

УДК 621.9.04

Струтинський С.В., к.т.н., ст. викл.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

РОЗРОБКА ДИНАМІЧНИХ ІНЕРЦІЙНИХ МАГНІТНИХ ПРИВОДІВ ІЗ ФЕРОМАГНІТНОЮ РІДИНОЮ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ РУХОМОГО ПРОСТОРОВОГО МЕХАНІЗМУ ОКТАЕДРИЧНОГО ТИПУ

Обґрунтована актуальність розробки рухомих просторових механізмів октаедричного типу із пружно-деформованими сільфонними приводами. Для реалізації особливих видів просторового руху механізму у вигляді повороту навколо ребра (кантування) запропоновані спеціальні інерційні магнітні приводи із феромагнітною рідиною.

Привод має корпус із немагнітного матеріалу із сферичною порожниною частково заповненою феромагнітною рідиною, в яку поміщена магнітна сфера. В діаметральній площині порожнини по периферії корпусу встановлено електромагніти, які керуються по спеціальному закону мехатронною системою керування.

Розроблені схемні і конструктивні рішення механізмів і приводів шляхом виготовлення і апробації просторових механізмів та інерційних приводів, підтверджена їх працездатність.

Розроблено динамічні моделі приводів, які знаходяться в різних вершинах просторового механізму. Показано, що динамічна дія полягає у набутті приводом додаткової кінетичної енергії при його спрацюванні, яка залежить від величини магнітної сили, що виникає між електромагнітом і магнітною сферою.

Встановлено умови зміни положення механізму, які полягають у повороті механізму відносно одного із ребер октаедра.

Механізм, октаедр, інерційний привід, магнітна сфера, електромагніт, удар, кінетична енергія, кантування механізму.

Вступ

Механізми на основі просторових систем приводів дають можливість реалізувати ряд ефективних операцій маніпулювання об'єктами. Тому розробки в даному напрямку є актуальними.

Проблема в загальному вигляді полягає в розробці оригінальних просторових механізмів із особливими функціональними властивостями. Проблема пов'язана із важкими науковими і практичними завданнями по розробці прогресивного технологічного обладнання, зокрема із маніпуляторами спеціальних конструкцій.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено ряд оригінальних технічних рішень просторових механізмів призначених для маніпулювання об'єктами [1]. Вказано, що дані механізми потребують спеціальних методів аналізу їх кінематики та динаміки [2]. В окремих публікаціях [3] наведені параметри точності просторових механізмів. Ряд авторів [4,5] дає пропозиції по розробці схемних і конструктивних рішень технологічного обладнання на основі просторових механізмів. Рекомендується пристрої, що реалізують оригінальні способи переміщення просторових механізмів [6]. Просторових механізмів, які переміщуються шляхом кантування в літературних джерелах не виявлено.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка просторових механізмів, які переміщуються особливим способом за допомогою спеціальних інерційних приводів.

Метою досліджень поставлено розробку динамічних інерційних магнітних приводів із феромагнітною рідиною для переміщення рухомого просторового механізму октаедричного типу шляхом різкої зміни положення механізму (кантування). Для досягнення мети поставлені і вирішені задачі розробки конструкції механізму та інерційного привода, математичне моделювання динамічної дії привода та визначення закономірностей зміни положення механізму за допомогою розроблених приводів.

Виклад основного матеріалу

Просторові механізми використовуються в приводах маніпулювання об'єктами. Перспективним є застосування рухомих механізмів із складним просторовим переміщенням. Розроблено просторові механізми октаедричного типу, які включають пневматичні приводи [7] (рис. 1).

Механізм має 12 ідентичних приводів 1, які розміщені по ребрам октаедра UV , OW , WU , Ov , Ou , Uu , Uw , Ww , Wv , uv , vw , uw . Приводи з'єднані у шести вузлах відповідних вершинам октаедра U , O , W , u , v , w . Вузли мають регульовані аеростатичні опори 3 для розміщення механізму на плоскій або криволінійній поверхні.

Грані октаедра утворені трьома з'єднаними в площині приводами. Вузли U , O та W із відповідними приводами утворюють основу механізму.

