

УДК 621.9.04

**ПРОСТОРОВІ СИСТЕМИ ПРИВОДІВ У ВИГЛЯДІ РУХОМИХ ТРІАНГУЛЯРНИХ СТРУКТУР****С. В. Струтинський**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: strutynskyi@gmail.com

Обґрунтована актуальність розробки та дослідження просторової системи приводів у вигляді рухомих структур складених із трикутників. Показано, що структури такого виду при їх розміщенні на криволінійній поверхні розбивають її на трикутні елементи, тобто здійснюють її триангуляцію. Встановлено аналітичні залежності, які пов'язують параметри структури із параметрами ділянок поверхні, на які її розділяє структура. Визначено основні параметри триангуляції для окремого випадку поверхні у вигляді сфери. Наведено розроблені схемні рішення триангулярних структур, зокрема, лінійні ланцюгові, поверхневі структури та кільцеві структури. Обґрунтовано призначення структур для маніпулювання об'єктами в обмежених об'ємах. Описані конструктивні особливості елементної бази розробленої просторової системи приводів. Зокрема наведена конструкція сферичного шарніра із феромагнітною рідиною та магнітною сферою, з якою контактують сферичні поверхні хвостовиків закріплених на корпусах і штоках циліндрів приводів. Описана мехатронна система переміщення триангулярних структур. Для вільного переміщення структури запропоновані аеростатичні опори спеціального виду. Описано механізм поступального та поворотного переміщення структури. Розроблено і перевірено дослідні зразки поверхневих триангулярних структур, які мають три, п'ять, сім і дев'ять приводів. Виготовлено і апробовано кільцеву просторову структуру, яка включає 12 приводів.

**Ключові слова:** приводи, структури, шарніри, переміщення, апробація.

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ В ВИДЕ ПОДВИЖНЫХ ТРИАНГУЛЯРНЫХ СТРУКТУР****С. В. Струтинский**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: strutynskyi@gmail.com

Обоснована актуальність розробки та дослідження просторової системи приводів в формі рухомих структур складених із трикутників. Показано, що структури такого виду при їх розміщенні на криволінійній поверхні розбивають її на трикутні елементи, т.е. здійснюють її триангуляцію. Встановлено аналітичні залежності, що зв'язують параметри структури з параметрами ділянок поверхні, на які її розбиває структура. Визначено основні параметри триангуляції для окремого випадку поверхні в формі сфери. Наведено розроблені схемні рішення триангулярних структур. Обґрунтовано призначення структур для маніпулювання об'єктами в обмежених об'ємах. Описані конструктивні особливості елементної бази розробленої просторової системи приводів. В частині, наведена конструкція сферичного шарніра з феромагнітною рідиною та магнітною сферою, з якою контактують сферичні поверхні хвостовиків, закріплених на корпусах і штоках циліндрів приводів. Описана мехатронна система переміщення триангулярних структур. Для вільного переміщення структури запропоновані аеростатичні опори спеціального виду. Описано механізм поступального та поворотного переміщення структури. Розроблено і перевірено дослідні зразки поверхневих триангулярних структур, які мають три, п'ять, сім і дев'ять приводів. Виготовлено і апробовано кільцеву просторову структуру, яка включає 12 приводів.

**Ключевые слова:** приводы, структуры, шарниры, перемещения, апробация.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Розробка ефективних систем маніпулювання об'єктами дає можливість суттєвим чином підвищити ефективність технологічного обладнання.

Проблема в загальному вигляді полягає у створенні принципово нових ефективних систем маніпулювання об'єктами машинобудування. Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями розробки просторових систем приводів. Просторові приводи є основою перспективних конструкцій маніпуляторів, промислових роботів та іншого технологічного обладнання, що забезпечують задачі маніпулювання об'єктами.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведена значна кількість розробок просторових систем приводів [1]. Запропоновані схемні і конструктивні рішення [2] систем маніпулювання об'єктами машинобудування. Як правило, вони базуються на використанні одного або кількох просторових механізмів з паралельними кінематичними зв'язками.

У низці публікацій [3] і патентів [4] наведені розробки систем, які мають число ступенів вільності більше шести. Вони дозволяють забезпечити необхідну точність системи. Недоліком розглянутих конструкцій є недостатня гнучкість регулювання системи обумовлена специфікою роботи механізмів, які складають основу просторової системи приводів.

В окремих джерелах [5] наведені багатокординатні системи приводів, які використовуються в технологічних системах металообробки. В результаті патентно-інформаційних досліджень зроблено висновок про відсутність розробок і результатів досліджень просторових систем приводів у вигляді рухомих триангулярних структур.

До невирішених раніше частин загальної проблеми належить розробка ефективних конструкцій просторових систем приводів у вигляді рухомих триангулярних структур, дослідження їх характеристик і застосування розроблених конструкцій в прогресивному технологічному обладнанні.

Метою роботи є створення принципово нових пристроїв маніпулювання у вигляді рухомих триангулярних структур.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Задачі досліджень.** Розробка раціональних конструкцій просторових систем приводів у вигляді рухомих триангулярних структур, обґрунтування створення елементної бази для їх реалізації та апробація запропонованих технічних рішень.

