

УДК 621.9.04

С.В. Струтинський, канд. техн. наук

НТУУ «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

Просторові системи пластично-деформованих мехатронних приводів на основі сплавів із пам'яттю форми

Наведено результати досліджень просторових пластично-деформованих мехатронних систем приводів на основі сплавів із пам'яттю форми. Шляхом макетування підтверджено працездатність приводів на основі сплавів з пам'яттю форми та можливість їх використання в просторових механізмах. Запропоновані конструктивні рішення приводів та їх застосування в складі мехатронних просторових систем приводів. Викладено результати теоретичних досліджень просторових систем, що включають приводи на основі сплавів із пам'яттю форми.

пам'ять форми, привід, мехатронна система, конструкція, механізм-гексапод, геометрія, кінематика

С.В. Струтинский, канд. техн. наук

каф. прикладной гидроаэромеханики и мехатроники НТУУ «КПИ», Киев, Украина

Пространственные системы пластически-деформированных мехатронных приводов на основе сплавов с памятью формы

Приведены результаты исследований пространственных пластически-деформированных мехатронных систем приводов на основе сплавов с памятью формы. Путем макетирования подтверждено работоспособность приводов на основе сплавов с памятью формы и возможность их использования в пространственных механизмах. Предложены конструктивные решения приводов и их применение в составе мехатронных пространственных систем приводов. Изложены результаты теоретических исследований пространственных систем, включающих приводы на основе сплавов с памятью формы.

память формы, привод, мехатронная система, конструкция, механизм-гексапод, геометрия, кинематика

Вступ. Просторові системи приводів є високоефективним і широко функціональним технологічним обладнанням. Тому розробка принципово нових просторових систем приводів є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає у створенні мехатронних систем приводів із особливими властивостями.

Проблема пов'язана із розробкою ефективного технологічного обладнання на основі просторових систем приводів, зокрема, маніпуляторів для роботи в екстремальних умовах.

В літературних джерелах описані різноманітні просторові системи приводів [1]. Розглянуті застосування приводів різного виду в технологічному обладнанні, зокрема в робототехніці [2]. Вказано на перспективність застосування систем приводів, які використовують нові фізичні явища [3]. В окремих публікаціях розглянуто застосування приводів на основі сплавів із пам'яттю форми в машинобудуванні [4]. Викладено результати досліджень сплавів із пам'яттю форми [5, 6]. В ряді робіт розглянуті феромагнітні приводи із сплавів із пам'яттю форми [7, 8].

© С.В. Струтинський, 2015

Результатів розробок просторових систем приводів типу механізма-гексапода на основі сплавів із пам'яттю форми в літературних джерелах не виявлено.

Метою досліджень викладених в даній статті поставлено розробку просторових пластично-деформованих мехатронних систем приводів на основі сплавів із пам'яттю форми. Задачами досліджень поставлено макетування просторових систем приводів на основі сплавів із пам'яттю форми для перевірки їх працездатності, розробка мехатронних просторових систем приводів на основі сплавів із пам'яттю форми та теоретичні дослідження геометрії і кінематики механізмів гексаподів, що мають привід на основі сплаву з пам'яттю форми.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Конструктивна реалізація приводів із пам'яттю форми

Металічні сплави з пам'яттю форми, наприклад нікелід титана, при нагріванні, після попередньої деформації, демонструють явище повернення до початкової форми [5]. Сплави з пам'яттю форми дають можливість реалізувати компактні приводи поступальних переміщень [4]. Привід являє собою стрижень із сплаву, що має пам'ять форми, який може пластично деформуватись зовнішньою силою. У початковому стані в матеріалі стрижня існує певна визначена структура. При деформації (згині) зовнішні шари матеріалу стрижня витягуються, а внутрішні стискаються (середні шари залишаються без змін). Витягнуті шари металу включають мартенситні пластини, орієнтовані відповідним чином. В матеріалах з пам'яттю форми наявний мартенсит має властивості термопружності [6]. При нагріванні починає проявлятися термопружність мартенситних пластин. В них виникає внутрішній напружений стан, який прагне повернути структуру матеріалу в початкове положення – стиснути витягнуті пластини та розтягти стиснені. Оскільки зовнішні витягнуті шари привода стискаються, а внутрішні стиснені розтягуються, матеріал стрижня в цілому проводить автодеформацію в зворотню сторону і привід відновлює свою початкову форму [7].

Пластично деформовані приводи на основі сплавів з пам'яттю форми є принципово новим видом приводів. Тому для перевірки особливостей їх роботи проведено макетування приводів. Типовий базовий макетний варіант привода має вигляд пластично-деформованого стрижня, який змінює відстань між точками свого закріплення (рис. 1).

