

УДК 621.9.02

Струтинський С.В., к.т.н.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СФЕРИЧНИХ РУХІВ У ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМАХ ПРИВОДІВ ІЗ ШЛАНГОВИМИ ПНЕВМОДВИГУНАМИ

Strutins'kij S.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (strutvnskvi@gmail.com)

MATHEMATICAL SIMULATION OF DYNAMIC SPHERICAL MOVEMENTS IN SPATIAL SYSTEM DRIVES WITH HOSE PNEUMATIC ACTUATORS

Обґрунтована актуальність розробки просторових систем приводів із шланговими пневмодвигунами. Показано, що ефективним методом досліджень даних систем є математичне моделювання. В результаті аналізу літературних джерел обґрунтовано напрямок досліджень у вигляді розробки математичної моделі у вигляді ланцюгових парціальних динамічних систем сферичного руху.

Розглянуто особливості розробленої просторової системи приводів із шланговими пневмодвигунами. На основі запропонованої динамічної моделі складена система диференціальних рівнянь сферичного руху окремих парціальних підсистем.

Розроблена структурна математична модель та проведені розрахунки переміщення полюса платформи. Розрахунки виконано для різних початкових умов та різних схемах навантаження. Показано, що при постановці системи на упор виникають циклічні кільцеві переміщення платформи. При цьому траєкторія має вкладені цикли, які обумовлені різницею частот парціальних підсистем платформи і штанги. Виконано аналіз постановки системи на упор. Показано, що траєкторія переміщення полюса платформи в даному випадку знаходиться в межах полюса, яка має петлеподібний характер. Циклічні високочастотні сферичні переміщення платформи знаходять в межах вказаної полоси.

Ключові слова: конструкція, сферичний рух, динамічна модель, рівняння, моделювання, циклічний рух, петлеподібний рух.

Вступ

Просторові системи приводів є перспективним технологічним обладнанням. До їх недоліків відноситься наявність значного числа рухомих з'єднань, а, відповідно, люфтів і зазорів у даних з'єднаннях. Велика кількість з'єднань приводить до погіршення динамічних характеристик просторової системи приводів. Тому дослідження, направлені на поліпшення динамічних характеристик просторових систем приводів, є актуальними.

Проблема в загальному вигляді полягає в забезпеченні необхідних динамічних характеристик просторових систем приводів. Для вирішення вказаної проблеми застосовують різні методи. Один із них полягає у створенні попереднього натягу в системі приводів. Визначення динамічних характеристик таких систем ефективно здійснюється методами математичного моделювання.

Проблема створення просторових систем приводів пов'язана із важливим науковим і практичним завданням розробки прогресивного технологічного обладнання, зокрема пристроїв маніпулювання об'єктами машинобудування.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведена значна кількість схемних і конструктивних рішень просторових систем приводів [1]. Наявні різні підходи до дослідження динаміки просторових систем приводів [2]. Як правило, розглядаються поступальні рухи елементів приводів [3]. В ряді робіт наведені результати експериментальних досліджень по вимірам перехідних процесів при плоскому русі приводів [4]. В окремих публікаціях розглянуто переміщення приводів у вигляді твердого тіла, яке здійснює сферичний рух [5].

Результатів досліджень, які використовують динамічні моделі у вигляді набору твердих тіл із сферичними рухами, в літературних джерелах не виявлено. Не виявлено також результатів досліджень динаміки просторових механізмів, які використовують в якості приводів шлангові пневмодвигуни.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься математичне моделювання динамічних сферичних рухів у просторових системах приводів із шланговими пневмодвигунами.

Метою досліджень є розробка математичної моделі просторової системи приводів із шланговими пневмодвигунами та моделювання динамічних переміщень в системах приводів, де наявний сферичний рух окремих елементів.

Задачами досліджень є побудова динамічної моделі системи приводів у вигляді ланцюгових парціальних систем сферичного руху, реалізація математичної моделі у вигляді структури та виконання розрахунків динамічних процесів у просторових системах приводів.

Виклад основного матеріалу досліджень

Особливості конструкції розробленої просторової системи приводів та її динамічна модель

В процесі досліджень розроблено просторові системи приводів. Створені спеціальні конструкції просторових систем приводів, які виключають люфти і зазори у рухомих з'єднаннях. Виключення люфтів і зазорів здійснено шляхом застосування систем попереднього натягу в силових ланцюгах просторової системи приводів. Запропоновано проводити силове замикання і силовий натяг в просторовій системі приводів за допомогою шлангових пневмодвигунів - пневматичних м'язів. При цьому всі люфти і зазори в рухомих з'єднаннях вибираються і система працює під дією знако-постійного навантаження. Цим забезпечуються необхідні динамічні характеристики просторової системи приводів.

Розроблена просторова система приводів із шланговими пневмодвигунами призначена для обмеженого переміщення об'єктів. Система має платформу 1, на якій встановлюється об'єкт маніпулювання (рис.1).

