

УДК 621.9.04

Струтинський С.В., к.т.н.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

## ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ РУХОМОЇ МЕХАТРОННОЇ ПЛАНАРНОЇ ПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДІВ ІЗ СИЛЬФОННИМИ ПНЕВМОДВИГУНАМИ

Strutinskij S.  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine ([strutvnski@gmail.com](mailto:strutvnski@gmail.com))

### RATIONALE FOR THE DEVELOPMENT OF MECHATRONIC MOVING PLANAR ELASTIC-DEFORMED SYSTEM OF BELLOWS PNEUMATIC ACTUATORS

*На основі аналізу літературних джерел обґрунтована актуальність розробки рухомої мехатронної планарної пружно-деформованої системи приводів. Розроблені схемні і конструктивні рішення систем приводів із сільфонними пневмодвигунами. Працездатність запропонованих систем приводів підтверджена виготовленням і апробацією дослідних зразків сільфонних приводів та мехатронних систем в цілому. Розроблені і перевірені сервісні пристрої системи приводів, зокрема аеростатичні опори, які служать для вільного переміщення системи по плоскій чи криволінійній поверхні. Встановлені закономірності роботи окремих пневматичних пристроїв, які входять в мехатронну систему керування. Визначено закони зміни в часі, зміни тиску повітря у сільфонних приводах. Одержані результати досліджень використані для встановлення зміни конфігурації та напружено-деформованого стану рухомої мехатронної планарної системи приводів. Визначено пружні лінії приводів, які мають деформації приводів та зміни довжини приводів внаслідок їх деформації.*

*Ключові слова:* рухома структура, трикутник, сільфони, конструкції, зміни тиску, пружна лінія, аналітичний опис.

#### Вступ

Розробка принципово нових ефективних мехатронних систем і пристроїв маніпулювання об'єктами суттєво підвищує ефективність технологічного обладнання. Тому розробка та дослідження системи приводів із деформованими пневмодвигунами є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає в створенні мобільних мехатронних систем приводів для маніпулювання об'єктами. Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями розробки ефективних маніпуляторів для задач промисловості, комунального господарства та медицини.

В останніх дослідженнях і публікаціях [1, 2] наведено схемні і конструктивні рішення маніпуляторів з розширеними функціональними можливостями. Вони реалізуються на основі механізмів з паралельними кінематичними зв'язками [3]. Наявні пропозиції по розробці їх схемних рішень аналізу і синтезу. Пропонуються до використання механізми з ланками постійної та змінної довжини [4]. В окремих публікаціях [5] вказано на можливість побудови систем приводів, які використовуються гнучкі пневмодвигуни шлангового типу.

Результатів розробки та дослідження планарних систем приводів із деформованими пневмодвигунами сільфонного типу в літературних джерелах не виявлено.

До невирішеної раніше частини загальної проблеми відноситься розробка схемних і конструктивних рішень мехатронних планарних деформованих систем приводів із сільфонними пневмодвигунами.

Метою досліджень є створення принципово нових мехатронних систем приводів, які являють собою гнучку структуру трикутного виду встановлену на аеростатичних опорах. Задачами досліджень постановлено розробку схемних і конструктивних рішень систем приводів, встановлення особливостей їх роботи та визначення їх статичних та динамічних характеристик.

#### Схемні та конструктивні рішення розробленої мехатронної системи приводів

Мехатронна система приводів побудована на основі сільфонних пневмодвигунів з'єднаних по трикутній схемі [6]. Приводи з'єднуються утворюючи триангулярну структуру. Зміна форми і розмірів структури відбувається за рахунок деформації сільфонів. Деформація відбувається відносно деякого початкового положення. Початкове положення визначається видом структури. Характерним є з'єднання сільфонів у вигляді трикутника (рис. 1).

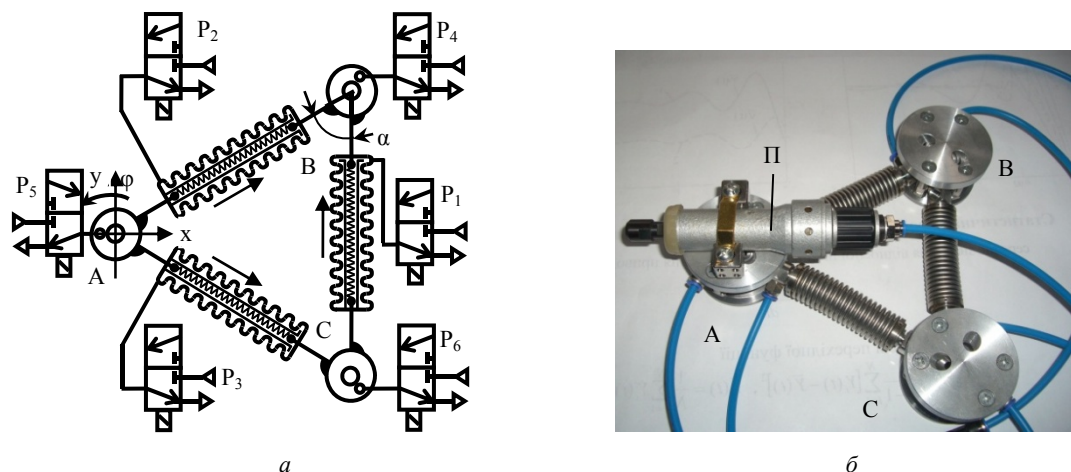


Рис. 1. Мехатронна система у вигляді деформованої трикутної структури (а) та загальний вигляд дослідного зразка системи приводів (б)

В початковому положенні кут  $\alpha$  між всіма приводами складає  $60^\circ$ . Сильфонні приводи в початковому положенні знаходяться в недеформованому стані.