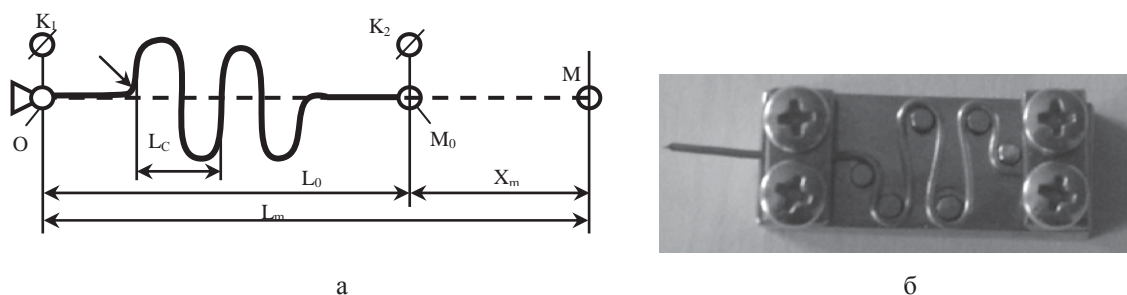


Рисунок 1 – Схема макета привода на основі сплаву із пам'яттю форми (а) та оправка для початкової деформації привода (б)

Початкова пластична деформація привода здійснюється в спеціальній оправці (рис. 1, б). Після деформації стрижень набуває хвилястої форми. В деформованому стані відстань між точками закріплення криволінійного стрижня складає $OM_1 = L_0$. Привід працює при зміні температури стрижня. Нагрівання здійснюється зовнішнім джерелом тепла. При нагріванні стрижень відновлює свою форму і становиться

прямолінійним. Довжина привода після нагрівання складає $OM = L_m$, а приріст довжини x_m залежить від початкової деформації привода.

Розглянутий привід використано в макеті просторової системи приводів побудованої по схемі механізму-гексапода. Просторова система являє собою стрижневу конструкцію типу октаедра W_0, W, U, u, v, w (рис. 2, а).

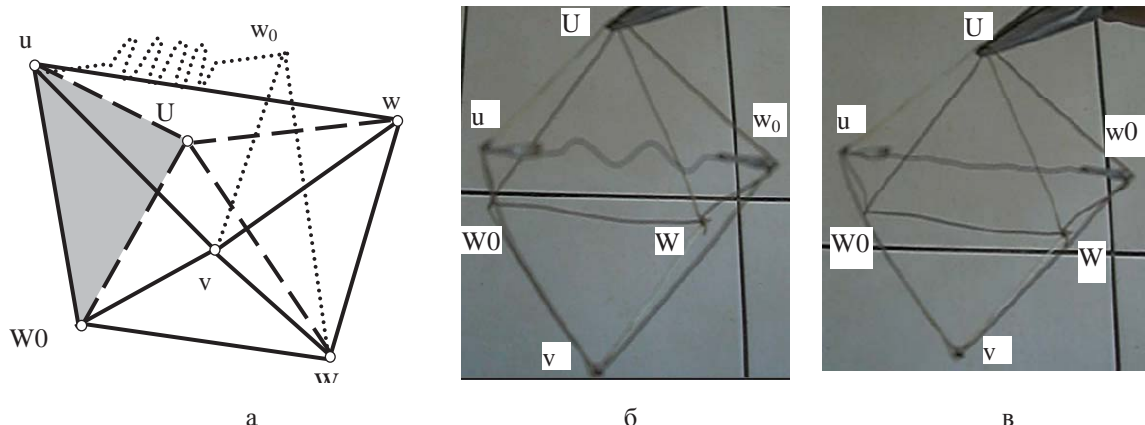
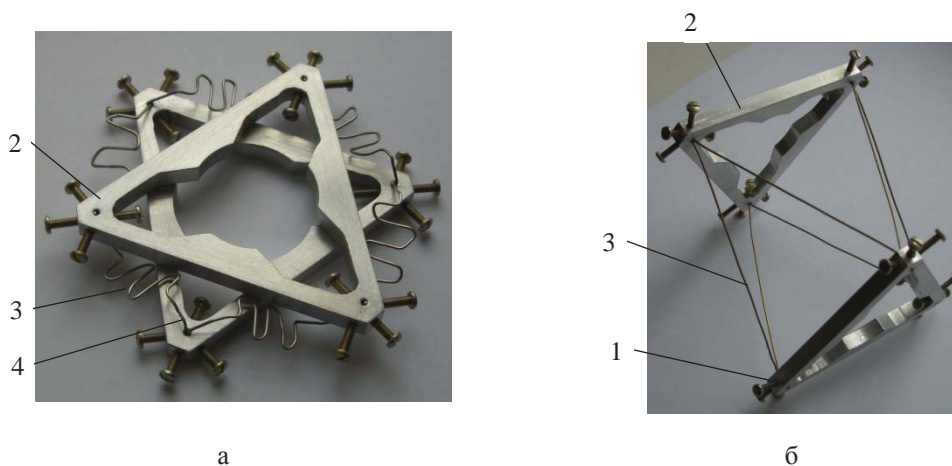


Рисунок 2 – Схема просторової пластично-деформованої системи приводів (а), початкове положення макета системи (б) та система після нагрівання (в)

В системі використано стрижень uw_0 із сплаву із пам'яттю форми. В початковому положенні привід має хвилясту форму (рис. 2, б). При нагріванні привід вирівнюється і конфігурація механізму змінюється (рис. 2, в).

Макетування підтвердило надійну роботу привода. При нагріванні до температури $70...90^{\circ}\text{C}$ привід практично повністю відновлює прямолінійну форму (див. рис. 2, в).

З використанням макетів приводів хвилястої форми (див. рис. 1) розроблено макет механізму гексапода, який має шість приводів виготовлених із сплаву з пам'яттю форми. Механізм має нерухому основу 1 та рухому платформу 2 з'єднану приводами 3 (рис. 3).



а – механізм, в якому всі приводи знаходяться в початковому деформованому стані; б – механізм після нагрівання, в якому всі приводи вирівнялись

Рисунок 3 – Макет механізму-гексапода, який має шість приводів виготовлених із сплаву з пам'яттю форми

При нагріванні всіх шести приводів вони вирівнюються і рухома платформа 2 максимально віддаляється від нерухокої основи 3 (див. рис. 3, б).