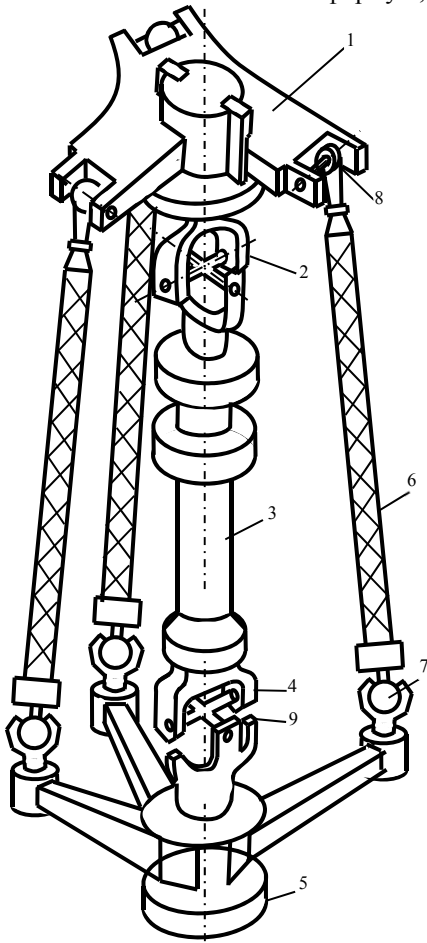


Рис. 1. Конструктивна схема розробленої просторової системи приводів із шланговими пневмодвигунами



Рис. 2. Розроблений дослідний зразок просторової системи приводів із шланговими пневмодвигунами

Платформу з'єднано карданною опорою 2 із штангою 3, яка нижнім кінцем закріплена 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.

Розроблена просторова система приводів із шланговими пневмодвигунами реалізована в якості дослідного зразка (рис. 2). 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 [6]. 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 (рис.3). Внаслідок динамічних навантажень платформа здійснює складні колові рухи.

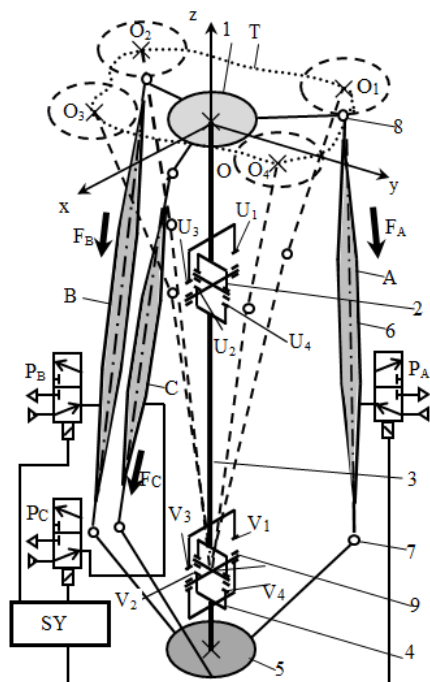


Рис. 3. Принципова схема просторової системи приводів із шланговими пневмодвигунами (позиції на схемі відповідають рис. 1)

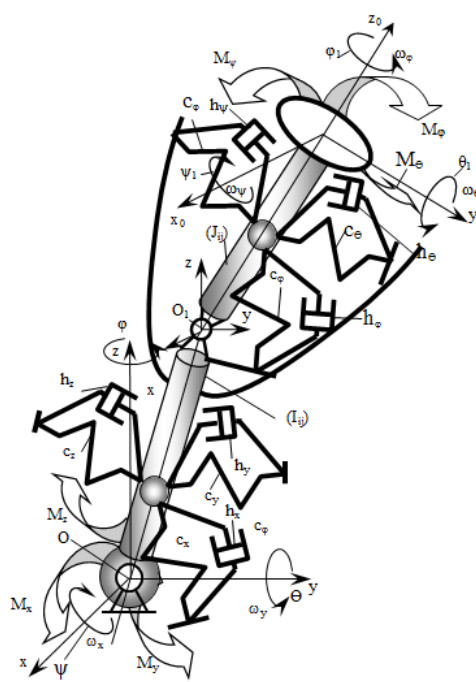


Рис. 4. Динамічна модель просторової системи приводів у вигляді двох парціальних підсистем сферичного руху, з'єднаних по ланцюговій схемі

На рисунку пунктиром показані фіксовані положення платформи при її виході в позиції O_1, O_2, O_3, O_4 та траєкторія переміщення платформи (крива Т).

Шлангові пневмодвигуни забезпечують постійне навантаження на систему приводів. Наявність навантаження приводить до появи специфічних динамічних процесів пов'язаних з тим, що вибрані люфти забезпечують точковий контакт деталей і, відповідно, наявність просторових поперечно-кутових переміщень окремих вузлів в області контакту. Точковий контакт є фіксованим. Тому окремі вузли системи такі, як штанга та платформа здійснюють сферичні рухи відносно точок опирання в контакт.

В процесі досліджень визначено особливості статичних і динамічних переміщень системи приводів. Проведено математичне моделювання динаміки просторової системи приводів. Для цього розроблені спеціальні тензорні математичні моделі сферичного руху окремих вузлів системи. Система подана у вигляді двох динамічних парціальних підсистем сферичного руху, які з'єднані по ланцюговій схемі (рис 4). Перша підсистема включає штангу, яка має на своїх кінцях шарніри. Друга парціальна підсистема сферичного руху включає в себе платформу, яка знаходиться на шарнірній опорі.

Для кожної парціальної динамічної системи створена динамічна модель. Розглянемо першу парціальну динамічну підсистему у вигляді штанги. Штанга має нерухому точку O (шарнір), відносно якої вона обертається. На другому кінці штанги знаходиться шарнір із центром O_1 . При роботі механізму центр шарніра O_1 здійснює просторові переміщення. Просторові поперечно кутові переміщення шарніра визначаються кутами повороту штанги відносно вісей координат φ, θ, ψ . Поперечно-кутові переміщення штанги здійснюються в межах пружних деформацій. Для просторових поперечно-кутових мікропереміщень штанги параметри жорсткості та характеристики опору прийняті лінійними. Відповідно для розрахунку просторових переміщень шарніра O_1 використано лінійну динамічну модель у вигляді твердого тіла із нерухомою точкою O , яке здійснює сферичний рух.

