

ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАНГОВИХ ПНЕВМОДВИГУНІВ У ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМАХ ПРИВОДІВ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ КІНЕМАТИЧНИМИ СТРУКТУРАМИ

THE HOSE PNEUMATIC ACTUATORS CHARACTERISTICS IN SPATIAL DRIVE SYSTEMS WITH PARALLEL KINEMATICS STRUCTURES

Визначені статичні і динамічні характеристики шлангових пневмодвигунів, призначених для використання в просторових системах приводів. Для цього проведено розрахунок напружено-деформованого стану пневмодвигуна, на основі якого визначено статичні характеристики. Встановлено закономірності робочих процесів деформації композитної оболонки. Проведено дослідження поперечних (згинальних) деформацій оболонки та визначено її еквівалентні статичні і динамічні модулі пружності. Розроблено та апробовано дослідні зразки просторових систем приводів із шланговими пневмодвигунами.

Ключові слова: шлангові пневмодвигуни, просторові системи, статичні характеристики, поперечні деформації, динамічні характеристики, дослідні зразки систем.

Вступ

Шлангові пневмодвигуни (пневмом'язи) є інноваційними пневматичними приводами. Їх застосування в просторових системах приводів значно підвищує якісні показники приводів. Тому дослідження характеристик шлангових пневмодвигунів є актуальною науково-технічною задачею, яка у загальному вигляді полягає у розробці ефективних просторових систем приводів із застосуванням прогресивної елементної бази. Проблему пов'язано із важливими науковими і практичними завданнями створення сучасних технологічних машин з просторовими системами приводів.

У дослідженнях і публікаціях [1, 2] наведено схемні і конструктивні рішення просторових систем приводів, викладено результати досліджень їх характеристик. В [3, 4] вказано на недоліки просторових систем приводів, зокрема незадовільні динамічні характеристики. Для поліпшення динамічних характеристик в [5] рекомендується використати принципово нові пневматичні приводи у вигляді шлангових пневмодвигунів (пневмом'язів) [6]. Результатів досліджень статичних і динамічних характеристик шлангових пневмодвигунів у літературних джерелах не виявлено.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься дослідження характеристик шлангових пневмодвигунів, які застосовані у просторових системах приводів із паралельними кінематичними структурами.

Метою досліджень поставлено теоретичне та експериментальне визначення статичних і динамічних характеристик шлангових пневмодвигунів. Для досягнення поставленої мети сформульовані і вирішені задачі досліджень, які включають схемний аналіз

просторових систем приводів із шланговими пневмодвигунами, визначення статичних характеристик шлангових пневмодвигунів, оцінка динамічних властивостей шлангових пневмодвигунів в складі просторових систем приводів та розроблення дослідних зразків просторових систем приводів.

Виклад основного матеріалу

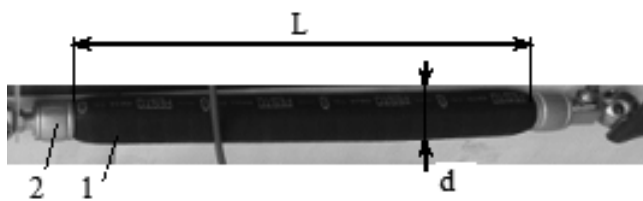
Специфіка роботи шлангового пневмодвигуна обумовлює його переваги над іншими видами пневмодвигунів. Шлангові пневмодвигуни сприймають лише розтягуючі зусилля є гнучкими і скорочуються, створюючи значні навантаження.

Шланговий пневмодвигун має трубчасту еластичну циліндричну оболонку 1 із композитного матеріалу, закріплену на кінцевих частинах 2 пневмодвигуна (рисунок 1).

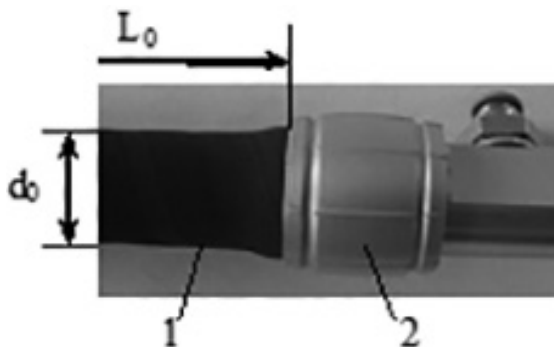
Шлангові пневмодвигуни MAS-20 мають максимальний робочий тиск 0,6 МПа та максимальне скорочення на 20% від загальної довжини L_0 у діапазоні тисків 0,2–0,6 МПа [5].

Шлангові пневмодвигуни дають можливість забезпечити навантаження у декілька разів більші, ніж зусилля пневматичного циліндра того ж діаметра.

Механізми, побудовані на основі приводів цього типу, мають відносно невеликий робочий простір, і оскільки пневмодвигун є гнучкою ланкою, то такі механізми можуть не включати шарнірів, а функцію шарніра виконує гнучка оболонка пневмодвигуна. Це дозволяє значно спростити конструкцію, а отже підвищити її надійність та довговічність.



а



б

Шлангові пневмодвигуни відзначаються плавністю роботи, в них відсутні сили сухого тертя. Тому просторова система приводів із шланговими пневмодвигунами буде захищеною від вібрацій, ударів та інших динамічних навантажень і може працювати в умовах, при яких механізми на основі жорстких ланок швидко вийдуть з ладу.

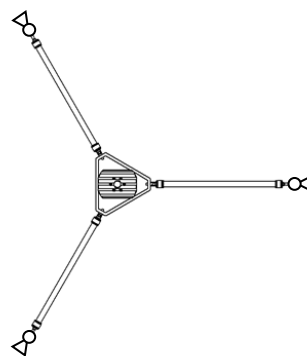
Особливості шлангових пневмодвигунів обумовлюють схемне рішення просторових систем приводів, побудованих на їх основі. Для переміщення виконавчого органа у площині реалізуються схемні рішення, які включають три і більше пневмоприводи (рисунк 2)

Система з трьома пневмодвигунами реалізує мінімальну конфігурацію плоскої системи приводів. Для забезпечення підвищених показників стійкості та несучої спроможності використовуються системи, які включають надлишкову кількість шлангових пневмодвигунів. Система, що має чотири пневмодвигуни, забезпечує незалежність роботи окремих пар приводів (рисунк 3, а).

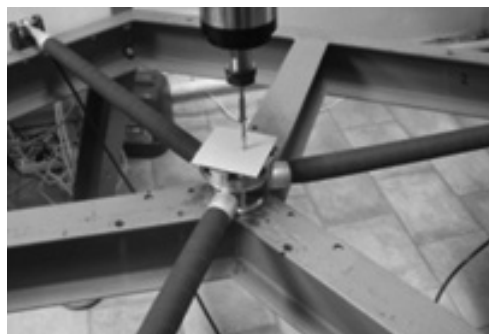
Система п'яти приводів (рисунк 3, б) забезпечує стійку рівновагу плоскої системи сил, які створюються шланговими пневмодвигунами. Дана система забезпечує рівномірне сприйняття зусиль, що діють на виконавчий орган в різних напрямках. Система із п'яти приводів є раціональним схемним рішенням просторової системи приводів.