При нагріванні одного або кількох приводів платформа встановлюється відповідним чином, займаючи певне положення відносно нерухокої основи (рис. 4).

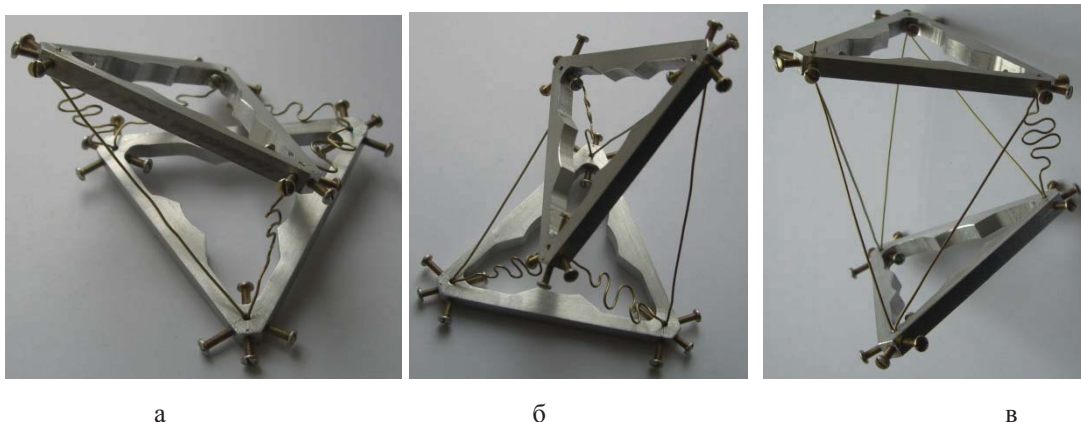


Рисунок 4 – Макет механізма-гексапода, в якому вирівнявся один привод (а), три привода (б) та п'ять приводів (в)

Розроблений механізм із пластично-деформованими приводами забезпечує періодичне переміщення платформи. Нагрівання приводів здійснюється різними методами. В розглянутих макетних зразках нагрівання приводів здійснювалось струменями гарячого повітря.

Більш перспективним є нагрівання приводів пропусканням через привод постійного струму. В літературних джерелах вказано, що пропускання струму приводить до нагрівання і відповідної зміни форми привода [4]. В окремих публікаціях [8] вказано, що процес зміни форми при певних умовах має періодичний характер. Тобто при пропусканні струму привід, що має хвилясту форму вирівнюється збільшуючи свою довжину в певних межах, а при відключенні струму привід скорочується відновлюючи початкову хвилясту форму. Це дає можливість реалізувати ефективні мехатронні системи приводів на основі сплавів з пам'яттю форми.

Для перевірки працездатності систем приводів даного типу розроблено макетні зразки просторових систем приводів із мехатронними системами керування. Система дозволяє змінювати струм і напруження в окремому приводі виготовленому із сплаву із пам'яттю форми і підключеному до системи керування.

Для привода виготовленого із стрижня діаметром 0,5 мм для нагрівання необхідний струм 2-3 А при напрузі 2-2,5 В.

При подачі електричного струму реалізується як безповоротна зміна форми привода, так і періодична зміна форми, яка повторюється при повторному пропусканні електричного струму. Безповоротна зміна форми привода дозволяє в значній мірі (на 50...70%) змінювати довжину привода, а періодичне підведення струму змінює довжину привода на 10...20%, чого також достатньо для реалізації ефективних просторових систем приводів.

Розроблена мехатронна система і проведено макетування приводів із сплаву з пам'яттю форми, побудованих по схемі механізма трипода [9]. Макетний зразок мехатронної просторової системи приводів має нерухому основу 1 трикутної форми виготовлену із ізоляційного матеріалу (рис 5).