Сильфони мають власну пружність та додатково стягуються пружинами. При включенні розподільників в порожнини сильфонів подається стиснене повітря і відстань між опорами збільшується (рис. 1 а). Реакції опор, тиск повітря та сила деформації сильфонів і пружин приводять систему в рівновагу. При цьому трикутна структура, складена із сильфонних приводів, змінює свою форму і розміри за рахунок деформації сильфонів.

Мехатронна система забезпечує переміщення трикутної структури. Трикутна структура переміщується шляхом зміни положення опор та конфігурації структури.

Мехатронна система приводів має електропневморозподільники  $P_1$ - $P_3$  призначені для подачі повітря в сильфонні пневмодвигуни та розподільники  $P_4$ - $P_6$  для включення аеростатичних опор.

Зокрема, розподільник  $P_1$  забезпечує подачу повітря в привод СВ. При включенні розподільника  $P_1$  повітря під тиском подається в сильфон СВ. Одночасно стиснене повітря, через розподільник  $P_4$ , подається в аеростатичну опору В. В результаті опора В переміщується на відстань, що дорівнює ходу сильфона. В кінці ходу розподільник  $P_4$  виключається. При цьому опора В фіксується на основі.

Зворотній хід сильфона СВ забезпечується виключенням розподільника  $P_1$ . За рахунок сил пружності сильфон скорочується. При цьому включається розподільник  $P_6$  і стиснене повітря подається в аеростатичну опору С, яка набуває властивості вільного переміщення. Сильфон СВ скорочується, переміщуючи опору С. Таким чином, змінюється поперечно-кутове положення структури внаслідок її повороту відносно опори А на кут  $\varphi$ . Аналогічним чином поворот структури здійснюється двома іншими сильфонами АС і АВ.

Для поступального переміщення структури одночасно включаються два розподільники. Наприклад, включенням розподільників  $P_2$  та  $P_3$  стиснене повітря одночасно подається в сильфони АВ та АС. Включенням розподільників  $P_4$ ,  $P_6$  повітря підводиться до аеростатичних опор В і С. Відповідно сильфони переміщують опори В і С. В кінці ходу сильфона 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. Сильфони АВ і АС скорочуються. При цьому аеростатична опора А вільно переміщується. Таким чином, при одночасному переміщенні сильфонів АВ і АС структура зміщується в напрямку вісі х.

Аналогічно здійснюється поступальне переміщення структури в інших напрямках.

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

Обґрунтування розробки рухомої планарної системи приводів виконано шляхом розробки і виготовлення дослідного зразка (рис. 1 б). Він має робочий пристрій П, встановлений на корпусі аеростатичної опори А. Даний пристрій переміщується по необхідному закону. В даному випадку пристрій являє собою високообертний шпindel з турбінним приводом і застосовується для виконання операції очищення поверхонь. В разі необхідності система приводів оснащується схватами для маніпулювання об'єктами.

Апробація розробленого дослідного зразка підтвердила працездатність запропонованих технічних рішень, високу надійність роботи системи приводів та їх широкі функціональні можливості.

Обґрунтування створення пружно-деформованої системи приводів включає розробку та аналіз схемних і конструктивних рішень системи та їх елементної бази. Розглянуті різні варіанти початкової конфігурації пружно-деформованої трикутної структури. Хвостовики сильфонів жорстко з'єднані на опорах структури. В залежності від кута установки хвостовиків реалізуються структури з початковою деформацією сильфонів.

Якщо вісі хвостовиків сильфонів на опорах розташовані під кутом  $\alpha > 60^\circ$  реалізується опукло-деформована триангулярна структура (рис. 2).

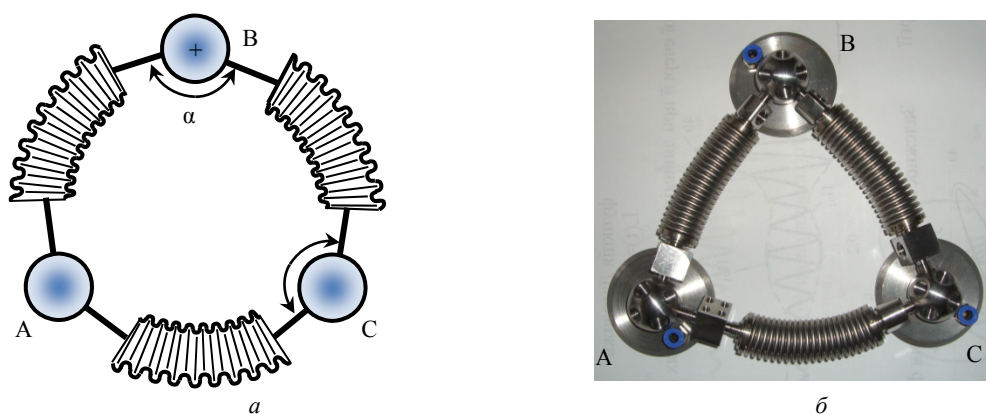


Рис. 2. Схема (а) опуклої деформованої триангулярної структури (б)

Дана структура призначена для використання в приводах, які здійснюють маніпулювання об'єктами в круглих трубопроводах.