Модифікацією плоских систем приводів із шланговими пневмодвигунами є механізми, які переміщують виконавчий орган сферичною поверхнею (рисунк 4).

Виконавчий орган 1 має сферичні аеростатичні опори, які забезпечують його плавне переміщення по сфері 2. Дана система приводів забезпечує сферичний рух виконавчого органа і використовується у спеціальному технологічному обладнанні [3].

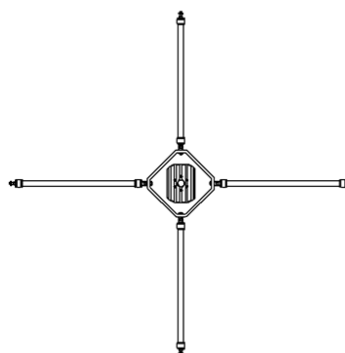


а

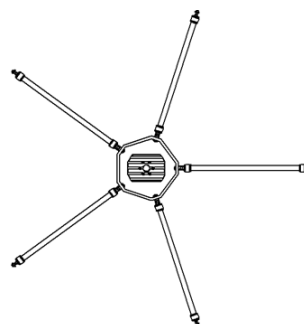


б

Рисунок 2 — Схемне рішення (а) та конструктивне виконання (б) систем приводів із трьома шланговими пневмодвигунами



а



б

Рисунок 3 — Прогресивні схемні рішення систем приводів з шланговими пневмодвигунами: система з незалежною роботою окремих пар приводів (а), система 5-ти приводів, що забезпечує рівномірне сприйняття зусиль в різних напрямках (б)

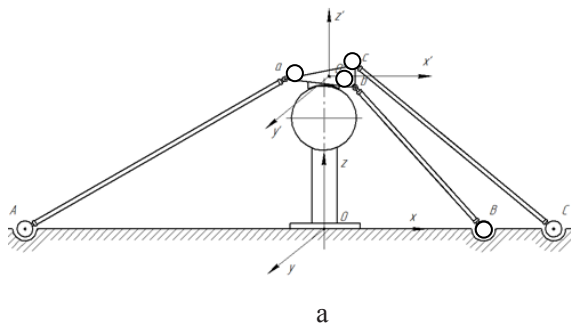


Рисунок 4 — Схема (а) та конструктивна реалізація (б) системи приводів із шланговими пневмодвигунами, яка призначена для переміщення виконавчого органа сферичною поверхню

Технологічне обладнання із даним приводом забезпечує вібраційне переміщення деталей по сферичній поверхні. Воно призначене для використання у пристроях абразивної доводки та полірування сферичних поверхонь.

Розроблено схемні і конструктивні рішення просторових систем приводів із шланговими пневмодвигунами. Вони реалізовані на основі просторових радіальних структур (рисунок 5).

Шлангові пневмодвигуни в просторових системах потребують попереднього натягу. Це здійснюється спеціальними механічними пристроями, які компенсують видовження привода в початковому стані (при нульовому тиску) в порожнині шлангового пневмодвигуна.

Статичні характеристики шлангових пневмодвигунів

Застосування шлангових пневмодвигунів здійснено на основі дослідження їх статичних характеристик. Пневмодвигун являє собою складну пружно-деформовану систему, що включає армовану композитну оболонку [6]. Тому визначення статичних характеристик пневмодвигуна здійснено різними методами. При цьому визначено як вигляд і числові значення характеристик, так і механізм

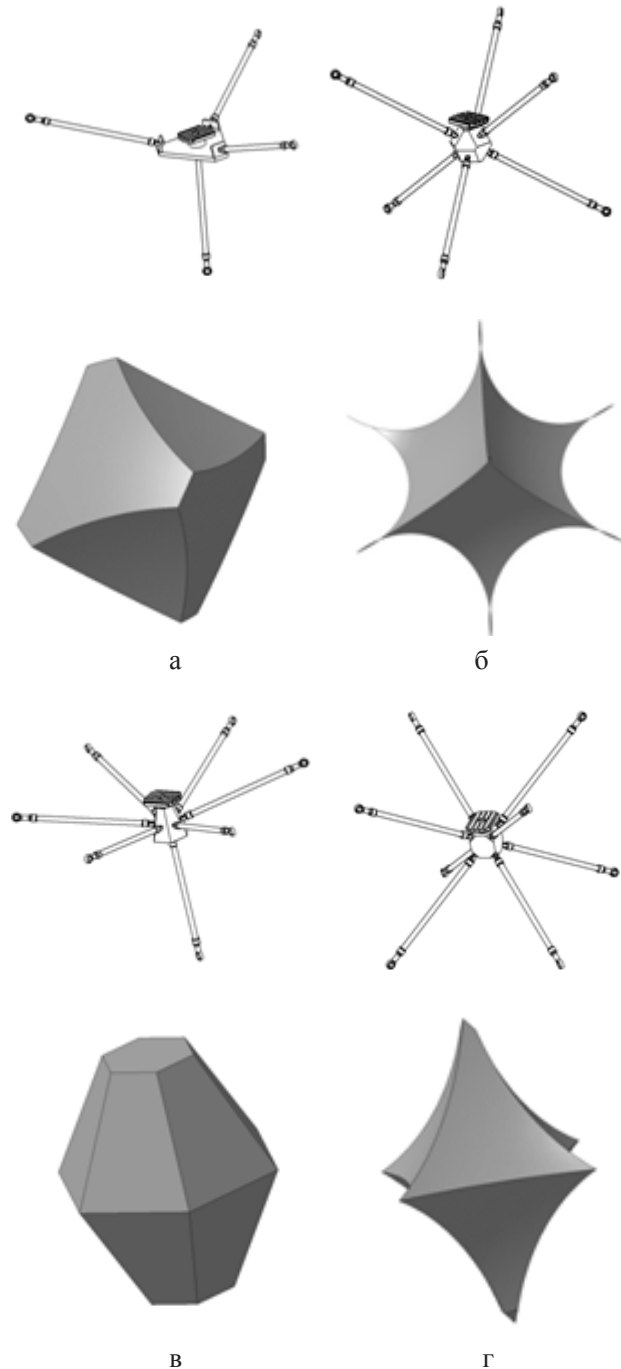
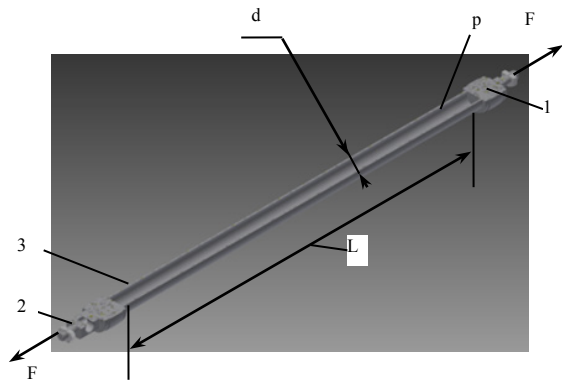
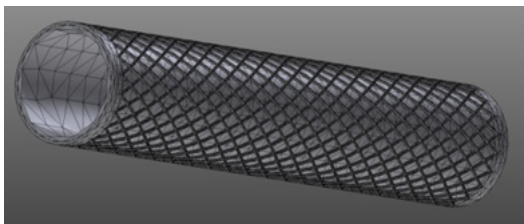


Рисунок 5 — Схемні рішення просторових систем приводів із шланговими пневмодвигунами та форми робочого простору, відповідні даним схемам: трьох координатна система приводів (а), п'ятикоординатна система (б), шести координатна система (в), система з надлишковими приводами (г)

формування особливостей характеристик та фізичні процеси, які дані особливості обумовлюють. Теоретичні методи досліджень базуються на розрахунках напружено-деформованого стану оболонки методом кінцевих елементів. Для реалізації метода розроблено твердотільну модель деформованої пружної оболонки, яку доповнено твердотільною моделлю у вигляді сітки армуючих волокон.