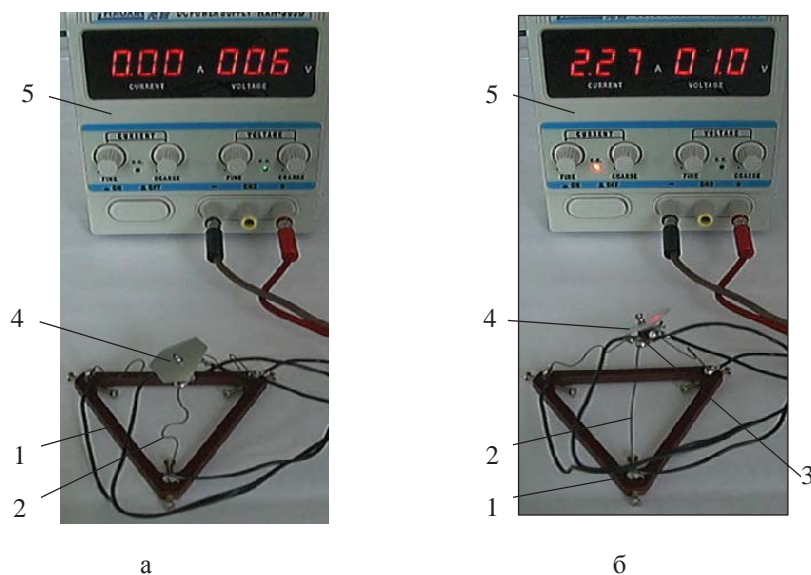
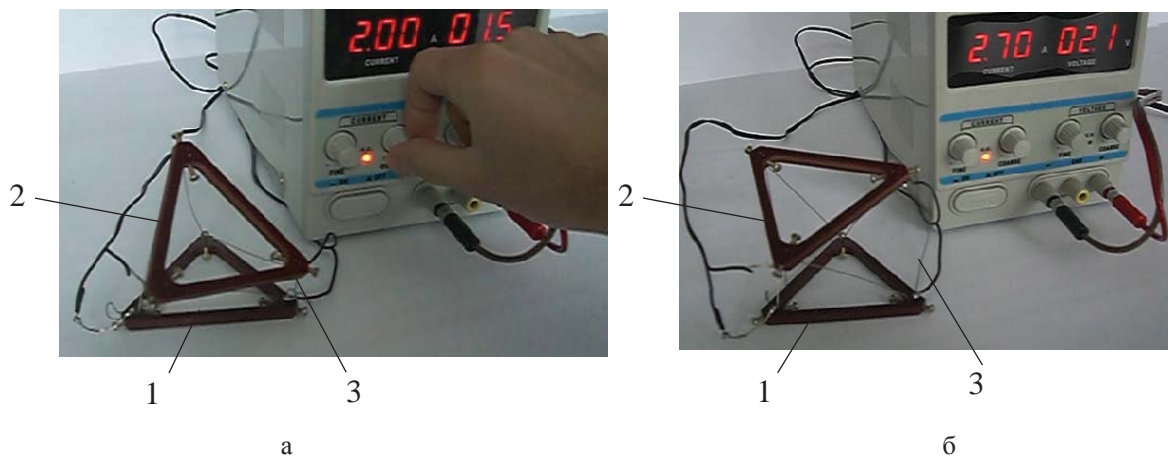


Рисунок 5 – Мехатронна система трьох приводів на основі сплавів із пам'яттю форми, які з'єднані по схемі механізму-трипода: а – приводи у деформованому стані; б – вирівнювання привода 2 при підведенні електричного струму

По краям основи закріплені приводи 2, які мають вигляд стрижнів із сплаву з пам'яттю форми. Початкова пластична деформація стрижнів здійснюється в оправці (див. рис. 1, б). При цьому привод 2 набуває хвилеподібної форми (див. рис. 5, а). Три приводи з'єднуються на сфері 3 на якій закріплена платформа 4. Приводи 2 підключені до регульованого джерела постійного струму 5. Включення струму приводить до зміни форми привода. Макетування системи трьох приводів побудованих по схемі механізму-трипода підтвердило надійність роботи мехатронної системи приводів.

Недоліком системи приводів побудованої по схемі механізму-трипода є низька стабільність поперечно-кутового положення платформи.

Запропонована мехатронна система приводів на основі механізму-гексапода має більш стабільне поперечно-кутове положення платформи. Система приводів має нерухому основу 1 та рухома платформу 2 з'єднану приводами 3 (рис. 6).



а – деформовані приводи; б – вирівнювання приводів

Рисунок 6 – Зміни конфігурації макетного зразка механізму-гексапода при пропусканні постійного струму через приводи з приводами із сплаву із пам'яттю форми

Підведення струму до приводів в широких межах змінює положення рухомої платформи. При розмірах платформи 90 мм, її переміщення сягає 40...60 мм при змінах кутового положення на 20...60°.

Проведене макетування підтвердило ефективність роботи пластично-деформованих систем приводів виготовлених із сплаву з пам'яттю форми.

Також встановлено, що пластично-деформований привід на основі сплаву із пам'яттю форми має ряд недоліків. Один із них - це не зовсім повне відновлення форми привода при нагріванні. Другим недоліком є зниження робочого зусилля привода при його видовженні внаслідок втрати стійкості стрижня привода. Ці недоліки враховані в розробленому приводі застосуванням додаткового обмежувача у вигляді струни або стрижня. Привід із обмежувачем (рис. 7) має деформовану пластину із сплаву із пам'яттю форми 1.

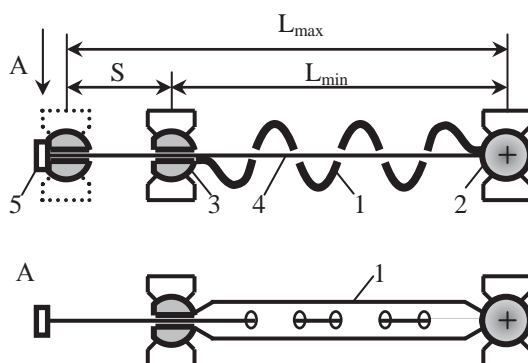


Рисунок 7 – Конструктивна схема привода на основі сплаву із пам'яттю форми, який має обмежувач ходу у вигляді струни