*Теоретичні основи побудови триангулярних структур.* Операція триангуляції [7] забезпечує розбиття деякої криволінійної поверхні на трикутники, в загальному випадку криволінійні. Якщо у вершинах трикутника встановлені опори приводів, а сторони трикутника утворені відповідними приводами, то одержана система приводів буде поверхневою триангулярною структурою. Вона буде взаємодіяти з поверхнею у вершинах трикутників. Найбільш простою є елементарна триангулярна структура, яка має вигляд трикутника (рис. 1).

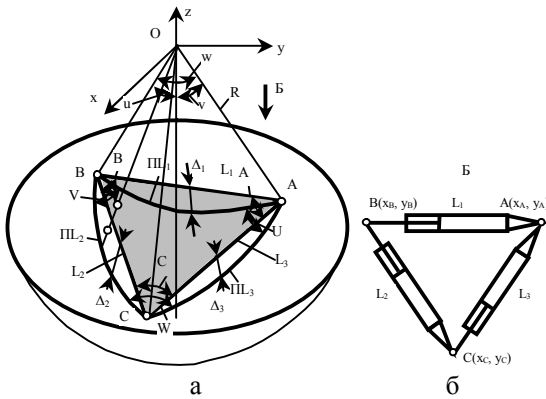


Рисунок 1 – Схема просторового розташування елементарної триангулярної структури на криволінійній поверхні (а) та вигляд структури зверху (б)

Дана структура має три пневматичні приводи з'єднані шарнірами А, В, С. Довжина приводів  $L_1, L_2, L_3$  змінюється в процесі переміщення структури по поверхні. Шарніри А, В, С періодично фіксуються на поверхні за допомогою спеціальних пристосувань, наприклад, магнітними фіксаторами.

З метою спрощення аналізу прийнято, що структура знаходиться на поверхні постійної кривизни, що відповідає сфері радіусом  $R$ . При цьому для визначення основних геометричних співвідношень використані формули сферичної тригонометрії [8]. Введемо систему координат  $x, y, z$ , цент  $P$  якої співпадає із центром сфери. В даній системі координат рівняння поверхні має вигляд:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2. \quad (1)$$

Прийнято, що шарніри системи приводів А, В і С знаходяться безпосередньо на сфері і мають незначні розміри. Для визначення положення структури на поверхні достатньо задати її характерні розміри та три параметри. Характерними розмірами структури прийнята відстань між шарнірами (довжина приводів)  $L_1, L_2, L_3$ . В якості параметрів прийняті дві де-

картові координати шарніра А ( $x_A, y_A$ ) та одна координата шарніра В ( $x_B$ ).

Останні координати шарнірів знайдені шляхом обчислень. Координата  $z_A$  знаходиться із рівняння сфери (1):

$$z_A = \sqrt{R^2 - x_A^2 - y_A^2}. \quad (2)$$

Для знаходження невідомих координат шарніра В ( $y_B, z_B$ ) маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} x_B^2 + y_B^2 + z_B^2 = R^2, \\ (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 = L_1^2. \end{cases} \quad (3)$$

Для знаходження невідомих координат шарніра С ( $x_C, y_C, z_C$ ) маємо систему трьох рівнянь:

$$\begin{cases} x_C^2 + y_C^2 + z_C^2 = R^2, \\ (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2 = L_2^2, \\ (x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2 = L_3^2. \end{cases} \quad (4)$$

Системи рівнянь (3) і (4) розв'язуються ітераційним методом за допомогою математичних пакетів.

Кути А, В, С між осями приводів знаходяться із тригонометричних співвідношень для трикутника АВС. На основі теореми косинусів маємо:

$$\begin{aligned} A &= \arccos \frac{L_1^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_1L_3}, \quad B = \arccos \frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2}{2L_1L_2}, \\ C &= \arccos \frac{L_2^2 + L_3^2 - L_1^2}{2L_2L_3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Площина розташування структури, в якій знаходяться приводи і шарніри, визначається в аналітичному вигляді по трьох точках (А, В і С) і описується рівнянням:

$$P_x \cdot x + P_y \cdot y + P_z \cdot z = Q, \quad (6)$$

де коефіцієнти рівняння визначено у вигляді:

$$\begin{aligned} P_x &= \begin{vmatrix} y_A & z_A & 1 \\ y_B & z_B & 1 \\ y_C & z_C & 1 \end{vmatrix}, & P_y &= \begin{vmatrix} z_A & x_A & 1 \\ z_B & x_B & 1 \\ z_C & x_C & 1 \end{vmatrix}, \\ P_z &= \begin{vmatrix} x_A & y_A & 1 \\ x_B & y_B & 1 \\ x_C & y_C & 1 \end{vmatrix}, & Q &= \begin{vmatrix} x_A & y_A & z_A \\ x_B & y_B & z_B \\ x_C & y_C & z_C \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Детермінанти, які входять в формулу (6) обчислюються по знайденим за формулами (2)–(4) координатам шарнірів.

