиску в порожнині сільфона; T_{1A} , T_{2A} , T_B – константи, які визначають вигляд характеристик.

Сьомий етап. Визначаються і корегуються динамічні характеристики просторових систем (рис. 2).

Розроблені системи приводів повинні забезпечувати необхідні показники динамічної якості [8]. Особливістю просторових систем є складні просторові рухи їх елементів. Проведені теоретичні дослідження просторових систем приводів. Для цього розроблені динамічні моделі просторових систем приводів у вигляді зосереджених мас із пружно-деформованими зв'язками (рис. 10).

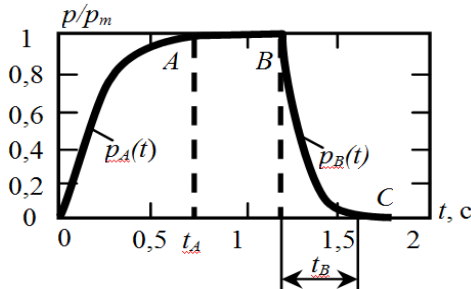


Рис. 9 – Закон зміни тиску в порожнині сільфона при періодичному включенні та виключенні розподільника.

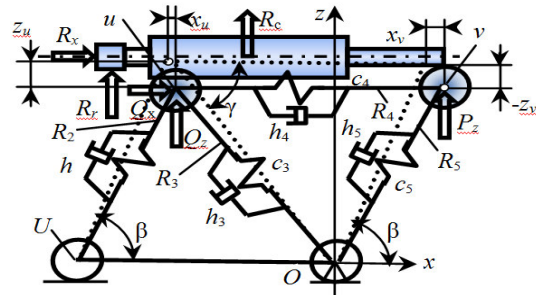


Рис. 10 – Динамічна модель просторової пружно-деформованої системи приводів.

Складено рівняння динамічної рівноваги для кожної зосередженої маси. Наприклад, система рівнянь, яка описує коливання маси m , що розміщена в вершині u :

$$\begin{cases} m\ddot{x}_u = \sum_{i=2}^3 R_i \cos \alpha_i - R_4 + Q_x, & m\ddot{z}_u = \sum_{i=2}^3 R_i \sin \alpha_i + Q_z, \end{cases} \quad (8)$$

де \ddot{x}_u , \ddot{z}_u – прискорення переміщення маси в напрямках x і z ; R_i – динамічні зусилля в приводах; α_i – кути розташування сил Q_x , Q_z – зовнішні динамічні навантаження на масу, розташовану в точці u .

Після підстановки значень зусиль система рівнянь (8) приводиться до операторного вигляду і з неї знаходяться зображення по Лапласу відповідних переміщень:

$$X_u(s) = \frac{K [a_{zz} Q_x(s) - a_{zx} Q_z(s)]}{a_{xx} a_{zz} - a_{zx}^2} + \frac{b_x a_{zz} X_v(s)}{a_{xx} a_{zz} - a_{zx}^2},$$

$$Z_u(s) = \frac{K [a_{xx} Q_z(s) - a_{zx} Q_x(s)]}{a_{xx} a_{zz} - a_{zx}^2} - \frac{b_x a_{zx} X_v(s)}{a_{xx} a_{zz} - a_{zx}^2},$$

де

$$a_{xx} = T^2 s^2 + 2\xi T \frac{89}{72} s + \frac{89}{72}, \quad a_{zx} = 2\xi T s \frac{43}{72} + \frac{43}{72}, \quad b_x = 2\xi T s + 1, \quad a_{zz} = T^2 s^2 + 2\xi T s \frac{59}{36} + \frac{59}{36},$$

s – змінна Лапласа; K , T , ξ – константи, які залежать від параметрів системи; $X_v(s)$ – зображення по Лапласу

су переміщення іншої маси, що знаходиться в точці v .

Аналогічні залежності одержані для інших мас системи приводів.

В результаті визначено операторні залежності переміщень мас від діючих зусиль, зокрема:

$$Z_u = \left[W_{zuQx} - W_{zuxv} W_{xvzu} \frac{W_{xiQx}}{(1+W_{xvxi})} \right] Q_x + \left[W_{zuQz} - W_{zuxv} W_{xvzu} \frac{W_{xiQz}}{(1+W_{xvxi})} \right] Q_z + \\ + W_{zuxv} \left[W_{xvpx} - W_{xvzu} \frac{W_{xupx}}{(1+W_{xvxi})} \right] P_x + W_{zuxv} \left[W_{xvpz} - W_{xvzu} \frac{W_{xupz}}{(1+W_{xvxi})} \right] P_z, \quad (10)$$

де передавальні функції визначено через параметри системи приводів.