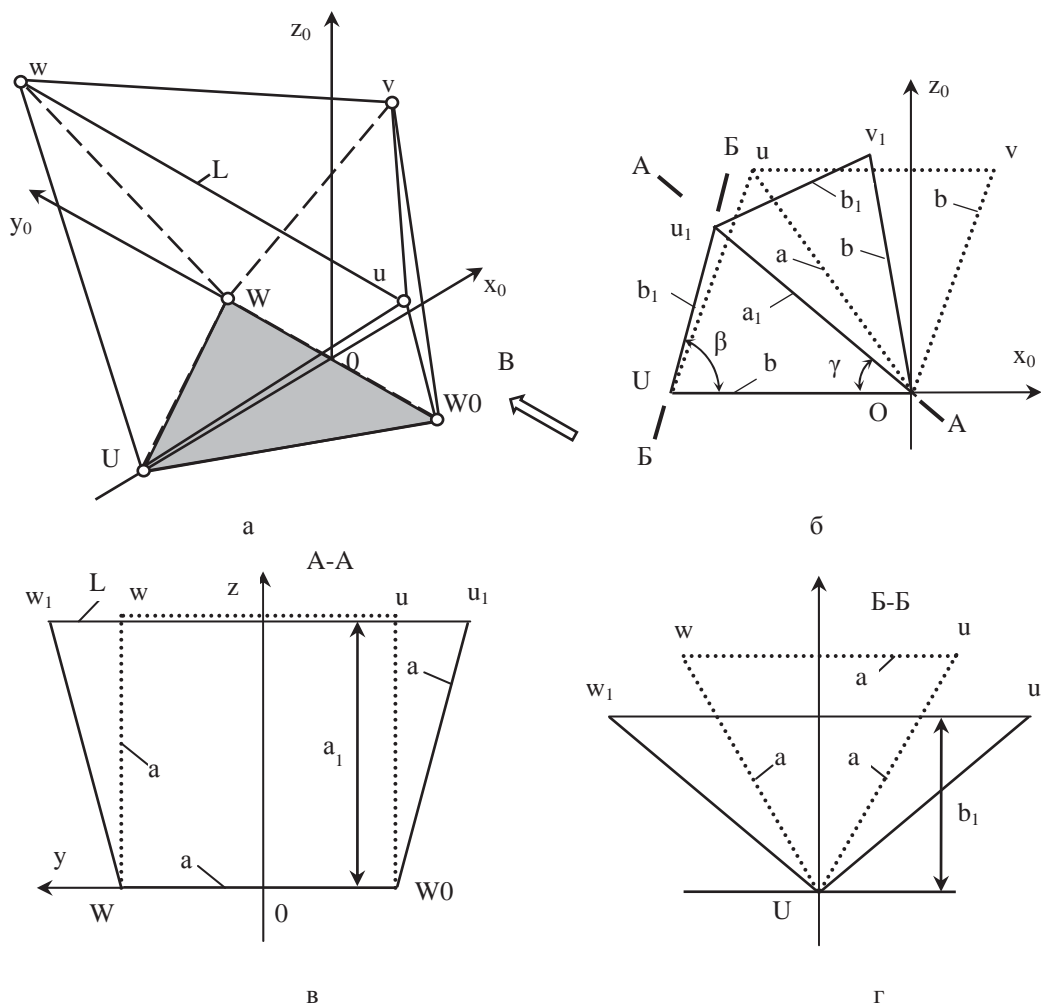
Кінці пластини 1 жорстко зв'язані із опорами у вигляді сфер 2 і 3. Обмежувач у вигляді струни 4 проходить через отвір у сфері 3 та через ряд отворів у пластині 1. Мінімальна довжина привода L_{min} має місце при деформації пластини 1, яка набуває хвилеподібної форми. При нагріванні пластини 1 вона видовжується і випрямляється. Відповідно відстань між сферами 2 і 3 збільшується, досягаючи максимума величини L_{max} . На кінці струни встановлено упор 5, який опирається на сферу 3 при максимальному ході привода. Зусилля, яке розвивається пластиною сприймається струною 4 і вона натягується. При цьому встановлюється точна довжина привода L_{max} . Натягнута струна, яка розміщена в отворах пластини підвищує її стійкість, створюючи стабілізуючі бокові зусилля на пластину в кінці ходу.

Таким чином шляхом макетування підтверджена можливість реалізації просторових систем пластично-деформованих мехатронних приводів на основі сплавів із пам'яттю форми. Приводи відрізняються значним ходом. Тому просторовий механізм суттєво змінює свою конфігурацію. Для розрахунку геометрії і кінематики просторових систем із значною зміною довжини приводів проведені спеціальні теоретичні дослідження.

Теоретичні дослідження геометрії і кінематики механізму-гексапода, який має привід із сплаву із пам'яттю форми

Привід із сплаву із пам'яттю форми в процесі роботи суттєво змінює свою довжину. Тому механізм з таким приводом в широких межах змінює свою конфігурацію та розміри. Застосування відомих методів [9] розрахунку геометрії і кінематики просторових механізмів для даного привода неможливе по причині суттєвої нелінійності задачі. Тому проведені дослідження окремих важливих випадків, зокрема

наявності лише одного привода змінної довжини в механізмі-гексаподі. Розглянуто шарнірний механізм-гексапод, в якому привод $wu=L=var$ змінює свою довжину (рис. 8).



а – ізометричне зображення механізму; б – еквівалентний плоский механізм відповідний проекції механізму по стрілці В; в – перетин механізму площиною W, W0, u, w; г – перетин механізму прощиною U, w, u

Рисунок 7 - Зміна конфігурації шарнірного механізму-гексапода при зміні довжини одного привода $L = uw$

Для встановлення геометричних співвідношень розглянемо проекцію механізму на площину x_0oz_0 (вид по стрілці В). Проекція на площину привода uw при зміні його довжини буде мати вигляд точки u . Аналогічно і проекція привода $W0, W$ буде точкою, що співпадає із початком координат. Проекція відповідає плоскому механізму.