а



б

Рисунок 6 — Твердотільна модель шлангового пневмодвигуна (а) та розбивка композитної гумо-кевларової оболонки на кінцеві елементи (б)

Шланговий пневмодвигун має жорсткі кінцеві частини, в одній із яких виконано отвір для підведення повітря до еластичного корпусу 3 (рисунок 6, а).

Корпус армований кевларовими волокнами, що утворюють ромбовидну структуру (рисунок 6, б).

Шланговий пневмодвигун має особливі статичні характеристики. Довжина його активної частини L визначається не лише тиском p у порожнині пневмодвигуна, а і зовнішнім розтягуючим навантаженням F , що діє на нього. Для оцінки статичних характеристик пневмодвигуна проведено спеціальні дослідження. Вони ґрунтуються на аналізі робочих процесів, що мають місце при роботі пневмодвигуна. Для загальної оцінки процесу деформування корпусу виконано розрахунки оболонки методом кінцевих елементів. При цьому прийнято, що корпус виконано із однорідного деформованого матеріалу. Армуючу сітку розглянуто окремо. Для неї застосовано спеціальні кінцеві елементи (рисунок 6, б).

При розрахунках задавався тиск p у порожнині пневмодвигуна та значення зусилля F . У результаті розрахунків визначалась загальна зміна довжини привода (рисунок 7).

Розрахунки проведено при значеннях тиску 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 МПа при зусиллях розтягування 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400 Н. Силкові статичні характеристики привода, отримані через розрахунки методом кінцевих елементів (показано точками), визначають взаємозв'язок зусилля F та відносного скорочення привода $\Delta = \Delta L / \Delta L_0$ при фіксованих значеннях тиску в порожнині пневмодвигуна (рисунок 8).

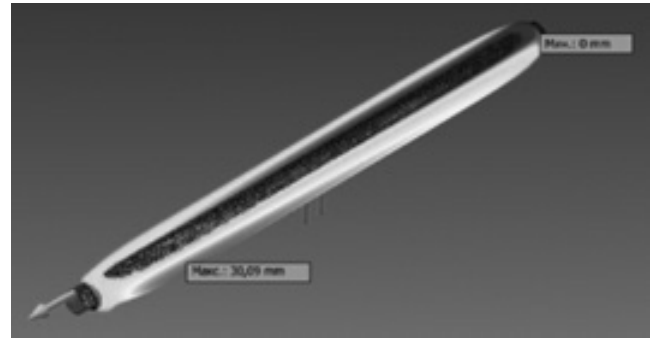


Рисунок 7 — Визначення зміни довжини шлангового пневмодвигуна шляхом розрахунку напружено-деформованого стану оболонки по заданому зусиллю розтягу та заданому тиску в порожнині пневмодвигуна

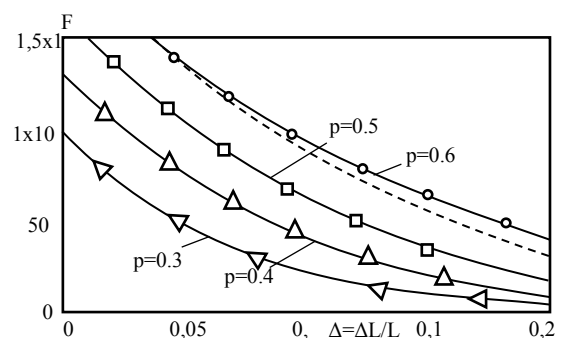


Рисунок 8 — Розраховані методом кінцевих елементів силкові статичні характеристики шлангового пневмодвигуна (точки) та їх апроксимація аналітичною залежністю (суцільні лінії)

Одержані розрахункові значення характеристик апроксимовано аналітичними залежностями. З достатньою для практики точністю набір характеристик описано функцією двох змінних

$$F(p, \Delta) = \frac{F_m}{p} \left[K_p \frac{\Delta}{1 + c_p \Delta p^{-2}} - c_p \cdot p \right]^2, \quad (1)$$

де F_m, K_p, c_p, c_p — константи, вибрані із умови найкращого наближення аналітичної залежності до точкових значень характеристики.

Недоліком формули (1) є суттєва нелінійність функції двох змінних F по аргументах p і Δ . Тому залежність (1) наближено описана спрощеною формулою

$$p(F, \Delta) = (F - F_0) \frac{(\Delta + C_\Delta)}{K_p}, \quad (2)$$

де F_0, K_p і c_Δ — константи.

Результати розрахунків за формулою (2) показано на рисунку 8 пунктирною лінією. Вона є близькою до розрахунку за формулою (1), якому відповідають суцільні лінії.

Розрахункові значення характеристики у вигляді взаємозв'язку тиску і зусилля є близькими до лінійних і

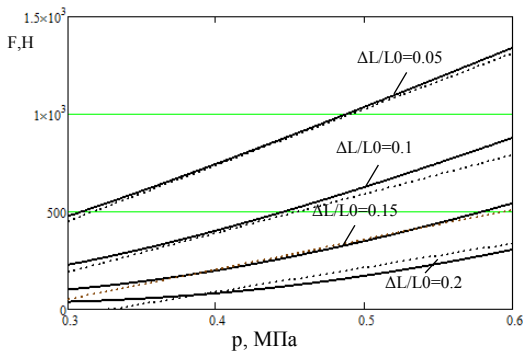


Рисунок 9 — Статична силова характеристика оболонки шлангового пневмодвигуна у вигляді залежностей зусилля від тиску при фіксованих скороченнях пневмодвигуна

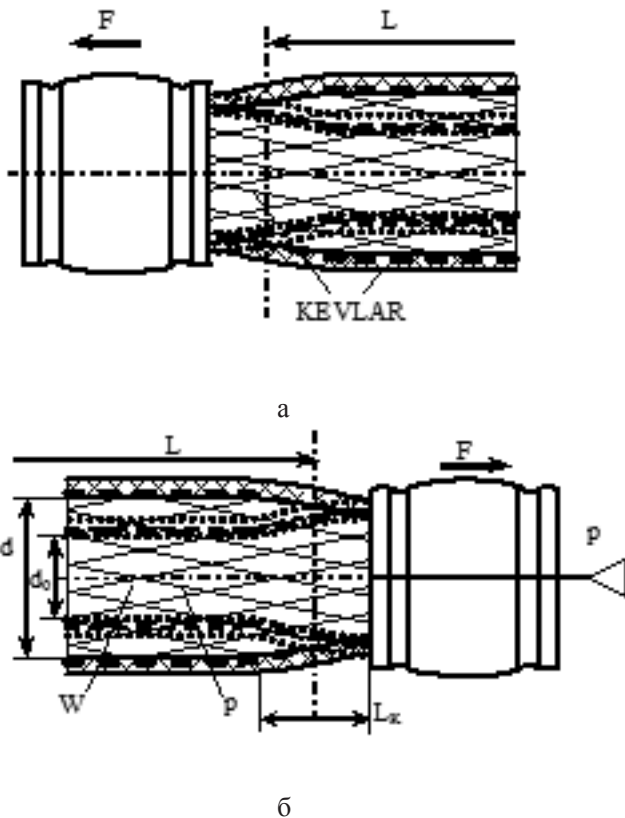


Рисунок 10 — Конструктивна схема шлангового пневмодвигуна та його основні геометричні розміри

описано функцією двох змінних

$$p(F, \Delta) = p_m - K_F \frac{K_1(K_2 - \Delta)^2 - F}{K_2((K_2 - \Delta)^2 - F_0)} \quad (3)$$

де $p_m, K_F, K_1, K_2, K_3, F_0$ — константи.