Ввігнуто-деформована в початковому положенні триангулярна структура має кути  $\alpha$  між вісями хвостовиків менше  $60^\circ$ . Структура призначена для застосування на криволінійних поверхнях (рис. 3 а)

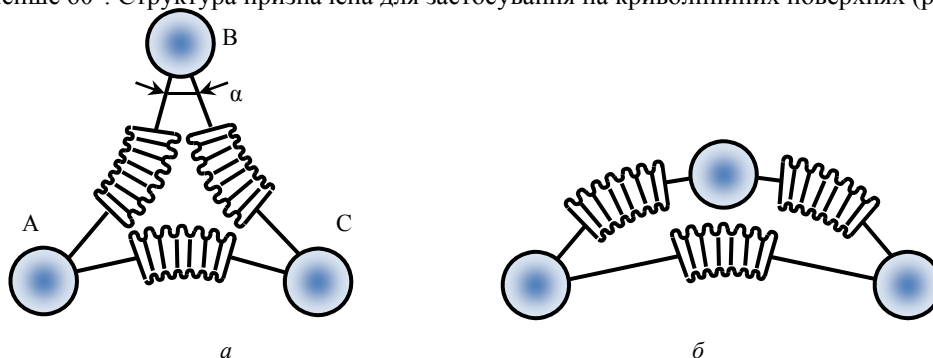


Рис. 3. Схема ввігнутої деформованої елементарної триангулярної структури (а) та опукло-ввігнутої структури (б)

В окремих випадках застосовуються опукло-ввігнуті структури (рис. 3 б). Вони ефективні в системах приводів, призначених для маніпулювання об'єктами в обмежених об'ємах.

Застосування опуклих та ввігнутих структур забезпечує натяг в системі при її нульовому положенні (при відсутності тиску повітря в сильфонах). Попередній натяг системи поліпшує її статичні та динамічні характеристики шляхом виключення вільних переміщень і коливань сильфонів при відсутності сил тиску в їх порожнинах.

Основою рухомої мехатронної пружно-деформованої системи приводів є герметичний пневмодвигун на основі сильфона.

Запропонована конструкція сильфонного привода має пружно-деформований сильфон 1 із фланцями 2 (рис. 4).

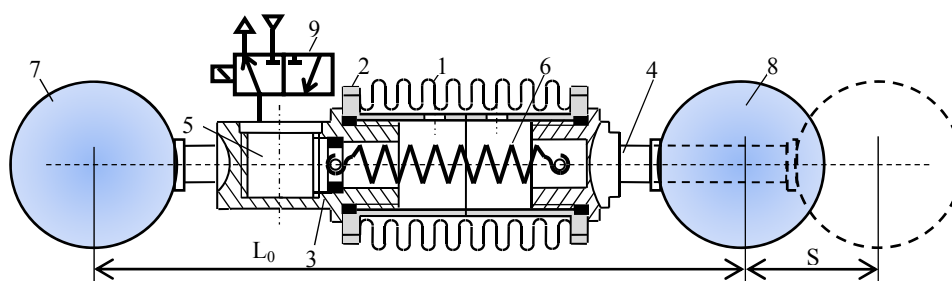


Рис. 4. Конструктивна схема сильфонного привода призначеного для використання в просторових системах у вигляді триангулярних структур

В різьбових отворах фланців встановлені хвостовики 3, 4. У хвостовику 3 виконано отвір 5 для підводу повітря. В центральній частині привода встановлена пружина розтягу 6, яка утримує привід в стисненому

стані. Окремі варіанти привода виконано з пружинами поміщеними навколо сільфона. Хвостовики 3 і 4 з'єднано із сферичними опорами структури 7 і 8. На хвостовику 4 можливе закріплення необхідного обладнання для маніпулювання. Тиск повітря в порожнині сільфона регулюється електропневморозподільником 9.

При подачі повітря в порожнину привода сільфон і пружина деформуються. При цьому змінюється взаємне положення хвостовиків 3 і 4.

Приводи реалізовані із однотипних деталей з уніфікованими з'єднаннями (рис. 5).



Рис. 5. Зовнішній вигляд пружно-деформованих сільфонних приводів: а – основні деталі привода; б – привод у зібраному стані без додаткового стиснення пружиною; в – привод із пружиною, розміщеною в порожнині сільфона; г – привод із трьома пружинами встановленими навколо сільфона

Сфери 1 на кінцях сільфонного привода встановлені на аеростатичних опорах 2 (рис. 6).