Просторовий механізм, який спроектовано на площину, є симетричним відносно цієї координатної площини x_0oz_0 . Даний плоский механізм має дві ланки постійної довжини $Ov_1 = OU = b = \sqrt{3}a/2$.

Останні три ланки механізму Ou_1, Uu_1 та v_1u_1 змінюють свою довжину. При цьому $Uu_1 = v_1u_1 = b_1$.

При видовженні привода uw він займе положення $L = u_1w_1$ і розташується симетрично відносно вісі z . Визначено проекцію приводів Uu_1 та Uw_1 на площину xoz . Із рис. 7 г випливає:

$$b_1 = \sqrt{a^2 - L^2 / 4} = a\sqrt{1 - \lambda^2 / 4}, \quad (1)$$

де λ - відносна довжина привода $\lambda = L / a$.

При значенні:

$$\lambda = 1, \quad b_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} a = b, \quad (2)$$

Вершини механізму $W_0 W W_1 u_1$ утворюють трапецію. Висота даної трапеції:

$$a_1 = \sqrt{a^2 - (L - a)^2 / 4}.$$

У відносних величинах одержимо:

$$a_1 = \frac{a}{2} \sqrt{3 + 2\lambda - \lambda^2}. \quad (3)$$

При $\lambda = 1$ одержимо $a_1 = a$. Залежності (1)-(3) справедливі, як для $\lambda > 1$, так і для $\lambda \leq 1$.

Визначимо геометричні співвідношення в проекції механізму (див. рис. 7 б). По відомим сторонам механізму знаходяться кути між ланками. Із теореми косинусів для трикутника $O U u_1$ знаходимо:

$$\cos \beta = \frac{b_1^2 + b^2 - a_1^2}{2bb_1}, \quad \cos \gamma = \frac{a_1^2 + b^2 - b_1^2}{2a_1b}.$$

Підставивши значення геометричних розмірів згідно (1)-(3) одержимо:

$$\cos \beta = \frac{(1 - \lambda / 2)}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 / 4}}, \quad \cos \gamma = \frac{1 + \lambda}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3 + 2\lambda - \lambda^2}}. \quad (4)$$

$$\text{При } \lambda = 1, \quad \cos \beta = \frac{1}{3}, \quad \cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

На основі знайдених залежностей обчислюються координати вершин механізму.

$$x_u = -a_1 \cos \gamma, \quad z_u = a_1 \sin \gamma = a_1 \sqrt{1 - \cos^2 \gamma}, \quad y_u = a\lambda.$$

Після підстановки значення величин із формул (3)-(4) знаходяться вектори координат точок u і w :

$$u = a \cdot \begin{bmatrix} -\frac{(1+\lambda)}{2\sqrt{3}} \\ -\lambda/2 \\ \frac{\sqrt{2+\lambda-\lambda^2}}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} -\frac{(1+\lambda)}{2\sqrt{3}} \\ \lambda/2 \\ \frac{\sqrt{2+\lambda-\lambda^2}}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Висота вершин u та w (координата z) має максимум при $\lambda = 0,544$, який складає $z_{u_{\max}} = 0,8657a$. В номінальному положенні механізму ($\lambda = 1$) його висота складає $z_{u_0} = 0,816a$.

Координати точок W_0 , W та U залишаються постійними і складають:

$$W_0 = a \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad W = a \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad U = a \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Координати точки v_1 змінюються і визначаються через геометричні параметри механізму:

$$x_v = -b \cdot \cos 2\gamma, \quad y_{v1} = 0, \quad z_v = b \cdot \sin 2\gamma.$$

Після тригонометричних перетворень одержимо:

$$x_v = -a \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (2 \cos^2 \gamma - 1), \quad y_{v1} = 0, \quad z_v = a \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \gamma}.$$

Після підстановки значення косинуса згідно (4) одержимо вектор координат точки v_1 :

$$v = a \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}(-5\lambda^2 + 2\lambda + 7)}{6(3 + 2\lambda - \lambda^2)} \\ 0 \\ \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{9 - \left(\frac{5\lambda^2 - 2\lambda - 7}{\lambda^2 + 2\lambda + 3}\right)^2} \end{bmatrix}, \quad \text{при } \lambda = 1 \quad v = a \begin{bmatrix} \frac{1}{2\sqrt{3}} \\ 0 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Практично важливим є визначення змін конфігурації механізму при зміні довжини привода, що з'єднує платформу (Wwv) і основу (W_0Uu) механізму (рис. 8)/

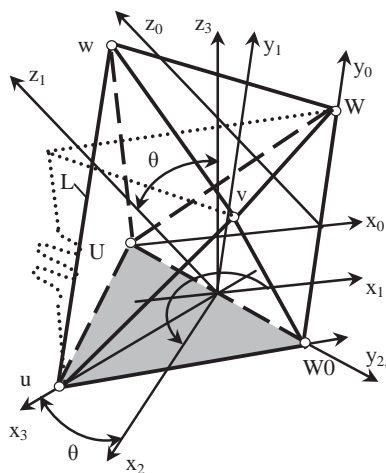


Рисунок 8 - Механізм-гексапод в якому змінюється довжина привода uw , що з'єднує основу W_0Uu і Wwv механізму

Зміни конфігурації механізму визначено на основі попередніх розрахунків шляхом переносу і повороту систем координат.