Аналогічну залежність одержано з (2) розв'язком відносно значення тиску

$$p(F, \Delta) = (F - F_0) \frac{(\Delta + C_\Delta)}{K_p} \quad (4)$$

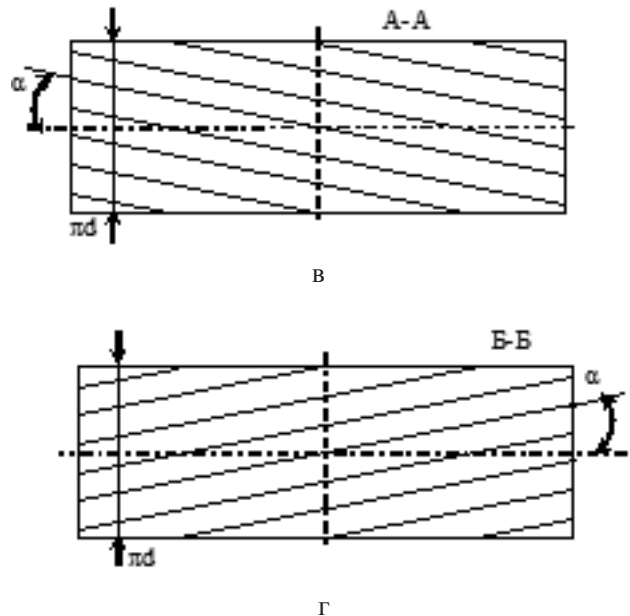
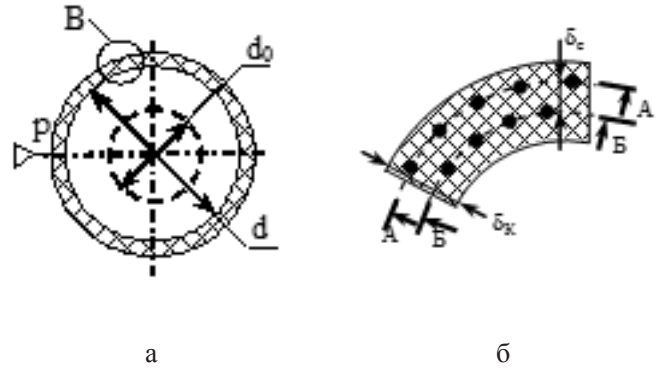


Рисунок 11 — Перетин еластичної оболонки (а), армування оболонки в перетині (б) та розгортка оболонки по зовнішньому і внутрішньому шарам кевларових ниток (в, г)

Залежності (3) і (4) близькі за значенням і визначають близький до лінійного зв'язок тиску в порожнині шлангового пневмодвигуна із зусиллям, яке він сприймає (суцільні лінії на рисунку 9).

Дані лінійні залежності близькі до розрахованих методом кінцевих елементів.

Робочий процес деформації композитного корпусу пневмодвигуна визначає його статичні і динамічні характеристики. Еластична оболонка корпусу має складну конструкцію та армувана сіткою із високоміцного кевларового волокна (рисунок 10).

У початковому положенні при нульовому тиску в порожнині діаметр оболонки складає d_0 , а довжина $L=L_0$.

Підвищення тиску в порожнині пневмодвигуна до значення p призводить до деформації оболонки у діаметральному напрямку і збільшення діаметра до величини d . Еластичну оболонку армувано високоміцними нитками із кевларового волокна. Згідно патенту [6] нитки розміщені в перетині оболонки по шарам 1 і 2 та розташовані по гвинтовим лініям відносно осі оболонки (рисунок 11).

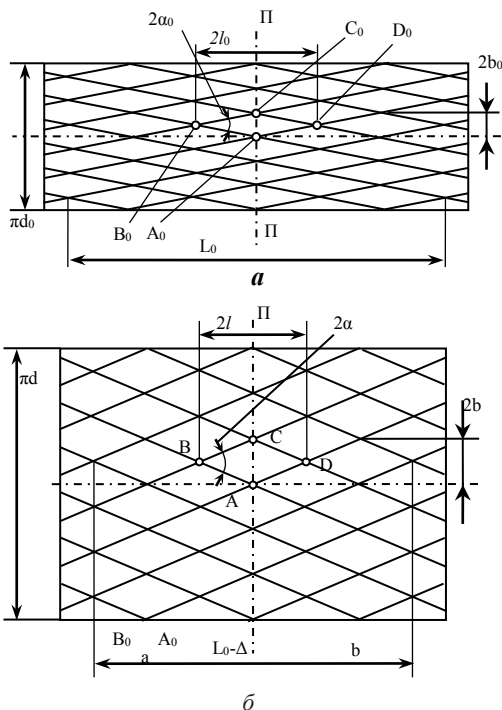


Рисунок 12 — Розгортка структури кевларової сітки ділянки поверхні шлангового пневмодвигуна при нульовому тиску (а) та при тиску p (б)

У розгортці оболонки нитки мають вигляд прямих, нахилених під кутом α відносно осі оболонки. Враховуючи незначну відстань δ_c між шарами ниток можна прийняти, що нитки обох шарів утворюють структуру, яка складена із ромбів, довгі діагоналі яких $2l$ орієнтовані по осі оболонки (рисунок 12).

Менші діагоналі ромбів $2b$ орієнтовані у тангенціальному відносно осі оболонки напрямку.

Високоміцні малодеформовані нитки незначно змінюють свою довжину при деформації оболонки, тому можна вважати, що сторона ромба залишається незмінною при деформації оболонки, тобто

$$A_0B_0 = AB = a = \text{const.}$$

У початковому положенні периметр сітки має довжину πd_0 , де d_0 — діаметр циліндра, що відповідає недеформованій кевларовій сітці. У перетині П-П корпусу пневмодвигуна наявні k елементарних ромбічних елементів сітки $A_0B_0C_0D_0$, розміри менших діагоналей яких складають

$$A_0B_0 = 2b_0 = \pi d_0 / k.$$

Більші діагоналі ромбів визначаються кількістю m елементарних ромбічних ділянок по довжині L привода і визначаються залежністю

$$B_0D_0 = 2l_0 = L_0 / m.$$

У початковому положенні кут між сторонами ромба складає $2\alpha_0$ і зв'язаний з довжиною діагоналей залежністю

$$\alpha_0 = \arctg \frac{b_0}{l_0}.$$

При подачі повітря до порожнини пневмодвигуна тиск у ній підвищується і оболонка деформується. Через це збільшується діаметр оболонки d та відповідно збільшується периметр оболонки.