По операторним залежностям виду (9, 10) знайдені частотні характеристики системи при різних входах (рис. 11).

Для експериментального підтвердження результатів розрахунків частотних характеристик проведені їх експериментальні виміри. Для цього використана установка у вигляді пружно-деформованої системи приводів, яка навантажувалась гармонічною силовою дією змінної частоти (рис. 12).

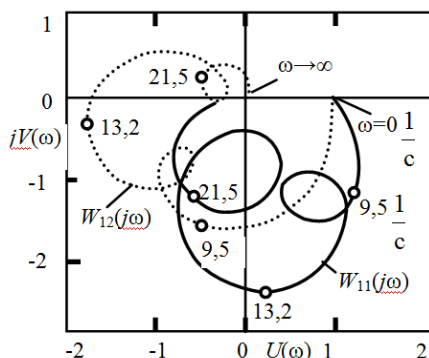


Рис. 11 – Амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики переміщення вершини u в напрямку вісі x при збуреннях в напрямку вісі x (суцільна крива) та при збуреннях в напрямку вісі z (пунктирна крива).



Рис. 12 – Установка 1 для визначення динамічних характеристик просторової системи приводів із пристроєм 2 для синусоїдального навантаження.

Застосовано спеціальний пристрій з дебалансом, який дозволяє дискретно змінювати частоту навантаження в діапазоні до 10 Гц. Пристрій встановлювався на спеціальному підвісі, який через пружну тягу з'єднувався із відповідною точкою механізму. При цьому на механізм діяло гармонічне навантаження різної частоти. Амплітуда навантаження задавалась шляхом регулювання жорсткості тяги. Для вимірів динамічних переміщень вершин механізму застосовані оптичні методи. Для цього у вузлах механізму встановлювались калібровані сфери (рис. 12). При коливаннях механізму сфери зміщувались в просторі. Їх положення фіксувалось на відеограмі з частотою 25 кадрів за секунду. Визначення положення сфери відносно нерухомої основи (лінійки) здійснювалось при покадровому перегляді відеограми. Таким чином встановлено як закон переміщення вузлів механізму, так і максимальну амплітуду переміщення.

По результатам досліджень запропоновані методи компенсації негативних наслідків окремих динамічних процесів і явищ. Для поліпшення динамічних характеристик просторових систем приводів рекомендовано застосування пасивних і активних демпфуючих пристроїв. Розроблені активні демпфери коливань із феромагнітною рідиною та досліджені їх характеристики. Дані пристрої мають сферичні порожнини із феромагнітною рідиною, в які поміщені магнітні сфери. Досліджено робочі процеси течії феромагнітної рідини в порожнині демпфера при переміщеннях корпусу демпфера. Застосування демпферів дозволяє значно поліпшити динамічні характеристики просторових систем приводів.

Восьмий етап. Проводиться математичне моделювання просторових систем приводів та розробляються спеціальні алгоритми інтелектуального блока керування (рис. 2).

Здійснюється математичне моделювання просторового руху виконавчого органу із використанням математичної моделі просторового руху [7]. Модель враховує зміни в часі тензорів інерції окремих елементів системи [10].

Для корекції положення виконавчого органу застосовується інтелектуальний блок системи керування, що реалізує головний зворотній зв'язок по вимірам вектора просторового положення виконавчого органу (рис. 13, а).

До таких алгоритмів віднесено циклограми включення приводів, корекція положення їх основних елементів. Для забезпечення високої точності систем приводів використано механізми мікропереміщень. Запропоновано спеціальний алгоритм мікропереміщень виконавчого органу системи приводів у вигляді просторових фігур Лиссажу (рис. 13, б). При цьому є можливість компенсувати динамічні похибки виконавчого органу.