Розрахунки виконано в системі координат $x_0y_0z_0$. В даній системі координат знайдено вектор функції переміщень всіх шести вершин у функції зміни довжини привода $uw = L = a\lambda$. Координати вершин визначено формулами (5)-(7) в системі координат $x_0y_0z_0$. Позначимо вектори, що визначають положення вершин механізму в системі координат $x_0y_0z_0$, як $u_0(\lambda), W_0(\lambda), U_0(\lambda), W_0(\lambda), W_0(\lambda), U_0(\lambda)$.

Для переходу від системи координат $x_0y_0z_0$ до системи координат x_3, y_3, z_3 треба здійснити ряд перетворень систем координат у вигляді плоско паралельного переносу та обертання [10].

Перше перетворення полягає в паралельному переносі системи $x_0y_0z_0$ з центром в точці O в положення $x_1y_1z_1$ з центром в точці O_N . При цьому координати вершин будуть визначені у вигляді:

$$u_1(\lambda) = u_0(\lambda) + CN, \quad w_1(\lambda) = w_0(\lambda) + CN, \quad v_1(\lambda) = v_0(\lambda) + CN,$$

$$U_1(\lambda) = U_0(\lambda) + CN, \quad W_1(\lambda) = W_0(\lambda) + CN, \quad WO_1(\lambda) = WO_0(\lambda) + CN.$$

де вектор $CN = a \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} \\ 0 \end{pmatrix}$ визначає положення нового центра системи координат.

Друге перетворення системи координат полягає в повороті системи $x_1y_1z_1$ навколо вісі z_1 на кут $\varphi = \frac{2}{3}\pi$. З переходом в систему $x_2y_2z_2$ перетворення визначається матрицею повороту:

$$M_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Відповідно координати вершин механізму в системі координат $x_2y_2z_2$ буде визначено залежностями:

$$u_2(\lambda) = M_z\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot u_1(\lambda), \quad w_2(\lambda) = M_z\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot w_1(\lambda), \quad v_2(\lambda) = M_z\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot v_1(\lambda),$$

$$U_2(\lambda) = M_z\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot U_1(\lambda), \quad WO_2(\lambda) = M_z\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot WO_1(\lambda), \quad W_2(\lambda) = M_z\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot W_1(\lambda).$$

Третє перетворення системи координат полягає в повороті системи $x_2y_2z_2$ навколо вісі y_2 на кут θ , який дорівнює куту між площинами граней утворених вершинами WO, U, u та основою механізму на якій розміщено вершини WO, W, U .

Матриця даного повороту визначена у вигляді:

$$M_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для визначення кута θ знайдено кут між площиною основи WO, W, U та площиною грані WO, U, u . Рівняння даних площин знайдено у вигляді [10]:

$$A_0x_0 + B_0y_0 + C_0z_0 + D_0 = 0,$$

$$A_1x_0 + B_1y_0 + C_1z_0 + D_1 = 0. \quad (11)$$

де коефіцієнти рівнянь визначено через координати вершин механізму:

$$A_0 = \det \begin{vmatrix} y_{WO} & z_{WO} & 1 \\ y_W & z_W & 1 \\ y_U & z_U & 1 \end{vmatrix}, \quad B_0 = \det \begin{vmatrix} z_{WO} & x_{WO} & 1 \\ z_W & x_W & 1 \\ z_U & x_U & 1 \end{vmatrix},$$

$$C_0 = \det \begin{vmatrix} x_{WO} & y_{WO} & 1 \\ x_W & y_W & 1 \\ x_U & y_U & 1 \end{vmatrix}, \quad D_0 = \det \begin{vmatrix} x_{WO} & y_{WO} & z_{WO} \\ x_W & y_W & z_W \\ x_U & y_U & z_U \end{vmatrix},$$

$$A_1 = \det \begin{vmatrix} y_{wO} & z_{wO} & 1 \\ y_u & z_u & 1 \\ y_U & z_U & 1 \end{vmatrix}, \quad B_1 = \det \begin{vmatrix} z_{wO} & x_{wO} & 1 \\ z_u & x_u & 1 \\ z_U & x_U & 1 \end{vmatrix},$$

$$C_1 = \det \begin{vmatrix} x_{wO} & y_{wO} & 1 \\ x_u & y_u & 1 \\ x_U & y_U & 1 \end{vmatrix}, \quad D_1 = \det \begin{vmatrix} x_{wO} & y_{wO} & z_{wO} \\ x_u & y_u & z_u \\ x_U & y_U & z_U \end{vmatrix}, \quad (12)$$

Кут між площинами визначиться залежністю:

$$\theta = \arccos \frac{A_0 A_1 + B_0 B_1 + C_0 C_1}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2 + C_0^2} \cdot \sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}. \quad (13)$$

Кут між площинами залежить від довжин приводи uw . Розрахункова залежність має ділянку близьку до лінійної при $\lambda < 1,6$.

На основі визначених залежностей (10) та (13) знаходиться матриця повороту системи координат, а відповідно координати вершин механізму в повернутій системі координат $x_3 z_3$.

В повернутій системі координат вершини u, wO і U знаходяться в площині $z=0$. Проведені обчислення це підтверджують:

$$u_3(\lambda) = M_y(\theta_1(\lambda)) \cdot u_2(\lambda), \quad wO_3(\lambda) = M_y(\theta_1), \quad U_3(\lambda) = M_y(\theta_1(\lambda)) \cdot U_2(\lambda),$$

$$u_3(\lambda) = \begin{pmatrix} 0,866 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad wO_3(\lambda) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad U_3(\lambda) = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,5 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вершини v, w і W змінюють своє положення в просторі. Розрахунок векторів-координат положення вершин здійснено наступними залежностями:

$$W_3(\lambda) = M_y(\theta_1(\lambda)) \cdot W_2(\lambda), \quad v_3(\lambda) = M_y(\theta_1(\lambda)) \cdot v_2(\lambda), \quad w_3(\lambda) = M_y(\theta_1(\lambda)) \cdot w_2(\lambda).$$

В результаті визначено зміни координат вершин механізму при зміні довжини приводу (рис. 9).