Рівняння нормалі до площини структури, яка проходить через центр сфери, визначено системою рівнянь:

$$\frac{x}{q_x} = \frac{y}{q_y} = \frac{z}{q_z}, \quad \text{де } \frac{q_x}{P_x} = \frac{q_y}{P_y} = \frac{q_z}{P_z}. \quad (7)$$

Дана нормаль перетинає площину структури в точці, де розв'язки рівнянь (6) і (7) співпадають.

Відстань від центра сфери до площини структури визначається формулою:

$$h = \frac{Q}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}}, \quad (8)$$

Відповідно найбільше відхилення площини структури від криволінійної поверхні складе:

$$\Delta = R - h. \quad (9)$$

Окремі привода структури  $L_1$ ,  $L_2$  та  $L_3$  проектується на криволінійну поверхню. Їх проекціями є дуги  $ПЛ_1$ ,  $ПЛ_2$ ,  $ПЛ_3$ . Вони утворюють сферичний трикутник з вершинами  $ABC$  сторонами  $u$ ,  $v$ ,  $w$  та кутами  $U$ ,  $V$ ,  $W$  визначений на сфері радіуса  $R$ . Сторони сферичного трикутника вимірюються в кутовій мірі і знаходяться із тригонометричних співвідношень для трикутників  $\Delta OAB$ ,  $\Delta OBC$ ,  $\Delta OCA$ . Відповідно до сторони сферичного трикутника знайдені у вигляді залежностей:

$$u = 2 \arcsin \frac{L_2}{2R}, \quad v = 2 \arcsin \frac{L_3}{2R}, \quad w = 2 \arcsin \frac{L_1}{2R}. \quad (10)$$

Кути  $U$ ,  $V$ ,  $W$  сферичного трикутника знаходяться на основі теореми косинусів для сферичних трикутників:

$$U = \arccos \frac{\cos u - \cos v \cdot \cos w}{\sin v \cdot \sin w},$$

$$V = \arccos \frac{\cos v - \cos u \cdot \cos w}{\sin u \cdot \sin w},$$

$$W = \arccos \frac{\cos w - \cos u \cdot \cos v}{\sin u \cdot \sin v}. \quad (11)$$

Дуги проекцій на сферу приводів та відповідні приводи утворюють сегменти, висота яких є найбільшою відстанню від осі приводу до поверхні. Висоти сегментів обчислюються за формулами:

$$\Delta_1 = R(1 - \cos w/2), \quad \Delta_2 = R(1 - \cos u/2),$$

$$\Delta_3 = R(1 - \cos v/2). \quad (12)$$

Наведені вище формули (5)–(12) є основою визначення положення структури на сферичній поверхні. Для поверхонь іншого виду формули ускладнюються.

Схемні рішення просторових систем приводів у вигляді рухомих триангулярних структур. Об'єднання кількох елементарних триангулярних структур породжує різноманітні складні структури. Об'єднання елементарних структур по ланцюговій схемі породжує ланцюгові структури.

Ланцюгова структура може мати різну конфігурацію. Найбільш простою є лінійна ланцюгова структура (рис. 2,а). Об'єднання елементарних структур по різних сторонах породжує поверхневі структури (рис. 2,г).

Розгалужені ланцюгові структури будуються по різноманітних схемах. Характерними є деревовидні ланцюгові триангулярні структури (рис. 2,б) та структури з кільцевими ділянками (рис. 2,в).

Триангулярні структури розташовуються на плоских або криволінійних поверхнях. Характерним є розташування ланцюгової лінійної триангулярної структури на циліндричній поверхні (рис. 3).

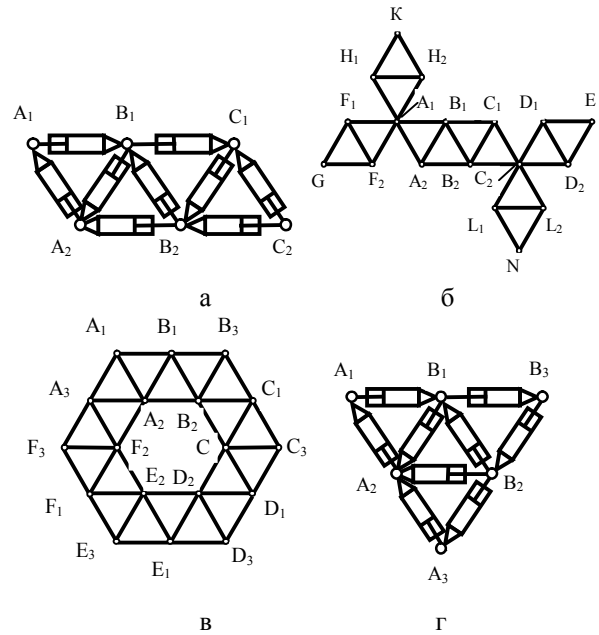


Рисунок 2 – Характерні приклади триангулярних структур: а – ланцюгова; б – ланцюгова деревовидна; в – кільцева; г – поверхнева

Наведена структура має здатність переміщуватись вздовж осі циліндричної поверхні (трубопровода) та переміщуватись в тангенціальному напрямку відносно поверхні. Характерним є гвинтовий рух структури по поверхні труби. Реалізується як правий, так і лівий гвинтові рухи. Аналогічно побудована кільцева структура мінімальної конфігурації, яка має 12 приводів (рис. 4). Використані гнучкі сільфонні приводи, які забезпечують надійне переміщення і фіксацію структури. В номінальному положенні дана структура відповідає октаедру.