В загальному випадку вісь штанги OO_1 розташована довільним чином відносно декартової прямокутної системи координат $хуз$. Це положення є номінальним положенням штанги для деякого фіксованого стану просторового механізму. Відхилення штанги від номінального положення характеризується трьома кутами (φ, θ, ψ). Ці кути є малими і характеризують просторові мікропереміщення шарніра O_1 в межах деформацій ланок просторового механізму. Інерційні властивості динамічної системи, що включає сферичний шарнір і штангу характеризуються тензором інерції (I_{ij}). Для моделювання змін тензорів інерції парціальних динамічних підсистем сферичного руху запропоновані методи на основі теорії нечітких множин (в рамках даного дослідження не розглядаються).

На штангу діють зовнішні моментні навантаження, що описуються проекціями моменту на осі координат M_x, M_y, M_z . При поперечно-кутових переміщеннях штанги виникають реакції в'язей пропорційні складовим

жорсткості складовим пропорційним проєкціям кутової швидкості штанги. Для визначення реакцій введені еквівалентні c_x, c_y, c_z та еквівалентні коефіцієнти опору h_x, h_y, h_z . Дані параметри визначають в першому наближенні процес взаємодії динамічної системи штанги із упорами карданного шарніра. Друга парціальна підсистема сферичного руху включає платформу, яка повертається навколо точки O_1 . Поворот платформи описується кутами ψ_1, θ_1, ϕ_1 . Інерційні властивості динамічної системи платформи описуються тензором інерції (J_{ij}).

Парціальні системи сферичного руху з'єднані пружно-дисипативними зв'язками, які передають моментні навантаження в шарнірі O_1 . Моментні навантаження мають вигляд реактивного момента. Реактивний момент визначається коефіцієнтами жорсткості C_ϕ, C_θ, C_ψ та відносними кутами повороту платформи відносно штанги. Додатково реактивний момент визначається кутовою швидкістю взаємного переміщення платформи і штанги і коефіцієнтами опору h_ϕ, h_θ, h_ψ .

Крім реактивного моменту на платформу діють моментні навантаження з боку шлангових пневмодвигунів з проєкціями моменту M_ϕ, M_θ, M_ψ . Дані моментні навантаження складаються із збурюючим моментом, який діє на платформу.

Для визначення динамічних переміщень в просторовій системі приводів розроблена загальна математична модель, яка враховує наявність двох парціальних динамічних підсистем сферичного руху. Вона включає моделі обох парціальних підсистем сферичного руху. Математичні моделі побудована на основі диференціальних рівнянь сферичного руху твердого тіла.

Рівняння сферичного руху твердого тіла в загальному випадку мають вигляд [7]:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{L} = \vec{M}, \quad (1)$$

де \vec{L} – вектор кінетичного моменту системи з нерухомою точкою; $\vec{\omega}$ – вектор кутової швидкості; \vec{M} – вектор головного моменту сил, що діє на тверде тіло.

Кінетичний момент, який входить в формулу (1) дорівнює добутку тензора інерції (I_{ij}) на вектор кутової швидкості:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}. \quad (2)$$

У проєкціях на осі координат рівняння сферичного руху (1) мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dL_x}{dt} + \omega_y L_z - \omega_z L_y = M_x \\ \frac{dL_y}{dt} + \omega_z L_x - \omega_x L_z = M_y \\ \frac{dL_z}{dt} + \omega_x L_y - \omega_y L_x = M_z \end{cases}, \quad (3)$$

де M_x, M_y, M_z – проєкції головного моменту зовнішніх сил, які діють на тверде тіло відносно точки O на осі координат x, y, z ; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проєкції кутової швидкості.

В систему рівнянь (3) сферичного руху входять проєкції моменту кількості руху L_x, L_y, L_z . Вони знаходяться із векторної залежності (2) у вигляді:

$$L_x = I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{zx}\omega_z, \quad L_y = -I_{xy}\omega_x + I_{yy}\omega_y - I_{yz}\omega_z, \quad L_z = -I_{zx}\omega_x - I_{zy}\omega_y + I_{zz}\omega_z. \quad (4)$$

Коефіцієнти даних формул є компонентами тензора інерції системи, який задано матрицею [7].

$$(I_{ij}) = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Тензор інерції є симетричним, тому $I_{yx} = I_{xy}, I_{yz} = I_{zy}, I_{zx} = I_{xz}$. Враховуючи, що переміщення системи є незначними, прийнято, що компоненти тензора інерції (5) є постійними.

Рівняння сферичного руху використані для розробки процедури чисельних розрахунків. Для цього система диференціальних рівнянь (3) шляхом інтегрування в часі зведена до системи трьох інтегральних рівнянь. З них визначені проєкції кінетичного моменту

$$\begin{aligned} L_x &= L_{x0} + \int_0^t (M_x - \omega_y L_z + \omega_z L_y) dt, \quad L_y = L_{y0} + \int_0^t (M_y - \omega_z L_x + \omega_x L_z) dt, \\ L_z &= L_{z0} + \int_0^t (M_z - \omega_x L_y + \omega_y L_x) dt. \end{aligned} \quad (6)$$

де L_{x0}, L_{y0}, L_{z0} – початкові значення проєкцій кінетичного моменту.

Система рівнянь (6) може бути подана у векторному вигляді.

$$\vec{L} = \vec{L}_0 + \int_0^t (\vec{M} - \vec{\omega} \times \vec{L}) dt \quad (7)$$

де \vec{L}_0 - початкове значення вектора кінетичного моменту.