При підвищенні тиску сітка змінює свою форму, розширюючи ширину ромбів і скорочуючи їх довжину (рисунок 12, б).

Менша діагональ ромба зв'язана із діаметром деформованої оболонки

$$AC = 2b = \pi d / k. \quad (5)$$

Враховуючи, що сторона ромба a залишається незмінною, більша діагональ ромба зменшуватиметься і складатиме

$$BC = 2l = (L_0 - \Delta) / m \quad l < l_0 \quad (6)$$

де Δ — загальне скорочення шлангового пневмодвигуна.

Враховуючи, що сторона ромба a має постійне значення, одержимо зв'язок діагоналей у вигляді:

$$b^2 + l^2 = a^2. \quad (7)$$

Кут між сторонами ромба залежить від співвідношення діагоналей і складає

$$\alpha = \arctg \frac{b}{l}, \quad \alpha < \alpha_0. \quad (8)$$

Чим менше значення кута між сторонами ромбів, тим більше буде зусилля, яке сприймається пневмодвигуном. Орієнтовні значення раціонального діапазону зміни кутів становитимуть

$$\alpha_0 = 11^\circ 30', \quad \alpha_{\max} = 22^\circ 30'.$$

Розглянемо силові фактори в оболонці шлангового пневмодвигуна.

Виділимо в оболонці ділянку довжиною $2l$ (рисунок 13).

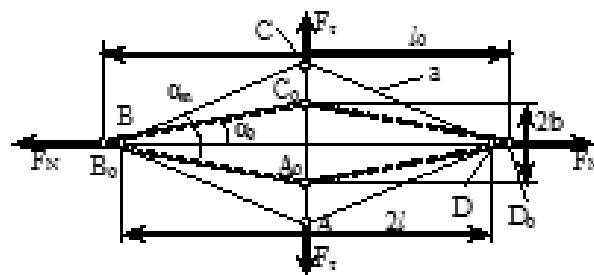


Рисунок 13 — Схема дії зусиль на елементарну ромбічну ділянку кевларової сітки та відповідна деформація ділянки від початкового до поточного положення

На виділену частину оболонки діє сила тиску $2pld$, яка викликає тангенціальне зусилля у корпусі

$$F_\tau = \frac{pld}{2}. \quad (9)$$

Визначимо зусилля, які сприймаються кевларовими нитками. Нитки розташовані по гвинтовим лініям під гострим кутом 2α . Прийемо у якості першого

наближення, що елементарна ромбічна структура ниток близька до шарнірного механізму.

Умовою рівноваги сил у ланках шарнірного механізму є співвідношення:

$$F_{\tau} = F_N \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Використавши геометричне співвідношення (8), визначимо

$$F_N = F_{\tau} \cdot \ell / b.$$

Підставимо в дану залежність значення тангенціального зусилля (9) і одержимо

$$F_N = p \ell^2 \cdot d / b.$$

Підставимо до даної формули значення діагоналей ромба із залежностей (5) та (6) і одержимо

$$F_N = \frac{p(L_0 - \Delta)^2 \cdot k}{2\pi m^2}.$$

Враховуючи, що в поперечному перетині шлангового пневмодвигуна знаходиться k елементарних ромбів, одержимо загальне зусилля в перетині у вигляді:

$$F = k F_N = \frac{k^2}{2\pi m^2} p (L_0 - \Delta)^2. \quad (10)$$

Одержана формула дає результати розрахунків близькі до розрахунків по формулам (1), (2) і (3). Це підтверджує гіпотезу про робочий процес деформації армуючих ниток. Аналітична залежність (10) з достатньою точністю відповідає лінеаризованій статичній характеристиці (рисунок 9, пунктирні лінії).

При виводі аналітичної залежності (10) не враховано вплив характеристик гумотканинної складової оболонки на деформації ромбічної сітки. Із статичної характеристики (рисунок 9) випливає практично лінійний зв'язок зусилля і тиску. Тому можна зробити висновок про незначний вплив гумотканинної складової композитної оболонки на силові характеристики шлангового пневмодвигуна.

Підставимо в статичну характеристику (10) значення кількості ромбів по периметру k із формули (5) та використавши співвідношення (7) та (6), одержимо залежність зусилля від поточного діаметра

$$F = \frac{\pi d^2 p (L_0 - \Delta)^2}{2[4a^2 m^2 - (L_0 - \Delta)^2]}. \quad (11)$$

Прирівняємо праві частини формул (2) та (11) і визначимо із одержаного рівняння залежність поточного діаметра від тиску та зміни довжини привода

$$d = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{F_0}{p} + \frac{K_p}{\Delta + c_A} \right) \left[\frac{4a^2 m^2}{(L_0 - \Delta)^2} - 1 \right]}{}}. \quad (12)$$

Об'єднуючи формули (5) і (8) визначимо залежність діаметра пневмодвигуна від зусилля та тиску у вигляді

$$d = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{2}{\pi} a^2 k^2 - \frac{F}{p} \right)}{\pi}}. \quad (13)$$

Силові характеристики шлангового пневмодвигуна пов'язані із його газостатичними характеристиками. Деформації оболонки шлангового пневмодвигуна призводять до зміни об'єму повітря у його порожнині.

Об'єм порожнини пневмодвигуна як об'єм еквівалентного циліндра складатиме

$$W = \frac{\pi d^2}{4} (L_0 - \Delta).$$

Підставивши в дану формулу значення діаметра із формули (12) визначимо залежність об'єму від зміни довжини привода та тиску в його порожнині

$$W = \frac{(L_0 - \Delta)}{2} \left(\frac{F_0}{p} + \frac{K_p}{\Delta + c_A} \right) \left[\frac{4a^2 m^2}{(L_0 - \Delta)^2} - 1 \right].$$

Маса повітря в порожнині шлангового пневмодвигуна складатиме

$$G = W \cdot \rho.$$

де ρ — густина повітря, яка залежатиме від тиску.

Дослідження властивостей оболонки шлангового пневмодвигуна при згині

Шланговий пневмодвигун допускає обмежені поперечно-кутові переміщення. Для визначення характеристик поперечно-кутової жорсткості пневмодвигуна при згині проведено спеціальні дослідження. Для цього система трьох шлангових пневмодвигунів, розміщених в одній площині, до яких підведено тиск p , навантажувалась силою Q , перпендикулярною площині приводів (рисунок 14).

Шлангові пневмодвигуни жорстко закріплено на рухомій платформі і шарнірно закріплено на нерухомій основі. До усіх пневмодвигунів підводився однаковий тиск повітря, і система входила до стану статичної рівноваги. Здійснювалось навантаження системи силою Q , під дією якої платформа системи зміщувалась на величину δ . При зміщенні платформи має місце реакція привода як пружної балки, величина якої [7] становить

$$Q_z = \frac{3E_c I \delta}{L^3}.$$

де I — момент інерції кільцевого поперечного перетину трубчастого корпусу пневмодвигуна, E — еквівалентний статичний модуль пружності композитної оболонки.