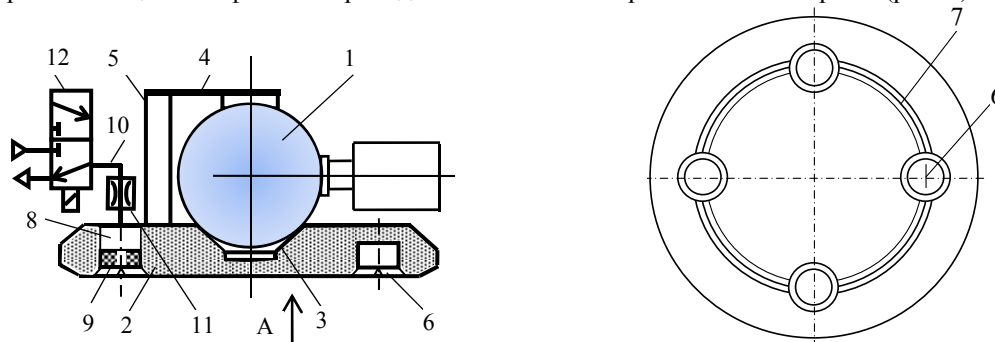


Рис. 6. Конструктивна схема аеростатичної опори

Сфера поміщена в конічну заглибину 3 опори і притискається до неї пружиною 4, яка закріплена на кронштейні 5. На нижній поверхні опори 2 виконано отвори 6 з фасками. Отвори з'єднані між собою проточкою 7, яка має незначну площу поперечного перетину. В одному з отворів (отвір 8) виконана різь, в якій встановлено штуцер із дроселем 9. Підключення опори забезпечується подачею повітря в магістраль 10 через електропневморозподільник 12, в якій встановлено регульований дросель 11.

Опора працює наступним чином. Під дією гравітаційних сил корпус опори 2 притискається до основи. Сили тертя, які виникають при взаємодії корпусу і поверхні основи забезпечують фіксацію опори.

Для забезпечення вільного переміщення опори в магістраль 10 подається стиснене повітря. Подача повітря регулюється дроселем 11. Повітря через дросель 9 проходить в отвір 8, а з нього по каналам 7 в отвори 6. Порожнини отворів наповнюються стисненим повітрям і тиск в них підвищується. Разом з тим росте тиск в зазорі між корпусом опори 2 та поверхнею основи. За умови підвищення тиску до деякого рівня, корпус опори відривається від поверхні основи, а між поверхнею корпусу і поверхнею основи утворюється щілина, по якій протікає повітря. Сили тертя знижуються практично до нульового значення і опора допускає вільне переміщення паралельно поверхні основи.

Аеростатична опора є пристроєм динамічної дії. Наявність стисненого повітря в порожнинах отворів спричиняє вертикальні коливання опори. Це суттєво знижує сили тертя та збільшує зазор між опорою і основою. Відповідно компенсуються нерівності поверхні основи при помірній витраті повітря.

#### Встановлення закономірностей роботи елементів пневматичної системи

Закономірності роботи запропонованої просторової системи приводів визначаються процесами в пневмосистемі. Практично важливими є процеси наповнення та витіснення повітрям із порожнин сільфонів та процеси функціонування аеростатичної опори.

Процеси наповнення та витіснення повітря із порожнини сільфонів визначають швидкодію мехатронної системи приводів.

При включенні електропневморозподільника тиск в магістралі та порожнині сільфона підвищується від значення  $p_1$  до  $p_2$ . Згідно [7] для надкритичного режиму течії повітря ( $0 < \sigma < 0,528$ ) час підвищення тиску визначено залежністю:

$$t_{H1} = \frac{V}{0,2588 \cdot k \mu f \sqrt{\frac{2gk}{k-1} \sqrt{RT_M}}} (\sigma_2 - \sigma_1), \quad (1)$$

де  $V$  – еквівалентний об'єм сиффона і магістралі між сиффоном і електропневморозподільником;  $k$  – показник адіабати;  $\mu, f$  – коефіцієнт витрати та ефективна площа прохідного перетину електропневморозподільника;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $R$  – газова стала;  $T_M$  – початкова температура повітря.

В формулу (1) входять відносні значення тиску в порожнині сиффона:

$$\sigma_1 = \frac{p_1}{p_m}, \quad \sigma_2 = \frac{p_2}{p_m},$$

де  $p_m$  – тиск повітря в магістралі живлення розподільника.

Залежність (1) встановлює зв'язок між тиском  $p_2$  в порожнині сиффона та часом, за який даний тиск досягається. При цьому початкове значення відносного тиску залишається постійним:

$$\sigma_1 = \frac{p_a}{p_m},$$

де  $p_a$  – атмосферний тиск.

Взаємозв'язок параметрів, встановлений формулою (1), зберігається до значення тиску  $p_2 \leq p_K$ , де  $p_K = 0,528 p_m$ . Розрахована за формулою (1), залежність тиску від часу відповідає ділянці АВ (рис. 7).

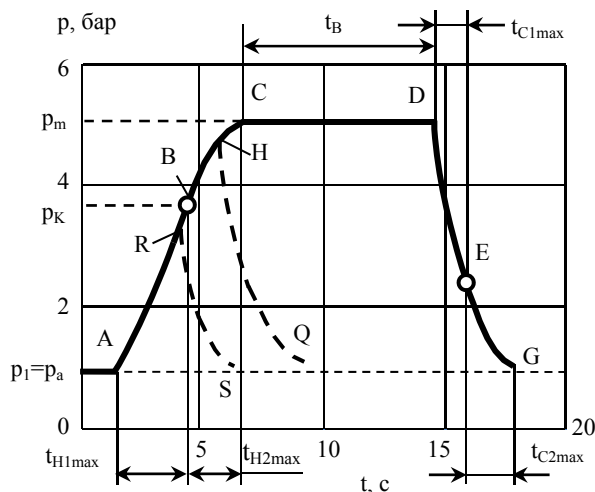


Рис. 7. Розрахункові зміни в часі тиску повітря у сиффонному приводі при включенні та виключенні розподільника

Тиск в порожнині сиффона підвищується за час  $t_{H1 \max}$ , який розраховується за формулою (1) при  $\sigma_2 = \sigma_K = p_K / p_m$ . В подальшому має місце підкритичний режим течії повітря в магістралі [8].