Механізм переміщується по плоскій або криволінійній поверхні за рахунок періодичної зміни довжин приводів основи UO , OW , WU при відповідній періодичній фіксації опор U , V , W . Переміщення механізму забезпечується спеціальною мехатронною системою керування. Здійснюється поступальне переміщення механізму у довільному напрямку та поворот механізму навколо вісі перпендикулярній площині основи. Механізм також має можливість зміни свого положення відносно опорної поверхні. При цьому змінюється положення основи. Зміна положення здійснюється шляхом кантування механізму за допомогою інерційних приводів, які розташовані у вузлах.

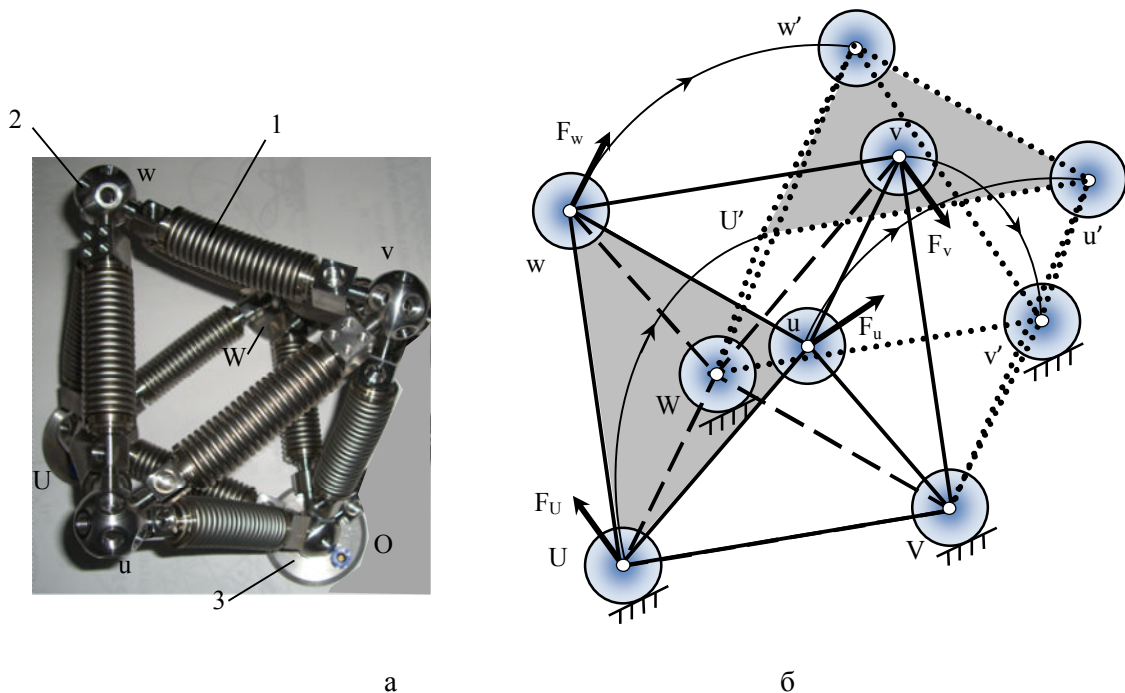


Рис. 1. Загальний вигляд розробленого дослідного зразка просторового механізму октаедричного типу із деформованими приводами сильфонного типу (а) та схема переміщення просторового механізму при його кантуванні на один крок шляхом повороту відносно осі привода OW (б)

При кантуванні механізму інерційні приводи розташовані у вузлах U , w , v , u створюють динамічні зусилля F_U F_w F_v F_u (рис. 1 б).

Внаслідок дії динамічних зусиль виникає крутний момент, який повертає механізм відносно осі привода OW , що знаходиться на поверхні. При переміщенні механізму він становиться в нове положення $OWv'U'w'u'$ (показано пунктиром) з основою OWv' .

Динамічна дія на механізм забезпечується динамічним інерційним магнітним приводом із феромагнітною рідиною (рис. 2).