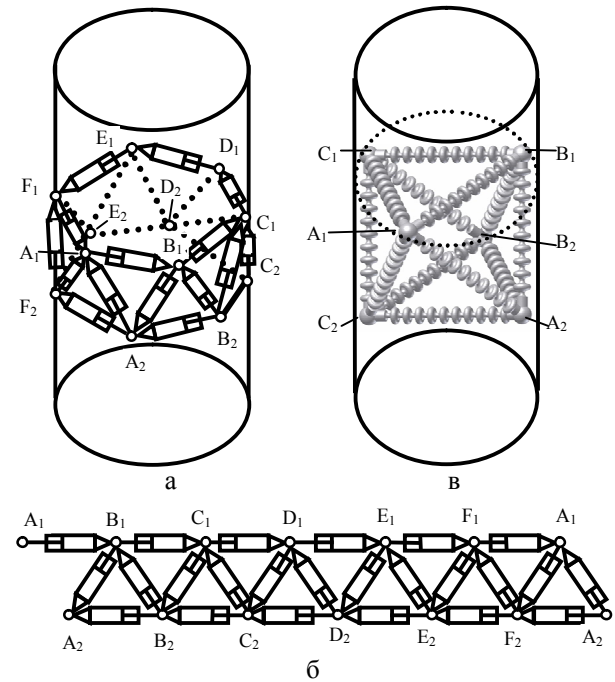


Рисунок 3 – Кільцева ланцюгова триангулярна структура, яка розташована на циліндричній поверхні: а – загальний вигляд структури, яка має 24 приводи; б – розгортка даної структури; в – кільцева структура в мінімальній конфігурації, яка включає 12 приводів сільфонного типу

Спеціальним видом поверхневої триангулярної структури є одностороння лінійна кільцева структура (рис. 4).

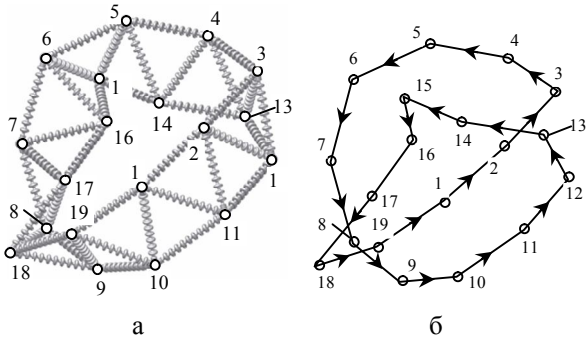


Рисунок 4 – Одностороння поверхнева ланцюгова триангулярна структура, яка здійснює триангуляцію односторонньої поверхні типу листа Мебіуса:  
а – загальний вигляд структури; б – схема послідовного розташування шарнірів по номерам

Наведена одностороння структура має 19 шарнірів, які розташовані послідовно по номерам (рис. 4,б).

Елементна база розробленої просторової системи приводів. Для реалізації просторової системи приводів у вигляді рухомих триангулярних структур розроблена спеціальна елементна база. Вона включає спеціальні магнітні сферичні шарніри, опорні елементи та приводи.

Магнітні сферичні шарніри мають широкі діапазони поперечно-кутових переміщень. Основою сферичного шарніра є магнітна сфера, яка вільно повертається в процесі роботи шарніра. Магнітна сфера 1 взаємодіє із сферичними поверхнями хвостовиків 2, які закріплені на корпусах або штоках пневмоциліндрів (рис. 5).

Шарнір оснащено аеростатичною опорою. Корпус опори 4 має в центральній частині конічний отвір, в який поміщується магнітна сфера. На опорній поверхні корпуса виконано кармани 5, 6, до яких через дроселі 7 підводиться стиснене повітря від магістралі 8. При подачі повітря в магістраль 8, корпус опори відривається від поверхні основи, а між поверхнею корпуса і поверхнею основи утворюється щілина, по якій протікає повітря. Сили тертя знижуються практично до нульового значення і опора допускає вільне переміщення паралельно поверхні основи.

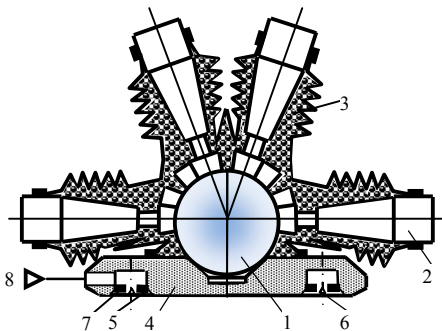


Рисунок 5 – Конструктивна схема розробленого сферичного шарніра з аеростатичною опорою

Аеростатична опора є пристроєм динамічної дії. За рахунок стиснутого повітря в порожнинах карманів мають місце вертикальні коливання опори. Це суттєво знижує сили тертя та збільшує зазор між опорою і основою. Відповідно компенсуються нерівності поверхні основи.