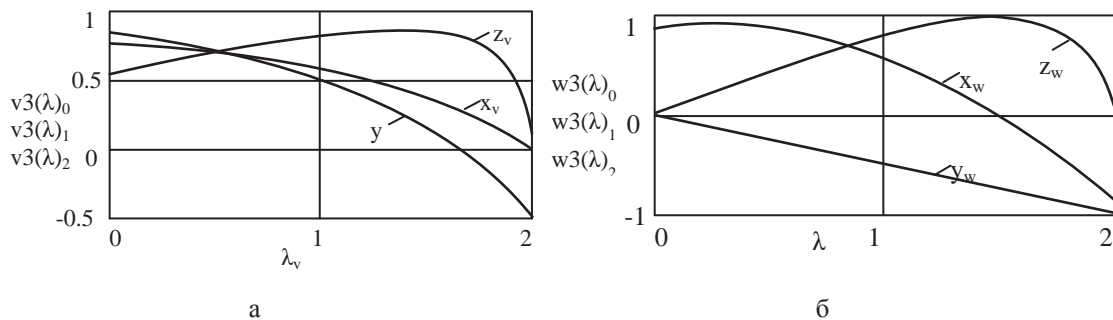


Рисунок 9 – Зміни координат вершин v (а) та w (б) в при зміні довжини приводу uw

Координата z вершини v має максимальне значення при довжині приводу uw $\lambda = 1,5$.

Одержані залежності є основою для повного аналітичного опису геометрії і кінематики просторової системи приводів типу механізму-гексапода при будь-яких змінах довжини одного із приводів.

Висновки.

1. Обґрунтовано, що із сплавів із пам'яттю форми можуть бути створені мехатронні просторові системи приводів відповідні схемі механізму-гексапода. При

нагріванні привода зовнішніми джерелами тепла або електричним струмом привід змінює свою довжину змінюючи конфігурацію механізму.

2. Для підвищення точності позиціонування привода в ньому рекомендується встановити обмежувач ходу у вигляді стрижня або струни. При цьому забезпечується висока точність позиціонування привода при одночасному підвищенні стійкості привода при навантаженнях. Обмежувач ходу при забезпеченні необхідним сервоприводом може бути використаний для початкової деформації привода на основі сплава з пам'яттю форми.

3. Розрахунок геометрії механізму-гексапода, який має один привід із сплаву із пам'яттю форми проводиться на основі запропонованих геометричних співвідношень. Місце розташування привода не є суттєвим, а розрахунок геометрії і кінематики системи здійснюється відповідним переносом та поворотом введених систем координат.

4. Як напрямок подальших досліджень рекомендується дати прикладні застосування розроблених просторових систем приводів та розглянути можливість роботи систем у екстремальних умовах.

Список літератури

1. Сяньвень Кун, Клемент Госселин. Структурный синтез параллельных механизмов. – М.: Физматлит, 2012. – 275 с.
2. Черкашенко, М.В. Синтез минимальных схем гидропневмоагрегатов.– М.: Пневмогидромашины, 2013. – 265 с.
3. Новіков М. Розроблення верстата-гексапода з шестикоординатною системою ЧПК і результати його дослідницького застосування / М. Новіков, В. Струтинський, А. Кириченко // *Машинознавство*. – Львів: ТзОВ «КІНПАТРИ ЛТД», 2011. – №5-6 (167-168). – С. 3-10.
4. Тихонов А.С., Герасимов А.П. Прохорова И.И. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. – М.: Машиностроение, 1984. – 81 с.
5. Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. Сплавы с эффектом памяти формы: Пер. с яп. / Под ред. Х.Фунакубо. М.: Металлургия, 1990. – 224 с.
6. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987.
7. Бучельников В.Д., Васильев А.Н., Коледов В.В., Таскаев С.В., Ховайло В.В., Шавров В.Г. Магнитные сплавы с памятью формы: фазовые переходы и функциональные свойства // *Успехи физических наук*, 2006, Т. 176. – №8. – С. 900-906.
8. Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Такаги Т., Ховайло В.В., Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы // *Успехи физических наук*, 2003, Т. 173. – №6. – С. 577-608.
9. Струтинський С.В. Просторові системи приводів: Монографія / ав. Струтинський С.В., Гуржій А.А. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

Sergiy Strutynskyi

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Spatial systems plastically deformed mechatronic drives based on shape memory alloys

The purpose of research is the development of spatial plastically deformed mechatronic drive systems on the base of alloys with shape memory.

The spatial drive systems based on shape memory alloys are designed. The developed mechatronic systems prototyping was done and their efficiency was proved. The solutions of drives based on the shape memory alloys were proposed. The theoretical study of geometry and kinematics of mechanism-hexapod which includes the actuators based on alloys with shape memory.

The conclusions about the possibility of implementing the spatial mechatronic drive systems based on shape memory alloys were made.

shape memory, drive mechatronic system design, mechanism-hexapod, geometry, kinematics

Одержано 10.03.15