Величини в правих частинах формул (6) і (7) є вхідними параметрами обчислювальної процедури, а параметри в лівих частинах формул є вихідними. Вхідні і вихідні параметри утворюють розімкнений причинно наслідковий зв'язок (прямий напрямок). Даний зв'язок реалізується в загальній математичній моделі.

Наведені залежності (4) – (7) реалізовані в спеціальних алгоритмах і забезпечені програмними засобами. Використані структурні математичні моделі для моделювання обох парціальних динамічних підсистем сферичного руху. Виконано контроль результатів моделювання по етапам і виключення грубих похибок, які пов'язані з особливостями динамічної системи, що має односторонні зв'язки в областях контакту.

Інтегральні залежності (6) обчислюються за допомогою структурної математичної моделі (рис.5). Дана модель застосовується для обох парціальних підсистем сферичного руху.

Вхідні параметри моделі сферичного руху динамічної системи такі як проекції кінетичного моменту L_x, L_y, L_z та проекції кутової швидкості штанги $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ задаються за рахунок введення рекурсивних (зворотніх) зв'язків. Вихідними параметрами блока є розраховані внаслідок інтегрування нові значення проекцій L_{x1}, L_{y1}, L_{z1} кінетичного моменту. Вихідні параметри моделі у вигляді вектора кінетичного моменту використовуються для обчислення вектора кутової швидкості. Вектор кутової швидкості знаходиться із системи рівнянь (4). Для цього використані залежності (4) перетворені до вигляду:

$$\omega_x = \frac{[L_x + I_{xy}\omega_y + I_{zx}\omega_z]}{I_{xx}}, \quad \omega_y = \frac{[L_y + I_{xy}\omega_x + I_{yz}\omega_z]}{I_{yy}}, \quad \omega_z = \frac{[L_z + I_{zx}\omega_x + I_{zy}\omega_y]}{I_{zz}}. \quad (8)$$

Реалізація залежностей (8) здійснюється в спеціальному блоці моделі (рис. 6)

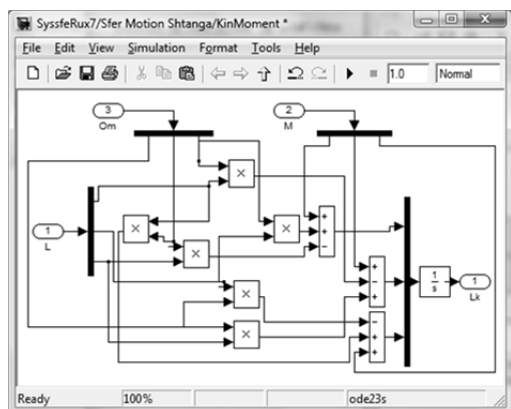


Рис. 5. Блок схема моделі для чисельного розв'язку системи рівнянь сферичного руху (6) та структура блока

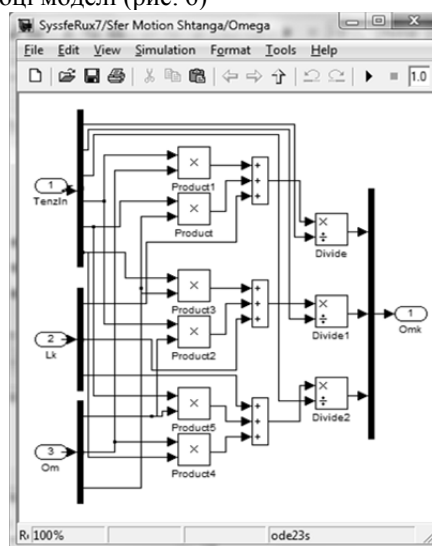


Рис. 6. Математична модель для обчислення вектора кутової швидкості динамічної парціальної підсистеми сферичного руху

Вхідними параметрами моделі наведеної на рисунку служить обчислений раніше вектор кінетичного моменту \vec{L} , попереднє значення вектора кутової швидкості штанги $\vec{\omega}$ та компоненти тензора інерції. Компоненти тензора інерції подаються у вигляді вектора шостої розмірності, перші три складові якого визначають діагональні компоненти тензора (5), а останні три складових – поза діагональні компоненти тензора.

Виходом моделі є розраховані нові значення вектора кутової швидкості Om1. Алгебраїчні операції в структурній моделі (див. рис. 5) реалізовані за допомогою суматорів та блоків множення.

Моделі, наведені на рис. 5, 6 об'єднані в одну структурну модель парціальної динамічної системи сферичного руху. Розроблено дві моделі, відповідні введеним парціальним підсистемам. Як приклад наведена математична модель сферичного руху штанги призначена для розрахунку динамічних поперечно-кутових переміщень штанги при дії на неї моменту $M_{Shtanga}$ (рис.7). В моделі наявний блок Tensor Inerc, який формує компоненти тензора інерції. Виходами моделі є вектор кутової швидкості штанги $Om_{Shtanga}$ та динамічний кут повороту штанги $Fi_{Shtanga}$.

Модель для знаходження кутової швидкості та кута повороту платформи побудовано аналогічно.

Парціальні динамічні системи сферичного руху мають пружно-дисипативні зв'язки (див. рис. 4). Це приводить до виникнення реактивних моментів, що обумовлені жорсткістю та опором зв'язків. Для динамічної системи штанги проекції реактивного моменту обчислюються по наступним залежностям:

$$M_{Rx} = c_x \psi + h_x \omega_x, \quad M_{Ry} = c_y \theta + h_y \omega_y, \quad M_{Rz} = c_z \varphi + h_z \omega_z, \quad (9)$$

де c_x, c_y, c_z - параметри жорсткості пружної системи штанги; h_x, h_y, h_z - коефіцієнти опору при поперечно-кутових переміщеннях штанги; ψ, θ, φ - складові вектора поперечно-кутових переміщень штанги.