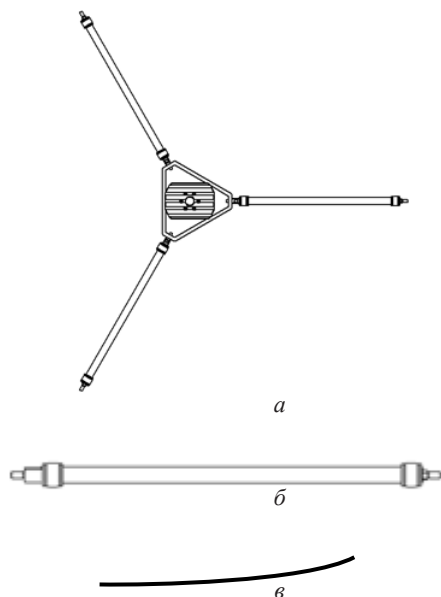


Рисунок 14 — Система трьох шлангових пневмодвигунів при вигляді згори (а) і вигляді збоку (б) та схема деформації пневмодвигуна (в)

При деформації пневмодвигуна шарнірно закріплений кінець повертається на кут, який дорівнює [7]

$$\theta = \frac{Q_z L^2}{2E_c I} = \frac{3 \delta}{2 L}$$

Складемо рівняння статичної рівноваги системи приводів при переміщенні:

$$Q = 3(Q_z + F \cdot \sin \theta) = 3(Q_z + F\theta),$$

де F — зусилля в пневмодвигуні.

$$Q = 3 \cdot \left[\frac{3E_c I \cdot \delta}{L^3} + F \cdot \frac{3 \delta}{2 L} \right]. \quad (14)$$

Із даного рівняння знаходиться значення еквівалентного статичного модуля пружності матеріалу оболонки при згині:

$$E_c = \left(Q - \frac{9\delta}{2L} F \right) \frac{L^3}{9\delta \cdot I}$$

Момент інерції перетину кільцевої оболонки внутрішнім діаметром d_1 , а зовнішнім d_2 дорівнює

$$I = \frac{\pi}{64} (d_2^4 - d_1^4)$$

Діагностика значення еквівалентного статичного модуля $E_c = \left(Q - \frac{9\delta F}{2L} \right) \frac{L^3 \cdot 64}{9\pi (d_2^4 - d_1^4)}$

У даній формулі параметри Q, δ, d_1, d_2, L допускають безпосередні виміри.

Для вимірів зусилля Q та переміщення δ плоска система приводів (рисунок 2, б) навантажувалась силою, яка вимірювалась динамометром.

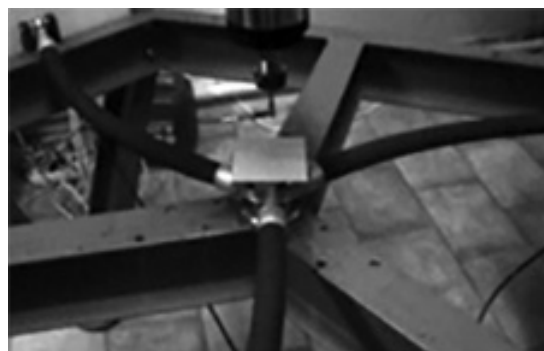
Значення зусилля в пневмодвигуні F знаходилось по статичній характеристиці в залежності від тиску p , а внутрішній діаметр обчислювався за формулою, де t — відома товщина стінки.

В результаті обчислень знайдено значення еквівалентного статичного модуля пружності

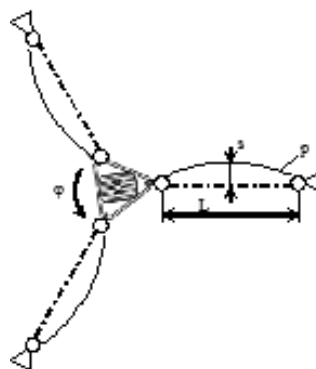
$$E = (1,8 - 1,9) \cdot 10^3 \text{ МПа.}$$

Значення модуля пружності набагато вище модуля пружності гумотканинної оболонки пневмодвигуна.

Проведені дослідження нелінійних характеристик пневмодвигуна при згині. Для цього здійснено визначення стійкості оболонки пневмодвигуна при згині. Платформа системи приводів із трьома пневмодвигунами закручувалась на деякий кут φ і вимірювалась стріла прогину пневмодвигуна при різних значеннях тиску p в його порожнині (рисунок 15).



а



б

Рисунок 15 — Визначення прогину пневмодвигунів при наявності змінного тиску в їх порожнинах: а — зовнішній вигляд зігнутих пневмодвигунів, б — схема вимірів стріли прогину пневмодвигуна

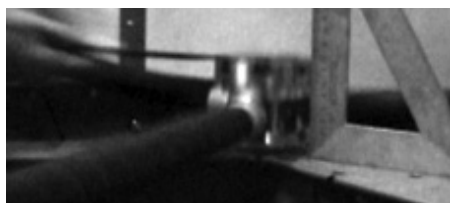
При відсутності тиску в порожнині стійкість втрачається при стрілі прогину оболонки $s/L=2-5\%$ від довжини пневмодвигуна. Наявність тиску в порожнині суттєво

підвищує стійкість оболонки. При тиску 0,6 МПа відносна стріла прогину s/L збільшується до 10–18%.

Динамічні характеристики шлангових пневмодвигунів у складі систем приводів

Шланговий пневмодвигун основною ча-стиною якого є пружна композитна оболонка є складною динамічною системою із нелінійними характеристиками. Динамічні властивості пневмодвигуна визначено теоретично-експериментальними методами. Розглянуто динамічні характеристики пневмодвигуна при його малих поперечних коливаннях.

Для експериментального визначення динамічного модуля пружності та параметра згасання малих поперечних коливань шлангового пневмодвигуна проведені експериментальні дослідження перехідних процесів. Розглянута вище система приводів із трьох пневмодвигунів навантажувалась поперечною статичною силою, яка потім різко падала до нуля (рисунок 16).



а



б



в

Рисунок 16 — Послідовні кадри відео зйомки при вимірах динамічних переміщень просторової системи приводів із трьома шланговими пневмодвигунами:

а — початкове положення системи, б — положення систем при максимальному переміщенні вгору, в — положення систем у кінці першого періода коливань

Виміри поточного положення платформи проводились відносно лінійки по кожному кадру відеозйомки, здійсненому з періодичністю 25 кадрів за секунду. Одержані точки згладжені плавною кривою, яка визначає перехідний процес при малих коливаннях системи (рисунок 17).