У процесі роботи шарніра сфера, яка взаємодіє із хвостовиком в середовищі феромагнітної рідини, повертається і встановлюється таким чином, що магнітний полюс сфери знаходиться з боку хвостовиків (рис. 6).

Як видно із рисунку, феромагнітна рідина локалізується на окремих ділянках сфери. Ці ділянки є її магнітними полюсами.

При встановленні двох хвостовиків на сфері, вона повертається таким чином, що її магнітний полюс розташовується між хвостовиками.

Хвостовики мають складну конфігурацію по сферичній поверхні. Це забезпечує надійний контакт хвостовика із сферою та необхідну силу магнітної взаємодії хвостовика із сферою. Для реалізації надійного контакту хвостовика із сферою хвостовик повинен сприймати моментні навантаження, які діють в радіальній площині хвостовика. Тому хвостовики мають по три фасонні виступи на своїй сферичній поверхні.



Рисунок 6 – Взаємодія магнітної сфери із опорними поверхнями хвостовиків при наявності феромагнітної рідини

Наявність виступів дає можливість збільшити діаметр розташування крайніх опорних точок хвостовика, а відповідно збільшити силу магнітної взаємодії хвостовика із сферою. При зміщенні хвостовика по поверхні сфери фасонні виступи взаємодіють між собою (рис. 7).

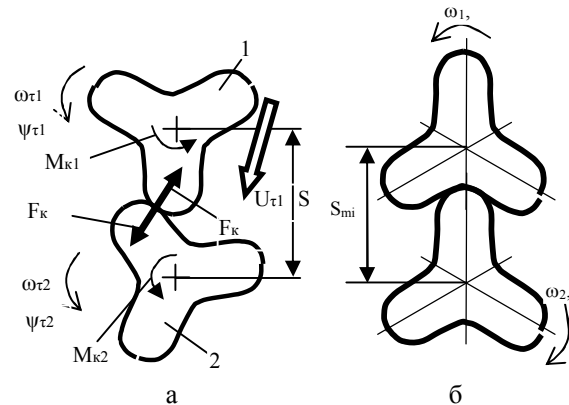


Рисунок 7 – Розташування та взаємне переміщення двох сусідніх хвостовиків із виступами на сфері: а – поточне при їх контакті; б – мінімально можливе зближення хвостовиків при якому забезпечується їх взаємний поворотний рух

У деякому поточному положенні кут між осями хвостовиків складає  $\alpha$ , а відповідно – відстань по дузі великого круга сфери  $S = \alpha R$ , де  $R$  – радіус сфери (рис. 7,а).

Переміщення хвостовика 1 при його контакті із хвостовиком 2 буде відбуватись в певному напрямку зі швидкістю  $U_{\tau 1}$ . Це призведе до виникнення сили контактної взаємодії  $F_k$  і крутних моментів  $M_{k1}$  та  $M_{k2}$ , які діють на хвостовики. Крутні моменти спричинені переміщенням хвостовиків у напрямку  $U_{\tau 1}$ , але їх величина буде залежати від момента опору привода при повороті хвостовика та від сили тертя між контактуючими поверхнями хвостовиків та моментів тертя в контактах між хвостовиками і сферою.

Під дією крутних моментів обидва хвостовики будуть повертатись на кути  $\psi_{\tau 1}$  та  $\psi_{\tau 2}$  з кутовими швидкостями  $\omega_{\tau 1}$  та  $\omega_{\tau 2}$ . Зближення і поворот хвостовиків буде відбуватись до досягнення мінімально можливої відстані між хвостовиками (рис. 7,б), яка складає:

$$S_{\min} = R\alpha_{\min}$$

де  $\alpha_{\min}$  – мінімальна можлива поперечно-кутова відстань між всіма хвостовиків.

У подальшому при  $S = S_{\min}$  можливий лише поворотний рух хвостовиків. При цьому відбувається відносне обертання хвостовиків один відносно одного, а виступи взаємодіють між собою утворюючи взаємопов'язану обертову систему. Кутові швидкості обертання  $\omega_1$  та  $\omega_2$  визначаються, зокрема кутами повороту  $\psi_1$  та  $\psi_2$  і моментами опору при взаємодії хвостовика із магнітною сферою. Необхідність осьового повороту хвостовиків потребує спеціальних приводів у вигляді пневмоциліндрів, штоки яких мають можливість повороту відносно корпусів циліндрів.

В окремих випадках магнітні сферичні шарніри не можуть бути використані. Тому розроблені альтернативні варіанти реалізації рухомих триангулярних структур. Вони базуються на використанні пружно-деформованих приводів сильфонного типу. При цьому шарнірні з'єднання в триангулярних структурах виключаються.

*Мехатронна система переміщення триангулярної структури.* Триангулярна структура переміщується шляхом зміни положення та конфігурації кожної із елементарних триангулярних структур. Елементарна триангулярна структура включає три приводи у вигляді пневматичних циліндрів, з'єднаних за допомогою шарнірів А, В і С (рис. 8).