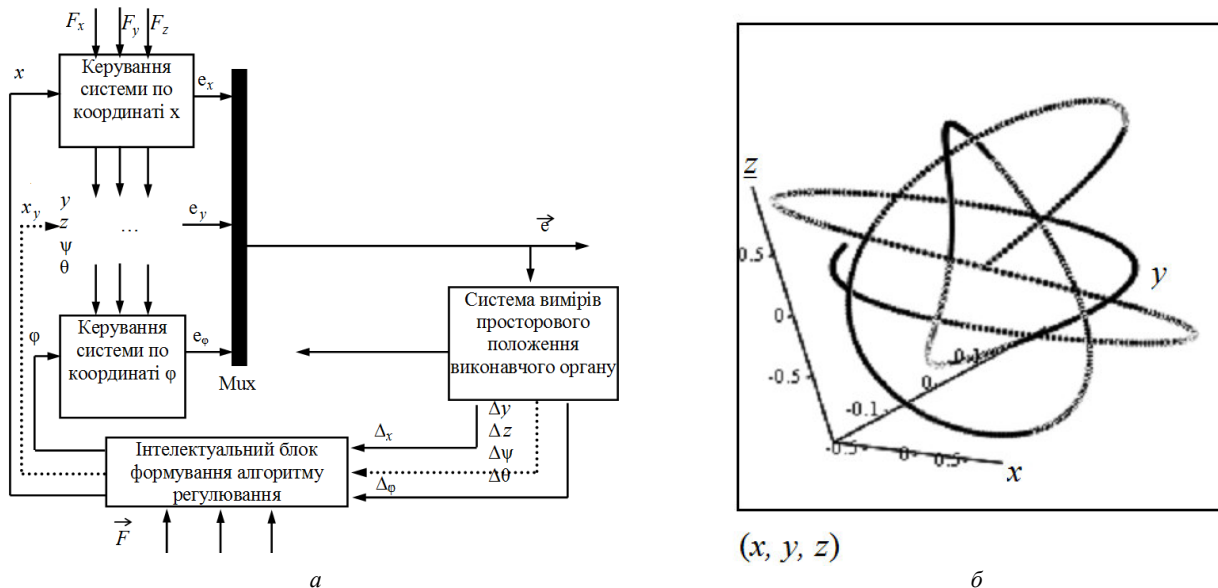


Рис. 13 – Моделування руху виконавчого органу: *а* – блок-схема формування алгоритму роботи інтелектуального блока; *б* – траєкторія руху виконавчого органу системи приводів.

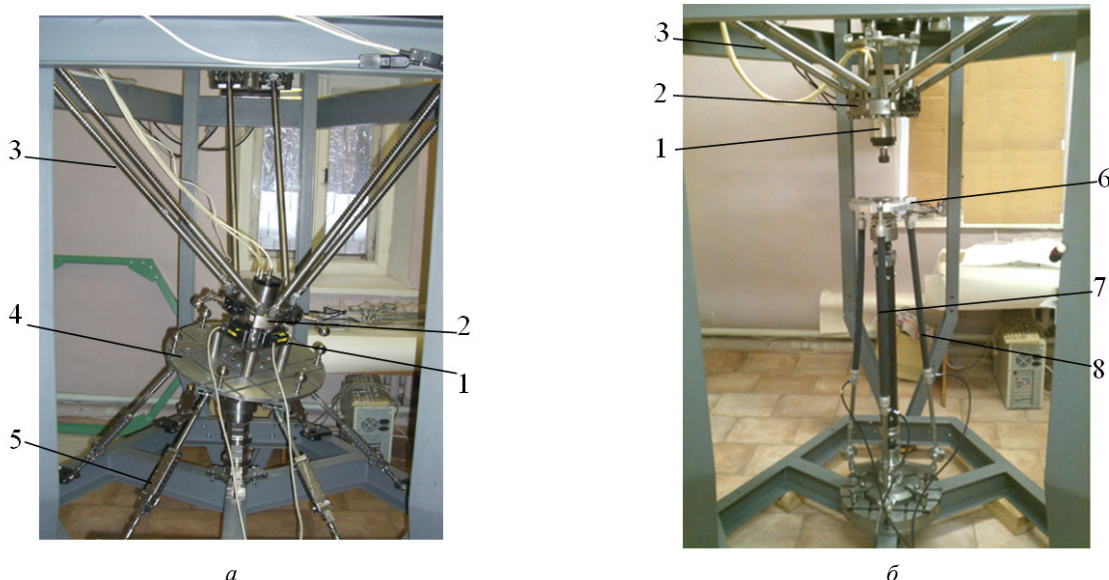


Рис. 14 – Приклад застосування теорії: *а* – просторова система приводів, яка забезпечує установку стола в ряді фіксованих положень; *б* – розроблена інноваційна просторова система приводів сферичного руху із трьома шланговими пневмодвигунами (пневмом’язами).