Для підкритичного режиму течії повітря в розподільнику час підвищення тиску від значень  $p_K$  до  $p_3$  визначається залежністю:

$$t_{H2} = \frac{2V \left[ \sqrt{1 - \sigma_K \frac{k-1}{k}} - \sqrt{1 - \sigma_3 \frac{k-1}{k}} \right]}{\sqrt{2gk(k-1)} \mu f \sqrt{RT_m}}, \quad (2)$$

де  $\sigma_3 = p_3 / p_m$ .

Залежність зміни тиску від часу описується формулою (2). Розрахункова залежність має аперіодичний характер (ділянка BC на рис. 7).

Розрахункове значення тиску  $p_3$  збільшується в часі, асимптотично наближаючись до тиску в магістралі живлення  $p_3$ . В порожнині сиффона встановлюється постійний тиск, який зберігається на протязі часу вистою  $t_B$ . При виключенні розподільника повітря витікає в атмосферу.

Час витікання повітря із порожнини привода визначається залежностями, які враховують режим течії [8].

В початковий момент в розподільнику має місце надкритичний режим течії. Для надкритичного режиму течії при  $0 < \sigma < 0,528$  час витікання повітря складає:



$$t_{c1} = \frac{2V \left( \sigma_5^{2k} - \sigma_4^{2k} \right)}{0,2588 \cdot \sqrt{2gk(k-1)} \mu f \sigma_a^{k-1} \sqrt{RT_M}}, \quad (3)$$

В формулу входять відносні значення тисків:

$$\sigma_a = \frac{p_a}{p_m}, \quad \sigma_4 = \frac{p_a}{p_4}, \quad \sigma_5 = \frac{p_a}{p_5},$$

де  $p_m$  – максимальний тиск повітря в порожнині сільфона;  $p_4, p_5$  – значення тисків у порожнині сільфона, зміна яких відбулася за час  $t_{c1}$ .

Прийнявши початкове значення тиску в порожнині сільфона  $p_4 = p_m$ , із формули (3) одержимо залежність зміни тиску  $p_5$  від часу. Розрахункова залежність відповідає ділянці DE кривої. Дана залежність має місце до

тих пір, поки тиск в порожнині сільфона не впаде до значення  $\sigma_5 = p_{K1} = \frac{p_a}{0,528}$ . Після цього режим течії в

розподільнику залишається підкритичним.

Для підкритичного режиму течії повітря час зміни тиску від  $p_{IK}$  до  $p_6$  визначиться залежністю:

$$t_{c2} = \frac{0,875V}{k \sqrt{\frac{2gk}{k-1}} \cdot \mu f \sigma_a^{k-1} \sqrt{RT_m}} \cdot \left[ \frac{\sqrt{1 - \sigma^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \left( 3\sigma^{\frac{k-1}{k}} + 2 \right)}{\sigma^{\frac{2(k-1)}{k}}} + 3 \ln \left( \frac{1 + \sqrt{1 - \sigma^{\frac{k-1}{k}}}}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}} \right) \right] \Bigg|_{\sigma_6}^{\sigma_{K1}} \quad (4)$$

де  $\sigma_{K1} = p_a / p_{K1}$ ,  $\sigma_6 = \frac{p_a}{p_6}$ .

Залежність (4) має місце для значень тиску  $p_a \leq p_6 \leq p_{K1}$ . Вона відповідає ділянці EG характеристики (див. рис. 7). Як випливає із аналізу даної залежності, тиск в порожнині сільфона монотонно падає, асимптотично наближаючись до атмосферного тиску. В результаті проведених розрахунків встановлено, що час наростання тиску в порожнині сільфона є незначним і складає 3...5 м/с. Час падіння тиску в 2...3 рази менше часу наростання, що відповідає літературним джерелам [8]. Тому можна зробити висновок про високу швидкодію сільфонного привода. Відповідно зміна тиску в порожнині сільфона відповідає графіку, близькому до прямокутного виступа. В разі високої швидкодії електропневморозподільника час вистою  $t_B$  може бути зменшено. При цьому зміна тиску буде відповідати трикутним імпульсам АЕН або АRQ (див. рис. 7).

#### Визначення деформованого стану сільфонних приводів, які утворюють структуру

В процесі функціонування структури змінюється тиск у сільфонних приводах. Відповідно змінюються розміри та конфігурація структури. Сільфонні приводи деформуються за рахунок розтягу та згину сільфонів. Це приводить до зміни поперечно-кутового положення фланців сільфонів. Мають місце два види пружних ліній сільфонів: дугоподібні та s-подібні (із точкою перегину). Як приклад розглянемо триангулярну структуру, яка має початкову форму у вигляді рівностороннього трикутника  $A_0B_0C_0$  без початкової деформації сільфонів. При подачі стисненого повітря в приводи АВ і СВ сільфони видовжуються і структура переходить в положення  $A_0B_1C_1$ . При цьому на торцях сільфонів виникають моментні навантаження, що приводить до повороту торців сільфонів на кути  $\theta_1, \theta_A, \theta_B$  (рис. 8).