Мехатронна система приводів має електропневморозподільники  $P_1$ – $P_3$  призначені для включення пневмоциліндрів та розподільники  $P_4$ – $P_6$  для включення аеростатичних опор.

Зокрема, розподільник  $P_1$  забезпечує переміщення штока пневмоциліндра СВ. При включенні роз-

подільника  $P_1$  повітря підтиском подається в поршневу порожнину циліндра СВ.

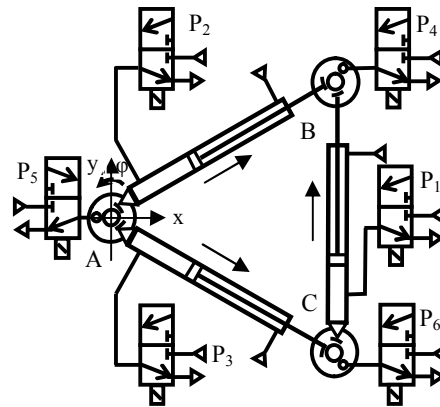


Рисунок 8 – Система керування елементарної триангулярної структури, що має три пневмоциліндри з'єднані сферичними шарнірами, які встановлені на аеростатичних опорах

Одночасно стиснене повітря, через розподільник  $P_4$ , подається в аеростатичну опору В. У результаті опора В переміщується на відстань, що дорівнює ходу штока циліндра. У кінці ходу поршня розподільник  $P_4$  виключається. При цьому опора В фіксується на основі.

Зворотній хід штока циліндра СВ забезпечується виключенням розподільника  $P_1$ . Стиснене повітря в штоковій порожнині втягує шток циліндра. При цьому включається розподільник  $P_6$  і стиснене повітря подається в аеростатичну опору С, яка набуває властивості вільного переміщення. Шток пневмоциліндра СВ втягується переміщуючи опору С. Таким чином змінюється поперечно-кутове положення структури внаслідок її повороту відносно опори А на кут  $\phi$ . Аналогічним чином поворот структури здійснюється двома іншими пневмоциліндрами АС і АВ.

Для поступального переміщення структури одночасно включаються два розподільники. Наприклад, включенням розподільників  $P_2$  та  $P_3$  стиснене повітря одночасно подається в поршневі порожнини пневмоциліндрів АВ та АС. Включенням розподільників  $P_4$ ,  $P_6$  повітря підводиться до аеростатичних опор В і С. Відповідно штоки пневмоциліндрів висувуються переміщуючи опори В і С. У кінці ходу штоків пневмоциліндрів рух структури припиняється. При цьому розподільники  $P_4$ ,  $P_6$  виключаються і аеростатичні опори В і С фіксуються на основі. В подальшому розподільники  $P_2$  і  $P_3$  виключаються, а розподільник  $P_5$  включається. Стиснене повітря в штокових порожнинах циліндрів АВ і АС спричиняє втягнення їх штоків. При цьому аеростатична опора А вільно переміщується. Таким чином, при одночасному переміщенні штоків пневмоциліндрів АВ і АС структура зміщується в напрямку вісі х.

Аналогічно здійснюється поступальне переміщення структури в інших напрямках.

Недоліком розглянутих пристроїв є наявність складних сферичних шарнірів. Спрощення констру-



кції досягається використанням безшарнірних структур із гнучкими сильфонними приводами (рис. 9).

Дана структура є елементарною складовою більш складних структур, які розглянуті раніше (рис. 2, 4).

Безшарнірна структура (рис. 9) переміщується аналогічно структурі із шарнірами. Забезпечується поступальне переміщення в різних напрямках або поворотні рухи структури.

Особливістю переміщень є деформації приводів. Тому при переміщеннях сильфонні приводи АВ, АС і ВС будуть мати криволінійну форму.

Розроблені триангулярні структури призначені для виконання спеціальних функцій. Вони можуть переміщуватись як по площині, так і по криволінійній поверхні. При цьому три точки структури знаходяться на криволінійній поверхні здійснюючи її триангуляцію, тобто виділяючи з поверхні криволінійну ділянку обмежену трикутником (рис. 1).

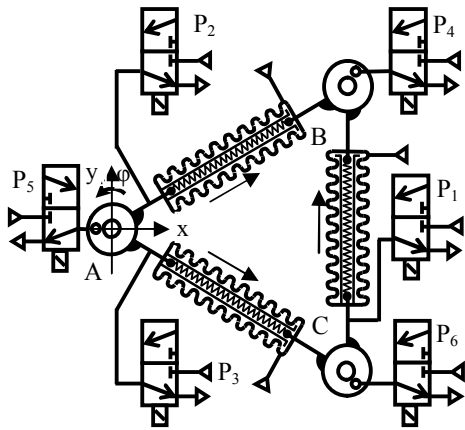


Рисунок 9 – Елементарна безшарнірна триангулярна структура із гнучкими сильфонними приводами

Поверхні розташовується під різним кутом до горизонтальної площини. Для надійної фіксації структури аеростатичні опори споряджаються додатковими постійними магнітами або електромагнітами.