З боку парціальної динамічної підсистеми сферичного руху платформи на штангу діє реактивний момент, який визначається жорсткістю та опором зв'язку між підсистемами. Даний реактивний момент визначається залежностями:

$$M_{R\psi} = C_\psi(\psi_1 - \psi) + h_\psi(\omega_\psi - \omega_x), \quad M_{R\theta} = C_\theta(\theta_1 - \theta) + h_\theta(\omega_\theta - \omega_y), \quad (10)$$

$$M_{R\varphi} = C_\varphi(\varphi_1 - \varphi) + h_\varphi(\omega_\varphi - \omega_z),$$

де $C_\psi, C_\theta, C_\varphi$ - параметри жорсткості в шарнірі, який зв'яже штангу із платформою; $h_\psi, h_\theta, h_\varphi$ - коефіцієнти опору шарніра; $\psi_1, \theta_1, \varphi_1$ - поперечно-кутові переміщення платформи; $\omega_\psi, \omega_\theta, \omega_\varphi$ - проекції кутової швидкості платформи.

Залежності (9), (10) використані для побудови структурних математичних моделей, що обчислюють реактивні моменти, що діють на штангу і платформу. Дані моделі подані у вигляді блоків M React Shtanga та M React Platform в складі загальної структурної моделі просторової системи приводів (рис.8).

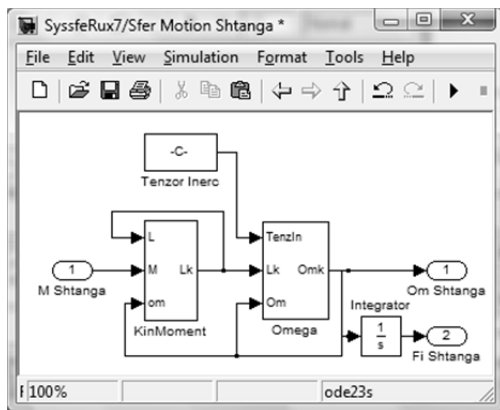


Рис. 7. Структура моделі для обчислення кутової швидкості та кута повороту штанги

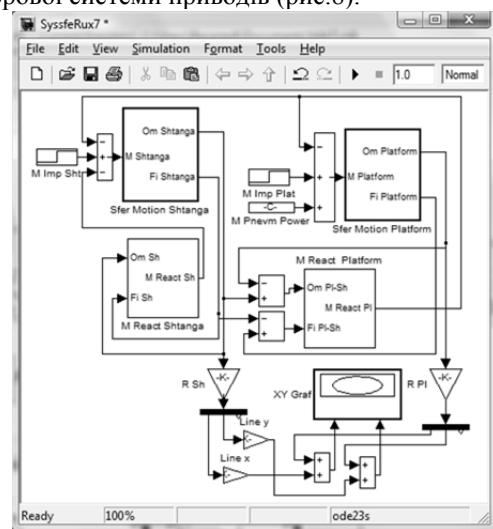


Рис. 8. Загальна структурна математична модель для визначення переміщень центра платформи в її площині

Модель визначає переміщення центра платформи в її площині. Для цього використовуються одержані в результаті математичного моделювання поперечно-кутові переміщення штанги і платформи. Множенням на радіуси R_{sh} та R_{pl} обертання відносно шарнірів знаходяться переміщення платформи.

Для перевірки адекватності розроблених моделей проведені експериментальні дослідження просторових систем приводів, які включають підсистеми сферичного руху. Одержані в результаті експериментальних вимірів дані відповідають результатам математичного моделювання. Цим підтверджено адекватність розроблених математичних моделей та доцільність їх розробки і використання при дослідженнях просторових систем приводів.

Результати математичного моделювання динамічних сферичних рухів платформи

По розробленій моделі проведено математичне моделювання динамічних сферичних рухів у просторовій системі приводів. При постановці шарнірів на обмежувальні упори виникають імпульсні навантаження у вигляді моментів. Проведено дослідження впливу локального імпульсного (ударного) навантаження платформи на її рух. При цьому прийняті нульові початкові умови для динамічної системи. Це значить, що розглядається рух системи обумовлений лише локальним ударним навантаженням на платформу. В результаті даного навантаження виникає складний циклічний рух платформи (рис.9).

Із результатів розрахунків випливає, що перехідний процес переміщення полюса платформи має дві стадії. Перша відповідає проміжку часу $t=0..0,8c$ і характеризується плавним рухом платформи по траєкторії АВ. При цьому штанга і платформа рухаються як одне ціле, обертаючись навколо нерухої точки О. На другій стадії перехідного процесу (траєкторія ВС) окремі підсистеми розділяються і рухаються по різним законам. Штанга продовжує плавне обертання із затуханням, а платформа здійснює циклічні переміщення, розмах яких зменшується в часі до повного затухання (див. рис. 9б). При цьому загальний розмах переміщень зменшується, а рух полюса платформи проходить по траєкторіям, які знаходяться в тороподібній області.