Із аналізу експериментальних даних випливає, що перехідний процес є загасаючою кривою, близькою до синусоїди. Періоди коливань ТК1-ТК4 відрізняються не більше ніж на 10%. Тому запропоновано математичний

опис системи приводів із шланговими пневмодвигунами у вигляді осцилятора другого порядку [8]. Відповідно рівняння динамічної рівноваги системи трьох шлангових пневмодвигунів при її коливаннях у напрямку, перпендикулярному площині приводів, записано у вигляді

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = Q_0(t) - Q_s - 3b_s \frac{dz}{dt}, \quad (15)$$

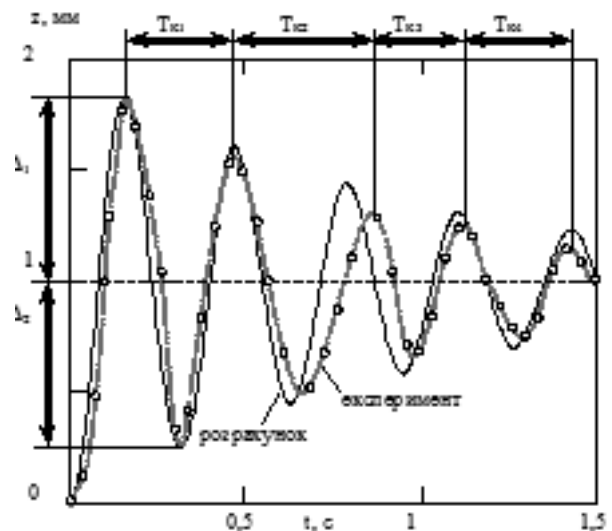


Рисунок 17 — Експериментально визначений (точки) перехідний процес системи приводів із шланговими пневмодвигунами та розрахунок за формулою (15) (суцільна крива)

де m — маса платформи, z — переміщення платформи у вертикальному напрямку, b_s — коефіцієнт опору одного пневмодвигуна при поперечних переміщеннях, Q_0 — сила, обумовлена деформаціями усіх трьох пневмодвигунів. Зовнішнє динамічне навантаження прийнято у вигляді ступінчастої зміни зусилля

$$Q_0(t) = \begin{cases} Q_s \text{ при } t < 0 \\ 0 \text{ при } t \geq 0 \end{cases}$$

Силу, обумовлену деформаціями шлангового пневмодвигуна, визначимо за формулою статичної (14), враховуючи відмінність статичного і динамічного модулів пружності,

$$Q = cz, \quad c = \frac{9E_0I}{L^3} + \frac{9F}{2L}. \quad (16)$$

Приведемо рівняння (15) до стандартного вигляду. Для цього введемо нові константи і одержимо

$$T^2 \frac{d^2 z}{dt^2} + 2\xi T \frac{dz}{dt} + z = K \cdot l(t), \quad (17)$$

де $T = \sqrt{\frac{m}{c}}$, $\xi = \frac{3b}{2\sqrt{m}}$, $K = \frac{Q_s}{c} = z_0$, а $l(t)$ — одинична ступінчаста функція.

Рівняння (16) має нульові початкові умови: при $t = 0, z = 0, dz/dt = 0$.

Розв'язок рівняння (17) згідно [8]

$$z(t) = z_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{I}{\sqrt{I - \xi^2}} \cdot e^{-\frac{\xi t}{T}} \times \\ \times \sin \left[\frac{\sqrt{I - \xi^2}}{T} \cdot t + \right. \\ \left. + \arctg \sqrt{\frac{I}{\xi^2} - 1} \right] \end{array} \right\} \quad (18)$$

Рівняння (17) враховує параметри T, ξ, \ddot{x} визначено за експериментальними вимірами динамічних переміщень системи (рисунок 17).

Для визначення параметра затухання ξ у формулі (18) знайдено логарифмічний декремент коливань за експериментальним перехідним процесом. Визначено логарифм відношення експериментальних відхилень перехідної функції від усталеного значення Δ_1 та Δ_2 . Параметр затухання визначено на основі залежності

$$\xi = \frac{\sqrt{I - \xi^2}}{\pi} \ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}$$

Параметр затухання є незначним і складає $\xi = 0,038 - 0,042$.

Постійну часу T , що входить до формули (17) знайдено за результатами вимірів періода коливань T_k перехідної функції на основі залежності [8]

$$T = \frac{T_k}{2\pi} \sqrt{I - \xi^2} \quad (19)$$

Для підвищення точності опису перехідного процесу на найбільш важливій початковій ділянці у формулу (19) підставлено значення першого періода $T_k = T_{k1}$. Відповідно з формули (19) одержано значення постійної часу $T \cong 0,5$ с.

Розрахунок по формулі (17) переміщення виконавчого органа системи при одержаних значеннях параметрів відповідає коливальному процесу із незначним затуханням (рисунок 17 — суцільна крива).

Одержані значення постійних T і ξ послужили основою для розрахунку еквівалентного динамічного модуля пружності шлангового пневмодвигуна. Об'єднуючи залежність (16) і значення константи T , що входить до рівняння (17), одержимо формулу для розрахунку динамічного модуля пружності оболонки шлангового пневмодвигуна при згині:

$$E_s = \frac{L^3}{I} \left(\frac{m}{qT^2} - \frac{F}{2L} \right)$$

Розрахунок за даною формулою дає значення динамічного модуля пружності $E_s = 2,4 \cdot 10^3$ МПа. Це на 30–40% більше значення еквівалентного статичного

модуля пружності. Підвищення модуля пружності у динаміці можна пояснити позитивним впливом гумотканинної частини композитної оболонки шлангового пневмодвигуна.

Розроблені дослідні зразки просторових систем приводів на основі шлангових пневмодвигунів

На основі проведених досліджень характеристик шлангових пневмодвигунів розроблені та апробовані просторові системи приводів на їх основі [9].

Розроблено просторову систему приводів із шланговими пневмодвигунами, яка призначена для обмеженого вібраційного переміщення об'єктів у просторі за траєкторіями, що охоплюють ділянку сфери.

Система має платформу 1, на якій встановлюється об'єкт маніпулювання (рисунок 18).

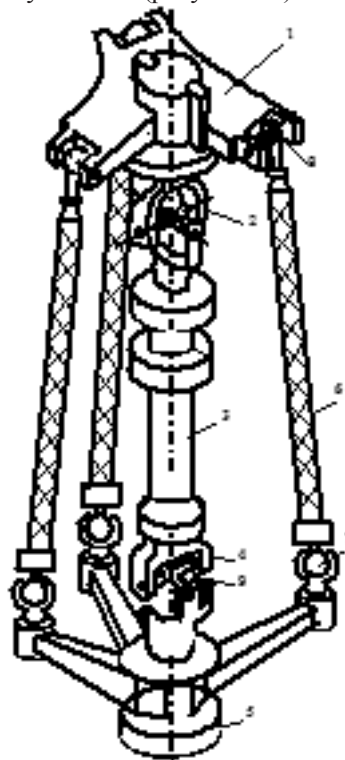


Рисунок 18 — Конструктивна схема розробленої просторової системи приводів із шланговими пневмодвигунами

Платформу зєднано карданною опорою 2 із штангою 3, яку нижнім кінцем закріплено на карданному шарнірі 4, встановленому на нерухомій основі 5. Платформа переміщується шланговими пневмодвигунами 6, які мають на своїх кінцях сферичні опори 7 і 8. Кожна карданна опора має пристрої обмеження поперечно-кутового положення у вигляді чотирьох упорів 9. При цьому забезпечується чотири стійких положення кожного шарніра. Регулюванням зусиль в шлангових пневмодвигунах встановлюється необхідне положення платформи.

Розроблену просторову систему приводів із шланговими пневмодвигунами реалізовано у якості дослідного зразка [10] (рисунок 19).