При цьому структура набуває здатності переміщуватись по криволінійній поверхні розташованій довільним чином. Можливе переміщення структури по вертикальній стінці або по склепінню.

*Дослідна апробація розроблених систем приводів у вигляді триангулярних структур.* В процесі досліджень розроблені і виготовлені дослідні зразки триангулярних структур, які мають пневматичні приводи та магнітні сферичні шарніри.

Переміщувана плоска триангулярна структура має спеціальну мехатронну систему керування (рис. 10).

Виконана дослідна перевірка працездатності розробленої конструкції. Встановлено, що розроблена система відзначається надійністю роботи і має широкі функціональні можливості. Система приводів переміщується по плоскій або криволінійній поверхні по необхідному закону.

Розроблена, виготовлена і апробовані триангулярна структура, яка має п'ять приводів, які з'єднуються чотирма сферичними шарнірами (рис. 11).

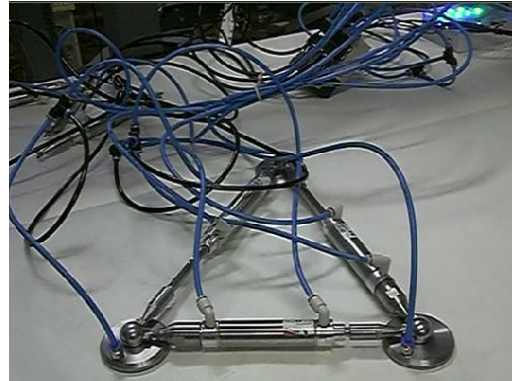


Рисунок 10 – Дослідний зразок мехатронної системи приводів у вигляді елементарної переміщуваної триангулярної структури



Рисунок 11 – Триангулярна структура, яка має п'ять приводів та чотири сферичні шарніри

Дана система переміщується по плоскій або ввігнутій поверхні, змінюючи свої розміри та конфігурацію. Дослідна перевірка підтвердила надійну роботу структури.

В процесі виконання робіт виготовлена ланцюгова лінійна структура, яка має сім автономних приводів (рис. 12).

Застосування спеціальної системи керування забезпечує переміщення структури та зміни її форми.



Рисунок 12 – Дослідний зразок лінійної триангулярної структури, що включає сім приводів і п'ять сферичних шарнірів

Наведені вище дослідні зразки триангулярних структур відносяться до класу лінійних. В процесі проведення робіт виготовлено і апробовано поверхневу структуру, що має дев'ять приводів і шість сферичних шарнірів (рис. 13).

Розроблена структура керується спеціальною системою і допускає переміщення по плоскій або криволінійній поверхні. При цьому змінюються розміри і конфігурація структури.

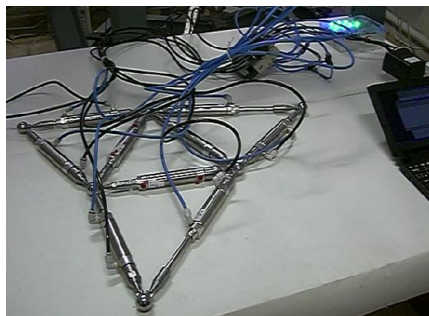


Рисунок 13 – Поверхнева триангулярна структура, що має дев'ять приводів і шість сферичних шарнірів

У процесі виконання робіт також виготовлено і апробовано просторову триангулярну структуру (рис. 14).



Рисунок 14 – Просторова триангулярна структура, яка має дванадцять приводів і шість шарнірів

Дана просторова система приводів має дванадцять приводів об'єднаних у замкнену структуру складену із трикутників. Є механізм-гексаподом, який змінює свої розміри. Структура в нульовому положенні відповідає октаедру який має шість вершин і вісім ідентичних граней, відповідних елементарним триангулярним структурам. Кожна із граней октаедра може бути розміщена на плоскій або криволінійній (ввігнутій) основі.

Структура має мехатронну систему керування з контролером на дванадцять виходів і комунікації.

Дослідна перевірка підтвердила працездатність і надійність роботи структури.

**ВИСНОВКИ.** Встановлено, що системи приводів у вигляді триангулярних структур, є ефективними пристроями маніпулювання об'єктами. Вони мають більш широкі функціональні можливості у порівнянні із традиційними маніпуляторами, зокрема можуть працювати в замкнених об'ємах типу трубопроводів, резервуарів, тощо.

Триангулярні структури реалізуються у різному вигляді, включаючи ланцюгові лінійні та розгалужені (древовидні), а також структури у вигляді ділянки поверхні, яка піддана триангуляції. Особливими видами структур є кільцеві, які відповідають триангуляції циліндричної поверхні та односторонні структури, які відповідають триангуляції односторонніх поверхонь.

Системи приводів у вигляді триангулярних структур будуються на принципово новій елементній базі, що включає магнітні сферичні шарніри, в яких використовується феромагнітна рідина та сільфонні приводи з необхідними діапазонами поступальних та поперечно-кутових переміщень. На елементній базі реалізуються два типи триангулярних структур: із лінійними приводами у вигляді пневмоциліндрів з'єднаних сферичними шарнірами та із приводами у вигляді гнучких сільфонів із жорстким з'єднанням у вершинах триангулярних структур.