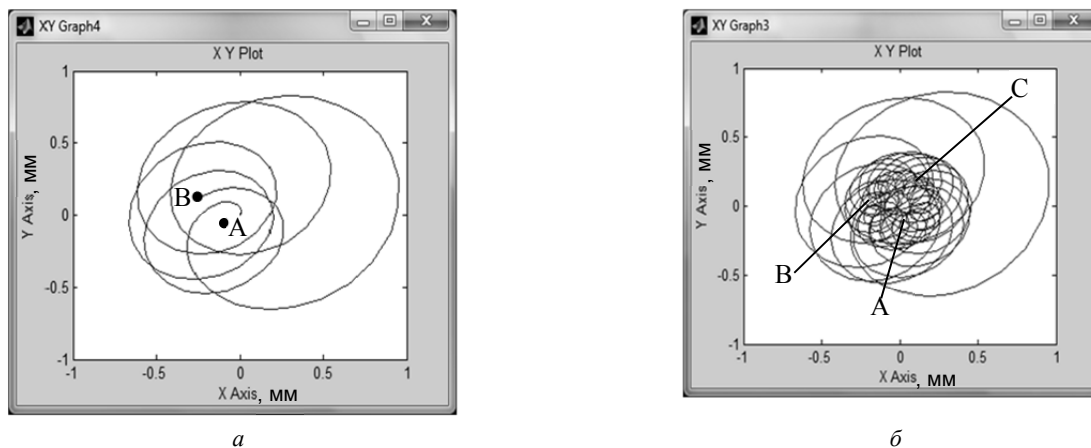


Рис. 9. Переміщення полюса платформи в її площині, обумовлені сферичними рухами в динамічній системі: *a* – переміщення полюса платформи на першій стадії перехідного процесу; *б* – переміщення на протязі всього перехідного процесу

Наявність різномірних рухів обумовлена різницею масо-жорсткісних параметрів парціальних динамічних підсистем сферичного руху. Це особливо проявляється при інтенсивному імпульсному навантаженні штанги (рис.10 а).

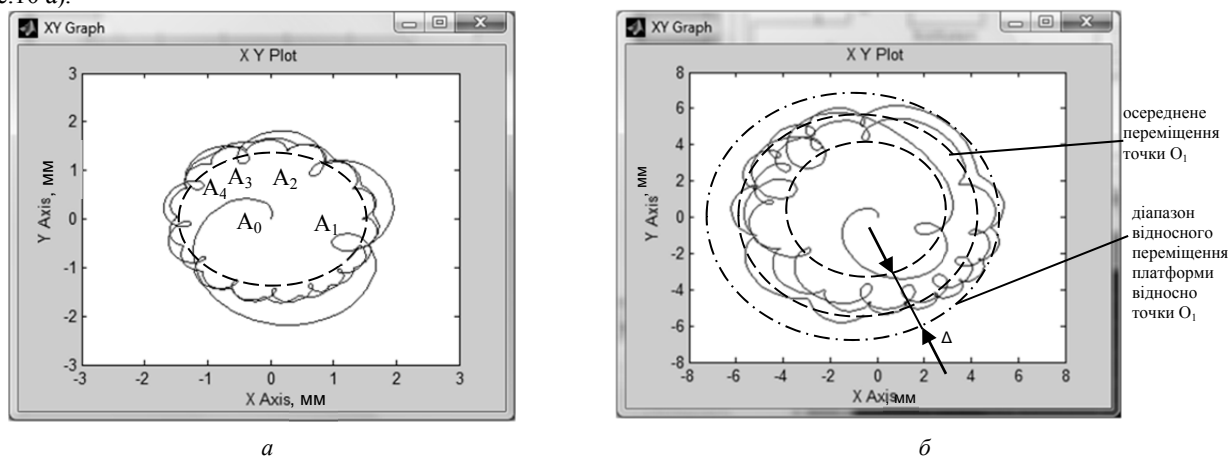


Рис. 10. Переміщення полюса платформи при інтенсивному імпульсному моментному навантаженні штанги (*a*) та прояв впливу окремих парціальних підсистем на динамічні переміщення платформи (*б*)

Наведений на рисунку результат розрахунку відповідає імпульсному навантаженню штанги, яке по інтенсивності в 10 разів перевищує величину розглянутого раніше імпульсного навантаження платформи.

Із результатів розрахунків випливає, що імпульсне навантаження штанги обумовлює циклічний рух платформи по траєкторії, близькій до колової. Має місце додаткове спіралевидне переміщення платформи із тенденцією до затухання. На основі аналізу результатів розрахунків встановлено, що циклічний рух платформи по коловій траєкторії обумовлений поперечно-кутовими переміщеннями штанги. Спочатку даний рух є плавним (ділянка A_0A_1). Внаслідок руху штанги ініціалізуються поперечно-кутові переміщення платформи. Вони проявляються у вигляді петель на траєкторії. Відстань між петлею подібними ділянками $A_1A_2, A_2A_3, A_3A_4, \dots$ послідовно скорочується. Це свідчить про розвиток коливального процесу поперечно-кутових переміщень платформи. В подальшому коливальні рухи набувають рівномірного характеру.

В процесі математичного моделювання визначено окремі складові переміщення платформи. Основний вклад в циклічний рух полюса платформи забезпечує сферичний рух штанги. Це проявляється в переміщенні сферичного шарніра, відносно якого здійснюється сферичний рух платформи. Проведено аналіз вкладу окремих сферичних рухів у переміщення платформи. Встановлений діапазон відносних переміщень платформи відносно шарніра (рис. 10 б).

Осереднене переміщення шарніра платформи відповідає траєкторії, близькій до колової (на рисунку показано пунктиром). ширина діапазону переміщень шарніра Δ складає близько 30% від середнього діаметра колової траєкторії. В межах даного діапазону проявляється сферичний рух платформи. Частота циклічного руху платформи в 10..12 разів перевищує частоту циклічного руху штанги.

Для встановлення фактичних частот коливань в динамічній системі виконано розрахунок проєкцій переміщень полюса платформи в її площині (рис.11).