Внаслідок зміни конфігурації структури пружна лінія сільфона привода АС набуває дугоподібного виду, а пружні лінії приводів АВ і СВ набувають вигляду s-подібних кривих з точками перегину. Кути повороту торців сільфонів  $\theta_1, \theta_A, \theta_B$  визначаються із геометричних співвідношень або із розв'язку задачі сумісності деформацій.

Розглянемо геометричні співвідношення деформованих приводів структури. Прийmemo, що в початковому положенні привод розташований по прямій лінії  $A_0C_0$  (рис. 9).

При повороті хвостовиків  $A_0A_1$  та  $C_0C_1$  сільфон  $A_1C_1$  деформується, а його торці повертаються на кути  $\theta_1$  та  $\theta_2$ . В опорах сільфона виникають крутні моменти  $M_1$  та  $M_2$ . Для розрахунку деформацій прийнято, що сільфон являє собою пружну балку  $A_1C_1$ , встановлену на шарнірних опорах і навантажену моментами  $M_1$  та  $M_2$ . Згідно [9] кути повороту балки на опорах  $\theta_1, \theta_2$  пов'язані із величиною моментів наступними залежностями:

$$\theta_1 = \frac{M_1L}{3EI} + \frac{M_2L}{6IE}, \quad |\theta_2| = \frac{M_2L}{3EI} + \frac{M_1L}{6IE}, \quad (5)$$

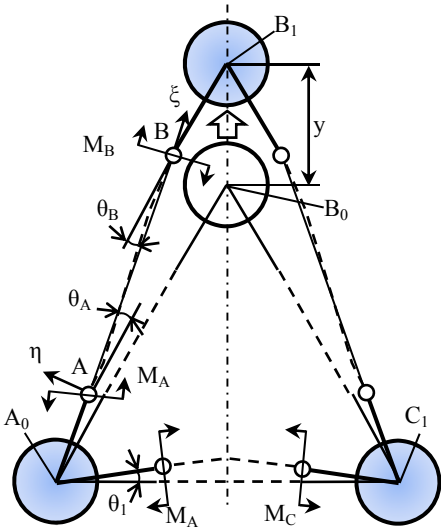


Рис. 8. Деформації сільфонних приводів триангулярної структури при подачі стисненого повітря в приводи АВ і СВ

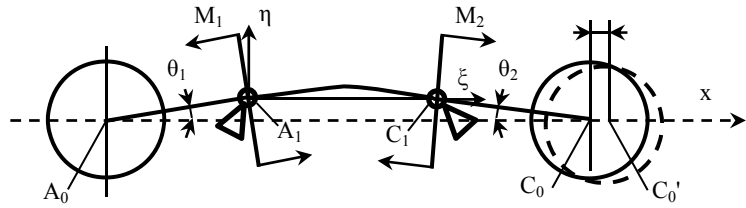


Рис. 9. Схема деформації сільфонного привода при зміні поперечно-кутового положення його опор

де  $L$  - відстань між опорами;  $E$  - модуль пружності матеріалу сільфона;  $I$  - еквівалентний момент інерції сільфона при згині.

Крутні моменти визначено по наявним кутам повороту торців із системи рівнянь:

$$\begin{cases} M_1 + \frac{M_2}{2} = \theta_1 \frac{3IE}{L}; \\ \frac{M_1}{2} + M_2 = |\theta_2| \frac{3IE}{L}. \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язок системи рівнянь (6) одержимо безпосередньо у вигляді:

$$M_1 = \frac{4IE}{L} \left( \theta_1 - \frac{|\theta_2|}{2} \right), \quad M_2 = \frac{4IE}{L} \left( |\theta_2| - \frac{1}{2} \theta_1 \right). \quad (7)$$

Формули (5) та (7) дають можливість визначити загальні моменти, які діють у вузлах структури.

Для оцінки деформованого стану сільфонного привода при згині використана еквівалентна схема балки на двох шарнірних опорах, в яких діють відповідні крутні моменти.

Пружна лінія балки, навантаженої двома моментами на опорах, згідно [10] визначається залежністю:

$$\eta = \frac{M_1 L (L - \xi)}{6EI} \left[ 1 - \left( \frac{L - \xi}{L} \right)^2 \right] + \frac{M_2 L \xi}{6EI} \left( 1 - \frac{\xi^2}{L^2} \right).$$

Підставивши значення крутних моментів із формули (7), визначимо пружну лінію сільфона в залежності від кутів повороту його торців:

$$\eta = (L - \xi) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\xi}{L} \right)^2 \right] \frac{(2\theta_1 - |\theta_2|)}{3} + \frac{\xi}{L} \left( 1 - \frac{\xi^2}{L^2} \right) \frac{(2|\theta_2| - \theta_1)}{3}. \quad (8)$$

Пружна лінія сільфона має різну форму в залежності від величини і знаку кутів повороту його торців (рис. 10).