Використання мехатронних систем керування триангулярними структурами забезпечує поступальне та поворотне переміщення кожної елементарної структури у вигляді трикутника, які утворюють загальну триангулярну структуру. При цьому структура переміщується по плоским або криволінійним поверхням, включаючи рух по вертикальним стінкам та склепінню.

Дослідна апробація розроблених лінійних, поверхневих просторових структур підтвердила їх працездатність і широкі функціональні можливості. Зокрема, встановлено, що структури забезпечують гнучке регулювання положення на площині та переміщення в необхідному напрямку.

Як напрямок подальших досліджень рекомендується провести дослідження статичних та динамічних характеристик розроблених просторових систем приводів у вигляді триангулярних структур і розробити конкретні пристрої маніпулювання даного виду.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications. – Berlin: Springer, 2006. – 394 p.
2. Сяньвень Кун, Клемент Госселин Структурный синтез параллельных механизмов. – М.: Физматлит, 2012.
3. Струтинський С.В., Гуржій А.А. Просторові системи приводів: монографія – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.
4. Патент України на корисну модель № 73729, МПК В21D 5/00, u201202093 Механізм-гексапод /

Струтинський С.В., Гуржий А.А.; заявл. 23.02.2012, опубл. 10.10.2012, Бюл. № 1.

5. Кириченко А.М. Наукові основи створення мехатронних систем просторового переміщення шпинделя багатокоординатних верстатів: дис. ... докт. техн. наук. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2012. – 380 с.

6. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1965. – 778 с.

7. Gosselin C.M., Tale Masouleh M., Duchaine V., Richard P.-L., Foucault S., and Kong X. Parallel mecha-

nisms of the multipteron family: Kinematic architectures and benchmarking // In Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy, 2007.

8. Pham H.H., Yeh H.C., and Chen I-M. Micromanipulation system design based on selective actuation mechanisms // The International Journal of Robotics Research. – 2006. – 25(1). – PP. 171–186.

## SPATIAL DRIVES SYSTEMS AS MOVABLE TRIANGULAR STRUCTURES

### S. Strutyn'skij

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: strutynskyi@gmail.com

The relevance of research and development of a spatial system of drives as separate structures composed of triangles was substantiated. It is shown that this type of structures, if located on a curved surface, splits it into triangular elements carrying out its triangulation. The analytical dependencies between the structure parameters and parameters of the surface areas derived by it were established. The main triangulation parameters for the special case of spherical surface were defined. The developed schematics of triangular structures are shown, the linear chain, surface and circular structures in particular. The purpose of structures to manipulate objects in limited quantities is substantiated. The design features of the element base of the developed spatial drives system are described. In particular, the design of the spherical hinge with a ferromagnetic fluid and magnetic sphere, which contacts with the spherical surfaces of the shanks attached to the housing and cylinder rods of drives, are shown. A mechatronic system of triangular structures movement is described. The special aerostatic supports are proposed for the structure's free movement and the mechanism of translational and rotary movement of the structure is described. The prototypes of the triangular surface structures that have three, five, seven and nine drives were developed and tested. An annular spatial structure, which includes 12 drives, was manufactured and tested.

**Key words:** drives, structures, hinges, moving, testing.

### REFERENCES

1. Merlet, J.P. (2006), "Parallel Robots", *Solid Mechanics and Applications*, Springer, Berlin, Germany.

2. Syanven Kun, Klement Hosselyn (2012), *Strukturniy paralelnih synthesis mechanisms* [Structural synthesis of parallel mechanisms], Fizmatlit, Moscow, Russia.

3. Strutynsky, S.V., Gurzhiy, A.A. (2013), *Prostorovi systemy pryvodiv* [Spatial Drive Systems], Monograph, *Pedagogichna Dumka*, Kiev, Ukraine.

4. Strutynsky, S.V. Gurzhiy, A.A. (2012), "Mechanism-heksapod", Patent of Ukraine for useful model №73729, B21D 5/00, u201202093, appl. 23.02.2012, publ. 10.10.2012, Bull. no. 1.

5. Kirichenko, A.M. (2012), "Scientific basics of mechatronic systems the spatial movement of a multi

spindle machines", Dissertation, Doc.Sci., Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

6. Anго, A. (1965), "Mathematics for electro-and-radioin the engineer", *Nauka*, 778 p., Moscow, Russia.

7. Gosselin, C.M., Tale Masouleh, M., Duchaine, V., Richard, P.-L., Foucault, S., and Kong, X. (2007), "Parallel mechanisms of the multipteron family: Kinematic architectures and benchmarking", *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy.

8. Pham, H.H., Yeh, H.C., and Chen, I.-M. (2006), "Micromanipulation system design based on selective actuation mechanisms", *The International Journal of Robotics Research*, no. 25(1), pp. 171–186.

Стаття надійшла 20.01.2014.