Рисунок 19 — Розроблений дослідний зразок просторової системи приводів із шланговими пневмодвигунами

Дослідний зразок включає мехатронну систему керування і забезпечує рух виконавчого органу по необхідному закону. Просторова система приводів має складну кінематику. Шлангові пневмодвигуни забезпечують постійний натяг в системі. Відповідно вибираються люфти і зазори в рухомих з'єднаннях системи приводів. При переключенні пневмодвигунів карданні шарніри встановлюються на упори. Кожний карданний шарнір має чотири стійкі положення. Тому платформа системи приводів фіксується в чотирьох положеннях. Внаслідок динамічних навантажень платформа здійснює складні колові рухи.

Висновки

1. Доведено, що на основі шлангових пневмодвигунів реалізуються ефективні плоскі та просторові системи приводів радіального типу з робочим простором у вигляді криволінійної просторової фігури, максимальний розмір якої може досягати 20% від загальної довжини окремого шлангового пневмоприводу. Для забезпечення початкового натягу пневмодвигунів необхідні спеціальні механічні пристрої.

2. Статична силова характеристика шлангового пневмодвигуна нелінійним чином залежить від його

видовження. Запропоновані аналітичні залежності визначають характеристики з точністю 5–7%. Спрощена залежність визначає близький до лінійного зв'язок тиску в порожнині пневмодвигуна та зусилля, яке він розвиває з точністю 5–10%.

3. Шлангові пневмодвигуни допускають обмежені згинальні деформації. Допустима із умови втрата стійкості форми композитної оболонки пневмодвигуна стріла його прогину змінюється від 2–5% до 10–18% при підвищенні тиску в порожнині пневмодвигуна від нульового до максимального.

4. На основі шлангових пневмодвигунів можуть бути реалізовані ефективні просторові системи приводів з паралельними кінематичними структурами, призначені для використання в динамічних системах маніпулювання.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується провести оптимізацію схемного і конструктивного рішення демпфера із ферромагнітною рідиною.

Література

1. Сяньвень Кун. Структурный синтез параллельных механизмов/ Сяньвень Кун, Кле-мент Госселин. — М.: Физматлит, 2012. — 275 с.

2. Кузнецов, Ю.М. Компоновка верстатів з механізмами паралельної структури. Монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич. — Херсон, 2009. — 456 с.

3. Струтинський, С.В. Просторові системи приводів: Монографія / С.В. Струтинський, А.А. Гуржій. — К.: Педагогічна думка, 2013. — 492 с.

4. Рыбак, Л.А. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры/Л.А. Рыбак, В.В. Ержуков, А.В. Чичварин. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 148 с.

5. Пашков Е.В. Промышленные мехатронные системы на основе пневмоприводов / Е.В. Пашков, Ю.А.Осинский. — Севастополь: НТУ, 2007. — 401 с.

6. Dieter Bergemann, Bernd Lozenz, Axel Thallemer. Actuating Means/ Патент США US №6349746 В1 МПК F16L55/12, заявл. 04.03.2000, опубл. 21.11.2000.

7. Беляев, Н.М. Соппротивление материалов Изд. 9 стереотипное. / Н.М. Беляев. — М.:Машиностроение, 1964. — 856 с.

8. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — М.: Наука, 1972. — 768 с.

9. Струтинський С.В. Математичне моделювання динамічних сферичних рухів у просторових системах приводів із шланговими пневмодвигунами. Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування / С.В.Струтинський. — № 2 (68). — К., 2013. — С.139—147.

10. Yakhno, O. Characteristic parameters of spherical motions in the spatial drive system / International scientific conference "Unitech 2013 Gabrovo" — Proceedings / O. Yakhno, S.Strutinskiy. — vol. III, pp. 295—303.

References

1. Syanven Kun, Klement Gosselin Strukturny sintez parallelnykh mekhanizmov. — М.: Fizmatlit, 2012. — 275 s.
2. Kuznyetsov, Yu.M., Dmytriyev, D.O., Dinevych, G. Yu. Komponentka verstativ z mekhanizmy paralelnoi struktury. Monografiya. — Herson, 2009. — 456 s.
3. Strutinskiy, S.V. Prostorovi systemy pryvodiv: Monografiya / S.V. Strutinskiy, A.A. Gurzhiy. — К.: Pedagogichna dumka, 2013. — 492 s.
4. Rybak, L.A., Erzhukov, V.V., Chichvarin, A.V. Efektivnye metody resheniya zadach kinematiki i dinamiki robota-stanka paralelnoi struktury. — М.: FIZMATLIT, 2011. — 148 s.
5. Pashkov, E.V. Promyshlennyye mekhatronnyye systemy na osnove pnevmopryvodov / E.V. Pashkov, Yu.A. Osynskiy. — Sevastopol: SevNTU, 2007. — 401 s.
6. Dieter Bergemann, Bernd Lozenz, Axel Thallemer. Actuating Means/ Патент США US №6349746 В1 МПК F16L55/12, 21.11.2000.
7. Beliaev, N.M. Soprotivlenye materyalov. Yzd.9 stereotipnoe. — М.: Mashynostroenye, 1964. — 856 s.
8. Besekerskiy, V.A., Popov, E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. — М.: Nauka, 1972. — 768 s.
9. Strutynskiy, S.V. Matematychnye modelyuvannia dynamichnykh sferychnykh rukhiv u prostoroovykh systemakh pryvodiv iz shlangovymy pnevmodygunamy / VisnykNTUU «Kyivsky politekhnichny instytut», seria Mashynobuduvannya. — № 2 (68). — К., 2013. — S.139—147.
10. Yakhno, O. Characteristic parameters of spherical motions in the spatial drive system / International scientific conference “Unitech 2013 Gabrovo” — Proceedings / O. Yakhno, S. Strutinskiy. — vol. III, pp. 295—303.

Надійшла 27.10.2015 року

УДК 621.9.04

Характеристики шланговых пневмодвигателей примененных в пространственных системах приводов с параллельными кинематическими структурами

**С.В. Струтинский,
И.В. Ночниченко,
О.С. Галецкий**

Определены статические и динамические характеристики шланговых пневмодвигателей предназначенных для использования в пространственных системах приводов. Для этого проведен расчет напряженно-деформированного состояния пневмодвигателей на основе которого определены статические характеристики. Установлены закономерности рабочих процессов деформации композитной оболочки. Проведены исследования поперечных (изгибных) деформаций оболочки и определены ее эквивалентные статические и динамические модули упругости. Разработаны и апробированы опытные образцы пространственных систем приводов со шланговыми пневмодвигателями.

Ключевые слова: шланговые пневмодвигатели, пространственные системы, статические характеристики, поперечные деформации, динамические характеристики, опытные образцы систем.

UDC 621.9.04

The hose pneumatic actuators characteristics of which are used in spatial drive systems with parallel kinematics structures

**S.V. Strutinskiy,
I.V. Nochnichenko,
O.S. Galetskiy**

The static and dynamic characteristics of the hose pneumatic actuators that are used in spatial drive systems were found out. In order to achieve this goal the stress-strain state calculation of pneumatic engine was done. The static characteristics were determined on the base of these calculations. The regularities of composite shell workflow strain were set. The investigations of the transverse (bending) deformations of the shell were done and its equivalent static and dynamic modulus of elasticity were determined. The prototypes of spatial drive systems with hose pneumatic actuators were developed and tested.

Keywords: hose pneumatic actuators, spatial systems, static characteristics, transverse strain, dynamic characteristics, prototypes of system.