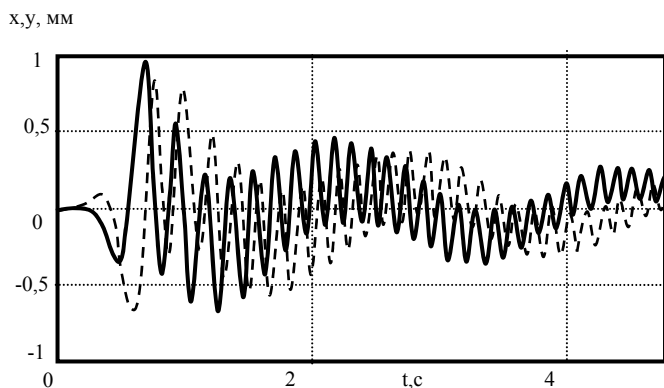


Рис. 11. Результати математичного моделювання проєкцій переміщень полюса платформи, які є наслідком сферичного руху елементів просторової системи приводів

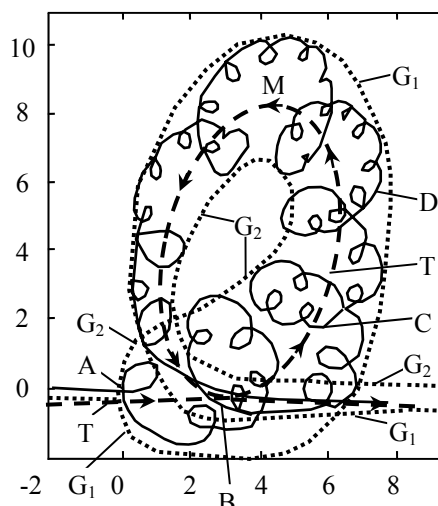


Рис. 12. Траєкторія сферичного руху платформи, яка враховує початкову швидкість переміщення

При цьому встановлено, що час перехідного процесу складає 3,8..4,2с, а платформа здійснює 22..25 повних коливань в напрямках координатних вісей x і y . Базова частота коливань плавно збільшується по мірі затухання перехідного процесу і складає 6..8Гц. На перехідних процесах спостерігаються циклічні зміни з частотою 0,4..0,6Гц. Вони обумовлені взаємним впливом параметрів жорсткості підсистем.

Ударні навантаження є короткодійними і приводять до виникнення коливань високої частоти. При постановці на упор виникають також низькочастотні коливання в системі. Вони обумовлені наявністю початкової швидкості, а відповідно кінетичного моменту при постановці системи на упор. В системі наявні кілька упорів, тому встановлення результуючої точки, відносно якої відбувається сферичний рух, потребує деякого часу. Внаслідок цього в системі мають місце переміщення точки обертання, а відповідно і переміщення платформи. Траєкторія переміщення набуває складного вигляду (рис. 12)

Петлеподібний сферичний рух платформи складається із повільним переміщенням внаслідок зміни положення точки обертання. Траєкторія має петле подібні ділянки АВ, ВС, CD. Оригінальні траєкторії G_1 та G_2 визначають полосу, в якій розташовується центр платформи. Полоса обмежена оригінальними, звужується і має петле подібний вигляд. Середня лінія траєкторії (показана пунктиром) утворює замкнену петлеподібну криву, яка відповідає повільному переміщенню платформи. На повільне переміщення накладається циклічний рух платформи. Циклічний рух має частоту набагато вищу (в 2...5 разів), ніж повільне переміщення. Складення двох рухів, частота зміни яких має суттєво різні значення, приводить до ускладнення результуючого руху.

Висновки

1. Встановлено, що в просторових системах приводів із шланговими пневмодвигунами при постановці на упор виникають специфічні рухи платформи, які є сумою двох сферичних рухів окремих вузлів динамічної системи. Для опису даних рухів доцільно використати динамічну модель у вигляді двох послідовно з'єднаних парціальних підсистем сферичного руху, зв'язаних пружно-дисипативними зв'язками.

2. Показано, що для розрахунку сферичних рухів доцільно застосовувати структурну математичну модель, яка включає блоки розрахунку кінетичного моменту кожної парціальної підсистеми сферичного руху, блоки обчислення кутової швидкості із врахуванням всіх складових тензорів інерції та блоки обчислення реактивних моментів, обумовлених пружно-дисипативними зв'язками в системі. Об'єднання даних блоків із введенням прямих та зворотніх зв'язків забезпечує надійну роботу процедури чисельного інтегрування диференціальних рівнянь сферичного руху окремих парціальних динамічних підсистем.

3. В результаті математичного моделювання визначено характер переміщення платформи просторової системи приводів при її постановці на упор. Зокрема, показано, що полюс платформи здійснює рух по траєкторії, близькій до колової, що обумовлено сферичним рухом динамічної системи штанги. На основну траєкторію накладається спірально-петлеподібний рух платформи, обумовлений її обертанням навколо шарніра, що знаходиться між штангою і платформою.

4. Частота циклічного руху полюса платформи визначається масо-жорсткісними властивостями системи і складають 6..8Гц. При цьому перехідний коливальний процес при постановці системи на упор має протяжність 3,8..4,2с, а в перехідному процесі має місце низькочастотна складова з частотою 0,4..0,6Гц.

5. Наявність початкової швидкості платформи при її постановці на упор приводить до виникнення складного петлеподібного сферичного руху платформи. Переміщення складається із повільної складової із траєкторією петлеподібного виду та циклічної високошвидкісної складової. Частоти даних рухів різняться в 2...5 разів.

6. Як напрямок подальших досліджень рекомендується оснастити систему приводів спеціальними демпферними пристроями, які будуть знижувати інтенсивність коливальних рухів при постановці шарніра на упор та зменшувати розмах петле подібних сферичних рухів платформи.