Дев’ятий етап теорії проектування. Це останній етап, що включає аналіз наявного досвіду проектування і апробації інноваційних систем (рис. 2).

Розроблені положення теорії проектування просторових систем приводів апробовані шляхом розробки і виготовлення ряду дослідних та дослідно-промислових зразків систем приводів, використаних в технологічному обладнанні. Розроблені системи приводів переміщення стола верстата з паралельними кінематичними структурами (рис. 14, *а*).

Верстат має шпиндельний вузол 1, встановлений на рухомій платформі 2, яка переміщується штангами змінної довжини 3.

Стіл 4 має систему приводів 5. Система приводів стола забезпечує додаткове переміщення стола в діапазоні $\pm 22,5^\circ$. Для підвищення точності позиціонування стола розроблена просторова система приводів, яка включає пневмоциліндри дискретної дії і агреговані із приводами мікропереміщень. Більш раціональним є використання спеціально розробленого шестикоординатного привода мікропереміщень для підвищення точності позиціонування стола [7].

Для апробації основних положень теорії проектування розроблено і виготовлено динамічну просторову систему приводів сферичного руху. Система має рухому вібраційну платформу 7 (рис. 14, *б*). Платформа встановлена на центральній штанзі 7 із карданними опорами, розміщеними на кінцях штанги. Платформа переміщується за допомогою трьох шлангових пневмодвигунів (пневмом’язів) 8. Пристрій використано для вібраційної об-

робки заготовок. Він особливо ефективний для виконання операцій полірування поверхні деталі.

Встановлено технологічні особливості виготовлення окремих деталей і вузлів систем. Особливу увагу приділено методам збирання просторових систем приводів, їх налагодці та відпрацюванню з метою доведення до регламентних характеристик.

Проведено дослідження виготовлених систем приводів та визначено їх експлуатаційні характеристики. В результаті дослідної апробації підтверджена ефективність основних положень розробленої теорії проектування просторової системи приводів.

Висновки. Обґрунтовано основні етапи теорії проектування інноваційних мехатронних просторових систем приводів, які включають формулювання технічних умов, синтез схемних рішень, розрахунки геометрії, статички та кінематики системи і розробку на цій основі конструктивного рішення системи, перевірку системи шляхом макетування і уточнення конструкції на основі визначення статичних і динамічних характеристик системи приводів.

Доопрацювання схемного і конструктивного рішення доцільно провести на макетних зразках просторових систем побудованих по блочно-модульному принципу, які дозволяють реалізувати близько 200 варіантів просторових систем приводів. Базовими варіантами рекомендуються просторові системи відповідні правильним багатогранникам, зокрема тетраедру та октаедру.

Для теоретичного дослідження статички, кінематики і динаміки інноваційних мехатронних просторових систем приводів рекомендується використати еквівалентний плоский механізм, що є проекцією просторової системи на площину, близьку до площини симетрії просторової системи приводів. Одержані при цьому аналітичні залежності розповсюджуються на просторову систему із відповідною корекцією результатів розрахунків.

Проектування інноваційних мехатронних просторових систем приводів доцільно провести на основі запропонованої елементної бази, що включає комплектні приводи лінійних переміщень, агреговані із приводами мікропереміщень, сферичні шарніри різних видів, зокрема гідростатичні та аеростатичні, і шарніри з феромагнітною рідиною. Доцільним є використання пружно-деформованих безшарнірних просторових систем приводів в якості просторових приводів мікропереміщень.

Проведена дослідна апробація розроблених дослідних зразків підтвердила обґрунтованість основних положень запропонованої теорії проектування інноваційних мехатронних просторових систем приводів. Рекомендовано імітаційне математичне моделювання системи приводів та спеціальні алгоритми керування просторовим рухом виконавчого органу.