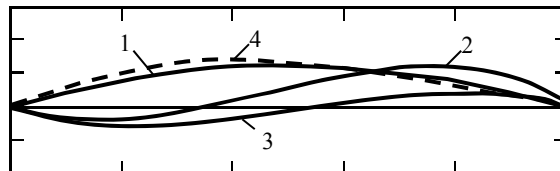


Рис. 10. Розрахункові пружні лінії деформованих сільфонів: крива 1 при однакових кутах повороту торців; крива 2 – при різних кутах повороту з протилежними напрямками; крива 3 – при однакових кутах різного напрямку; крива 4 – при різних кутах одного напрямку

Практично важливим є визначення пружної лінії сільфона при його деформації симетричній відносно торців. При цьому  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ .

Підставивши дані значення кутів у формулу (8), знайдемо:

$$\eta = (L - \xi) \frac{\theta}{3} \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\xi}{L} \right)^2 + \frac{\xi}{L} \left( 1 - \frac{\xi^2}{L^2} \right) \right]. \quad (9)$$

Дана формула визначає симетричну параболу третього порядку. Максимальний прогин сільфона має місце при  $\xi/L = 1/2$  і складає:

$$\eta_{\max} = \frac{3}{16} \theta L.$$

Пружна лінія сільфона при симетричній деформації близька до ділянки кола (сегмента), хорда якого дорівнює  $L$ , а радіус  $R = \frac{L}{2 \sin \theta}$ .

При цьому рівняння, яке описує пружну лінію, має вигляд:

$$\eta = b + \sqrt{R^2 - (\xi - 0,5)^2}. \quad (10)$$

Залежність у вигляді параболи третього порядку (9) практично співпадає з дугою кола (рис. 11).

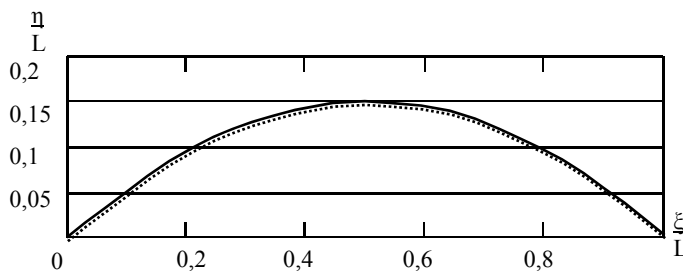


Рис. 11. Пружна лінія сільфона при однакових кутах нахилу торців ( $\theta = \theta_1 = \theta_2 = 0,6 = 35^\circ$ ) та її апроксимація дугою кола (пунктирна лінія)

Довжина пружної лінії сільфона буде більшою, ніж довжина сільфона в недеформованому стані. Для пружної лінії у вигляді дуги довжина пружної лінії складає:

$$\Delta = L_s - L = \left( \frac{\theta}{\sin \theta} - 1 \right) L. \quad (11)$$

Одержані формули (8)-(11) дають можливість оцінити деформований стан сільфонного приводу.

Одержані залежності є наближеними. Для їх уточнення проведені експериментальні виміри пружних ліній сільфонів при різних кінематичних крайових умовах. Встановлено, що одержані формули з точністю 10...15% відповідають експериментальним даним. Тому вони рекомендуються для інженерного розрахунку силових факторів та деформацій планарної пружно-деформованої системи приводів.

#### Висновки

1. Показано, що раціональним схемним рішенням рухомої мехатронної планарної системи приводів є жорстке з'єднання сільфонів по трикутній схемі. При цьому використання опуклої або ввігнутої схеми з'єднання сільфонів з кутами між осями не рівними  $60^\circ$  забезпечує попередній натяг у системі, що позитивно впливає на статичні і динамічні характеристики системи.

2. Встановлено, що розроблені конструкції сільфонних приводів та аеростатичних опор є прогресивною елементною базою рухомих мехатронних пружно-деформованих систем приводів. З використанням даної елементної бази реалізуються численні варіанти планарних та просторових систем приводів для маніпулювання об'єктами.

3. Визначені зміни тиску в порожнинах сільфонів при включенні розподільників обґрунтовують можливість реалізації зміни тиску у вигляді прямокутного або трикутного імпульсів. Трикутна форма імпульсів тиску дозволяє реалізувати ефективні алгоритми роботи мехатронної системи із забезпеченням високої швидкості та можливістю розширення діапазону регулювання силових характеристик пружно-деформованої системи приводів.

4. Показано, що змінами початкової та поточної деформації сільфонних приводів можна змінювати форму і положення структури. При цьому сільфонні приводи деформуються по симетричній або по косиметричній схемі. При цьому пружна лінія відповідає параболам другого і третього порядку. При повній симетрії деформацій пружна лінія близька до дуги кола. Одержані розрахункові формули описують напружено-деформований стан системи приводів з точністю 10...15%, що можна вважати задовільним при інженерних розрахунках систем.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується дослідити вплив експлуатаційних факторів на характеристики пружно-деформованих систем приводів.