Анотація. Обоснована актуальність розробки просторових систем приводів з шланговими пневмодвигателями. Показано, що ефективним методом досліджень даних систем является математическое моделирование. В результате анализа литературных источников обосновано направление исследований в виде разработки математической модели в виде цепных парциальных динамических систем сферического движения.

Рассмотрены особенности разработанной пространственной системы приводов с шланговыми пневмодвигателями. На основе предложенной динамической модели составлена система дифференциальных уравнений сферического движения отдельных парциальных подсистем.

Разработана структурная математическая модель и проведены расчеты перемещения полюса платформы. Расчеты выполнены для различных начальных условий и различных схемах нагрузки. Показано, что при постановке системы на упор возникают циклические кольцевые перемещения платформы. При этом траектория имеет вложенные циклы, обусловленные разностью частот парциальных подсистем платформы и штанги. Выполнен анализ постановки системы на упор. Показано, что траектория перемещения полюса платформы в данном случае находится в пределах полосы, которая имеет петлеобразный характер. Циклические высокочастотные сферические перемещения платформы находятся в пределах указанной полосы.

Ключевые слова: конструкция, сферический движение, динамическая модель, уравнение, моделирование, циклическое движение, петлеобразное движение.

Abstract. The urgency of developing space systems with hose pneumatic actuators. It is shown that an effective method of data research is mathematical modeling. An analysis of the literature substantiates the direction of research in the development of a mathematical model in the form of partial dynamic chain of spherical motion.

The features developed spatial system drives with a hose pneumatic actuator. Based on the proposed dynamic model composed of a system of differential equations of motion of individual spherical partial subsystems.

The structural and mathematical model calculations of the pole moving platform. Calculations are performed for different initial conditions and different loading schemes. It is shown that the formulation of emphasis on having cyclic ring moving platform. This trajectory has nested loops, which are caused by difference frequency partial subsystems platform and rod. The analysis of staging systems for emphasis. It is shown that the trajectory of the moving platform pole in this case is within the pole, which has a loop-shaped character. Cycle spherical moving platforms are within the specified bandwidth.

Keywords: construction, ball movement, dynamic model equation modeling cyclic motion loop-shaped motion.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Глазунов В.А., Колюсдор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры.- М.:Наука,1991.-95с.
2. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обработывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / Под общ. ред В.Л. Афонина. – М.:Изд-во МГТУ Станкин, Янус. 2006. – 452с.
3. Струтинський С.В., Гуржій А.А. Експериментальне визначення динамічних характеристик та побудова на їх основі математичної моделі просторової системи приводів / Технологічні комплекси. Міжнародний науковий журнал №1 (7)/ ISSN: 2304-4519/ - 2013. – С.10-18.
4. Струтинський С.В., Гуржій А.А. Визначення стохастичних динамічних навантажень, які виникають на особливих ділянках траєкторії руху виконавчого органу просторової системи приводів / Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування. – № 66. Т. 1. – Київ, 2012.– С.38-45.
5. Струтинський С.В. Математичне моделювання просторових поперечно-кутових мікропереміщень сферичного шарніра з використанням рекурсивних зв'язків / Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал «Машинознавство». – 2009. - №1. – С.37-43.
6. Пашков Е.В. Промышленные мехатронные системы на основе пневмопривода: Учеб. пособие / Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский. – Севастополь: Изд. СевНТУ, 2007. – 401с.
7. Павловський М.А. Теоретична механіка. Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с. – ISBN 966-575-184-0.

References

1. Glazunov V.A., Kolyskor A.Sh., Krajnev A.F. Prostranstvennye mehanyzmy parallel'noj strukturu. Moscow: Nauka, 1991. 95p.
2. Afonyn V.L., Podzorov P.V., Slepcev V.V. Obrabatuvajushhee oborudovanye na osnove mehanyzmov parallel'noj strukturu Pod obshh. red V.L. Afonyna. Moscow: Yzd-vo MGTU Stankyn, Janus. 2006. 452p.
3. Strutyns'kyj S.V., Gurzhiy A.A. Eksperymental'ne vyznachennja dynamichnyh harakterystyk ta pobudova na i'h osnovi matematychnoi' modeli prostorovo'i' systemy pryvodiv Tehnologichni komplekxy. Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal №1 (7) ISSN: 2304-4519. 2013. P. 10-18.
4. Strutyns'kyj S.V., Gurzhiy A.A. Vyznachennja stohastychnyh dynamichnyh navantazhen', jaki vynykajut' na osoblyvyh diljankah trajektorii' ruhu vykonavchogo organu prostorovo'i' systemy pryvodiv Visnyk NTUU «Kyiv's'kyj politehnichnyj instytut», serija Mashynobuduvannja. No 66. T. 1. Kyi'v, 2012. P. 38-45.
5. Strutyns'kyj S.V. Matematychne modeljuvannja prostorovyh poperechno-kutovyh mikroperemishhen' sferychnogo sharnira z vykorystannjam rekursyvnyh zv'jazkiv Vseukrai'ns'kyj shhomisjajchnyj naukovy-technichnyj i vyrobnychyj zhurnal «Mashynoznavstvo». 2009. No1. P. 37-43.
6. Pashkov E.V. Promushlennye mehatronnye systemy na osnove pnevmopryvoda: Ucheb. posobyje E.V. Pashkov, Ju.A. Osynskyj. Sevastopol': Yzd. SevNTU, 2007. 401p.
7. Pavlovs'kyj M.A. Teoretychna mehanika. Pidruchnyk. Kiev: Tehnika, 2002. 512 p. ISBN 966-575-184-0.