Список літератури: 1. Яглинський В.П. Кінематика обладнання на основі механізмів паралельної структури: Монографія / В.П. Яглинський і др. // Прогресивное машиностроительное оборудование. Коллективная монография. – Орел: Изд. дом Спектр, 2011. – 455 с. 2. Рыбак Л.А., Ержуков В.В., Чичварин А.В. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры. – М.: Физматлит, 2011. – 148 с. ISBN978-5-9221-1296-3. 3. Сянвень Кун, Клемент Госселин. Структурный синтез параллельных механизмов. – М.: Физматлит, 2012. – 275 с. 4. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications. – Berlin: Springer, 2006. – 394 p. 5. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обработка оборудования на основе механизмов параллельной структуры / Под общ. Ред В.Л. Афонина. – М.: Изд-во МГТУ Станкин, Янус-К., 2006. – 452 с. 6. Струтинський В.Б., Кириченко А.М. Теоретичний аналіз жорсткості шестикоординатного механізму паралельної структури // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». – 2009. – № 57. – С. 198 – 207. 7. Струтинський С.В., Гуржій А.А. Просторові системи приводів: Монографія. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с. 8. Новіков М., Струтинський В., Кириченко А. Розробка верстата-гексапода з шести координатною системою ЧПК і результати його дослідницького застосування // Машинознавство. – Львів: ТзОВ «Кінпатрі LTD», 2011. – №5 – 6 (167 – 168). – С. 3 – 10. 9. Струтинський В.Б., Гаврушкевич Н.В., Полунічев В.Е. Математичне моделювання динамічних характеристик багатокординатних верстатів з використанням теорії нечітких множин // Технологічні комплекси, №1 (9) – 2014. – С. 76 – 87. 10. Струтинський В.Б., Колот О.В. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: Монографія. – Краматорськ: ЗАТ «Тираж-51», 2005. – 530 с.

Bibliography (transliterated): 1. Jaglinskij, V. P., et al. *Kinematika oborudovanija na osnove mehanizmov parallel'noj struktury: Monografija*. Orel: Izd.dom Spektr, 2011. Print. 2. Rybak, L. A., et al. *Jeffektivnye metody reshenija zadach kinematiki i dinamiki robota-stanka parallel'noj struktury*. Moscow: Fizmatlit, 2011. Print. 3. Kun, Sjan'ven', and Klement Gosselin. *Strukturnyj sintez parallel'nyh mehanizmov*. Moscow: FIZMATLIT, 2012. Print. 4. Merlet, J. P. *Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications*. Berlin: Springer, 2006. Print. 5. Afonin, V. L., P. V. Podzorov and V. V. Slepcev. *Obrabatyvajushhee oborudovanie na osnove mehanizmov parallel'noj struktury*. Ed. V. L. Afonin. Moscow: Izd-vo MG TU Stankin, Janus-K, 2006. Print. 6. Strutyn'skyj, V. B., and A. M. Kyrychenko. "Teoretychnyj analiz zhorstkosti shestykoordinatnogo mehanizmu paralel'noi' struktury." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu Ukraïny «Kii'vs'kij politehničnij instytut»*. Ser.: «Mashynobuduvannja». No. 57. 2009. 198–207. Print. 7. Strutyn'skyj, S. V., and A. A. Gurzhij. *Prostorovi systemy pryvodiv: Monografija*. Kiev: Pedagogichna dumka, 2013. Print. 8. Novikov, M., V. Strutyn'skyj and A. Kyrychenko. "Rozrobka verstata-geksapoda z shesty koordinatnoju systemoju ChPK i rezul'taty doslidnyč'kogo zastosuvannja." *Mashynoznavstvo*. No. 5–6 (167–168). Lviv: TzOV «Kinpatri LTD», 2011. 3–10. Print. 9. Strutyn'skyj, V. B., N. V. Gavrushkevych and V. E. Polunichev. "Matematyčne modeljuvannja dynamichnyh harakterytyk bagatokoordynatnyh verstativ z vykorystannjam teorii' nechitkyh mnozhyn." *Tehnologični kompleksi*. No. 1 (9). 2014. 76–87. Print. 10. Strutyn'skyj, V. B., and O. V. Kolot. *Matematyčne modeljuvannja stohastyčnyh procesiv u systemah pryvodiv: Monografija*. Kramatorsk: ZAT «Tyrazh-51», 2005. Print.

Надійшло (received) 06.09.2015

Струтинський Сергій Васильович – кандидат технічних наук, старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (099) 486-11-03; e-mail: strutyn'skyi@gmail.com.

Струтинський Сергей Васильевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (099) 486-11-03; e-mail: strutyn'skyi@gmail.com.

Strutynsky Sergej Vasilevich – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecture, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv; tel.: (099) 486-11-03; e-mail: strutyn'skyi@gmail.com.