**Аннотация.** На основе анализа литературных источников обоснована актуальность разработки подвижной мехатронной планарной упруго-деформированной системы приводов. Разработаны схемные и конструктивные решения систем приводов с сильфонными пневмодвигателями. Работоспособность предложенных систем приводов подтверждена изготовлением и апробацией экспериментальных образцов сильфонных приводов и мехатронных систем в целом. Разработаны и проверены сервисные устройства системы приводов, в частности аэростатические опоры, которые служат для свободного перемещения системы по плоской или криволинейной поверхности.

Установлены закономерности работы отдельных пневматических устройств, входящих в мехатронную систему управления. Определены законы изменения во времени, изменения давления воздуха в сильфонных приводах. Полученные результаты исследований использованы для установления изменения конфигурации и напряженно-деформированного состояния подвижной мехатронной планарной системы приводов. Определены упругие линии приводов, имеющих деформации приводов и изменения длины приводов вследствие их деформации.

**Ключевые слова:** подвижная структура, треугольник, сильфоны, конструкции, изменения давления, упругая линия, аналитическое описание.

**Abstract.** The possibility of planar sealed agile drive systems development without joints is substantiated. It is proposed to use rigidly connected to the vertices of a triangle bellows air motors with an additional compression by springs as actuators. To ensure the mobility of elastically deformed system it is proposed to provide special aerostatic bearings. Schematics and designs of mechatronic drive systems and the element base for their implementation are developed. The results of research of consistent patterns of the air pressure changings in elastically deformed bellows drives are represented. The parameters of the stress-strain state of the system, including rigidly connected bellows when changing the configuration of the system as it moves are defined. The analytical expressions for the calculation of the elastic lines of planar drive systems are given. The form of symmetrically deformed bellows is proposed to describe as a circular arc to simplify. At the same time the contraction of length of the bellows actuator due to its lateral deformation is defined. According to the research results the conclusions that are justifying the development of an agile mechatronic planar elastically deformed system drives are done.

**Keywords:** agile system, triangle, bellows, constructions, pressure changes, the elastic line, analytical description.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. Сяньвень Кун, Клемент Госселин Структурный синтез параллельных механизмов. – М.: Физматлит, 2012. – 275 с.
2. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications /J.P. Merlet/ – Berlin: Springer, 2006. – 394 p.
3. Kim Han S., Choi Yong J. The kinematic error bound analysis of the Stewart platform // Journal of Robotic Systems 17 (1), 2000, pp. 63 – 73.
4. 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. – 2006. – 452с.
5. Пашков Е.В. Промышленные мехатронные системы на основе пневмопривода: Учеб. пособие / Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский. – Севастополь: Изд. СевНТУ, 2007. – 401с.
6. Струтинський С.В. Просторові системи приводів: Монографія / ав. Струтинський С.В., Гуржій А.А. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.
7. Федорець В.О. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідропневмопривод: Підручник // В.О.Федорець, М.Н.Педченко, О.О. Федорець, В.Б.Струтинський, О.М.Яхно, Ю.В.Єлісєєв. – Житомир: ЖІТІ, 1998. – 412 с.
8. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975р. – 272 с.
9. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. Изд. 9 стереотипное. – М.: Машиностроение, 1964.-856 с.
10. Тимошенко С.П. Соппротивление материалов. – М.: Физматлит, 1960. – 379 с.

#### References

1. Sjan'ven' Kun, Klement Gosselin Strukturnyj sintez parallel'nyh mehanizmov [Structural synthesis of parallel mechanisms]. Moscow: Fizmatlit, 2012, p. 275.
2. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications. Berlin: Springer, 2006, p. 394.
3. Kim Han S., Choi Yong J. The kinematic error bound analysis of the Stewart platform, Journal of Robotic Systems 17 (no 1), 2000, pp. 63 – 73.
4. Afonin V.L., Podzorov P.V., Slepcev V.V. Obrabatyvajushhee oborudovanie na osnove mehanizmov parallel'noj struktury [Processing equipment, based on mechanisms of parallel structures]. Moscow: MGTU Stankin, Janus., 2006, p. 452.
5. Pashkov E.V. Promyshlennyye mehatronnyye sistemy na osnove pnevmoprivoda [Industrial mechatronic systems based on pneumatic], Textbook. Sevastopol: SevNTU, 2007, p. 401.
6. Strutins'kij S.V. Prostorovi sistemi privodiv [Spatial systems drives], Monograf, av. Strutins'kij S.V., Gurzhiy A.A., Kiev: Pedagogichna dumka, 2013, p. 492.
7. Fedorec' V.O. Tehnichna gidromehanika. Gidravlika ta gidropnevmoпривод [Technical hydromechanics. Hydraulics and hidropnevmoпривод], Textbook, av. V.O.Fedorec', M.N.Pedchenko, O.O. Fedorec', V.B.Strutins'kij, O.M.Jahno, Ju.V.Eliseev, Zhitomir: ZhITI, 1998, p. 412.
8. Gerc E.V., Krejnin G.V. Raschet pnevmoprivodov [Calculation of pneumatic]. Handbook, Moscow: Mashinostrenie, 1975, p. 272.
9. Beljaev N.M. Soprotivlenie materialov [Strength of materials], Moscow: Mashinostroenie, 1964, p. 856.
10. Timoshenko S.P. Soprotivlenie materialov [Strength of materials], Moscow: Fizmatlit, 1960, p. 379.

Подана до редакції 08.04.2014