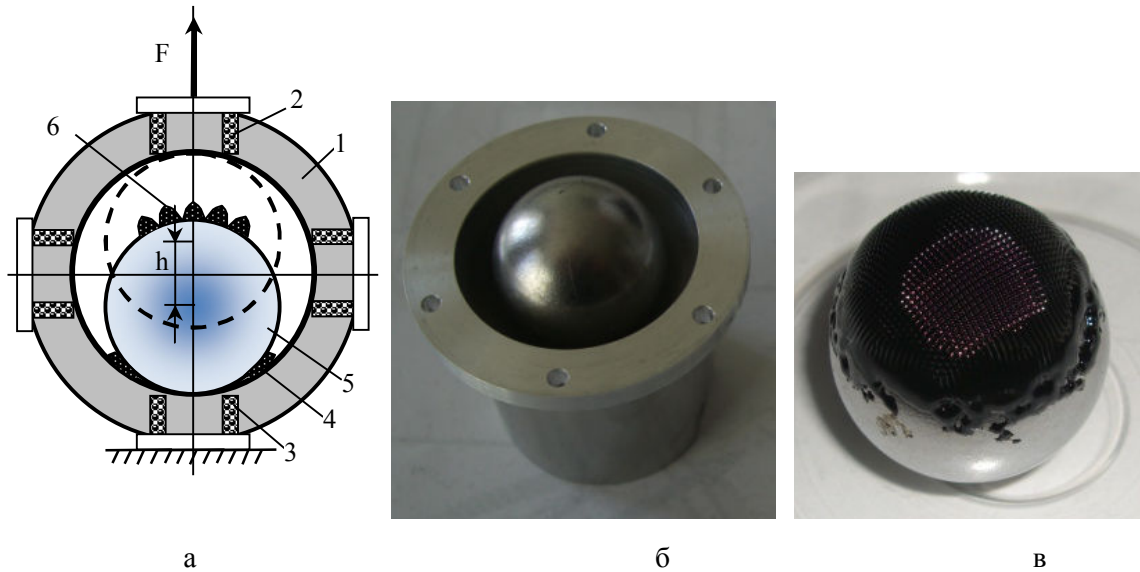


Рис. 2. Конструктивна схема інерційного привода (а), зовнішній вигляд магнітної сфери в порожнині корпусу (б) та скупчення феромагнітної рідини на полюсній ділянці сфери (в)

Привод має корпус 1 із немагнітного матеріалу (див. рис. 2 а). В корпусі встановлено електромагніти 2, 3. В корпусі виконана сферична порожнина частково заповнена феромагнітною рідиною 4 [8]. В сферичній порожнині знаходиться магнітна сфера 5 (див. рис. 2 б).

В номінальному положенні привода включено електромагніт 3 і сфера 5 знаходиться в нижньому положенні. Феромагнітна рідина скупчується біля полюсних ділянок сфери у вигляді масиву регулярних виступів 6 (див. рис. 2 в).

Динамічна дія привода забезпечується включенням електромагніта 2 і виключенням електромагніта 3. При цьому магнітна сфера переміщується в порожнині корпусу в напрямку електромагніта 2, набуваючи значну швидкість. При ударі сфери по корпусу виникає імпульс сили F, який забезпечує динамічну дію привода на просторовий механізм. Феромагнітна рідина знижує інтенсивність ударних навантажень та забезпечує необхідне змащення при переміщенні магнітної сфери.

Для встановлення закономірностей роботи інерційного привода приведено математичне моделювання його динамічної дії. Розроблені динамічні моделі приводів (рис. 3).

Розглянемо закономірності роботи привода U, який знаходиться на нерухомій основі. Динамічна модель привода U (рис. 3 а) включає дві маси корпусу M і сфери m. Корпус знаходиться на нерухомій основі. На сферу діє гравітаційна сила $G_0 = mg$, де g - прискорення вільного падіння.

В початковий момент часу сфера знаходиться внизу, нижній електромагніт виключається, а верхній електромагніт включається. З боку верхнього електромагніта на сферу діє магнітна сила F. Така ж по величині сила, але протилежного напрямку, діє і на корпус привода. Під дією магнітної сили сфера переміщується вгору на величину h. В момент початку руху феромагнітна рідина, яка знаходиться в зазорі між нижньою полюсною ділянкою сфери та поверхнею порожнини корпусу, фокусується магнітним полем. При відриві сфери від поверхні у феромагнітній рідині має місце кавітаційний розрив суцільності рідини. Після цього сфера вільно рухається вгору.

Рівняння руху сфери має вигляд:

$$m \cdot \frac{d^2 y_c}{dt^2} = y_{cU} - G_0 \cos \alpha_U, \quad (1)$$

де y_{cU} - переміщення сфери; α_U - кут між віссю привода та лінією дії гравітаційної сили.

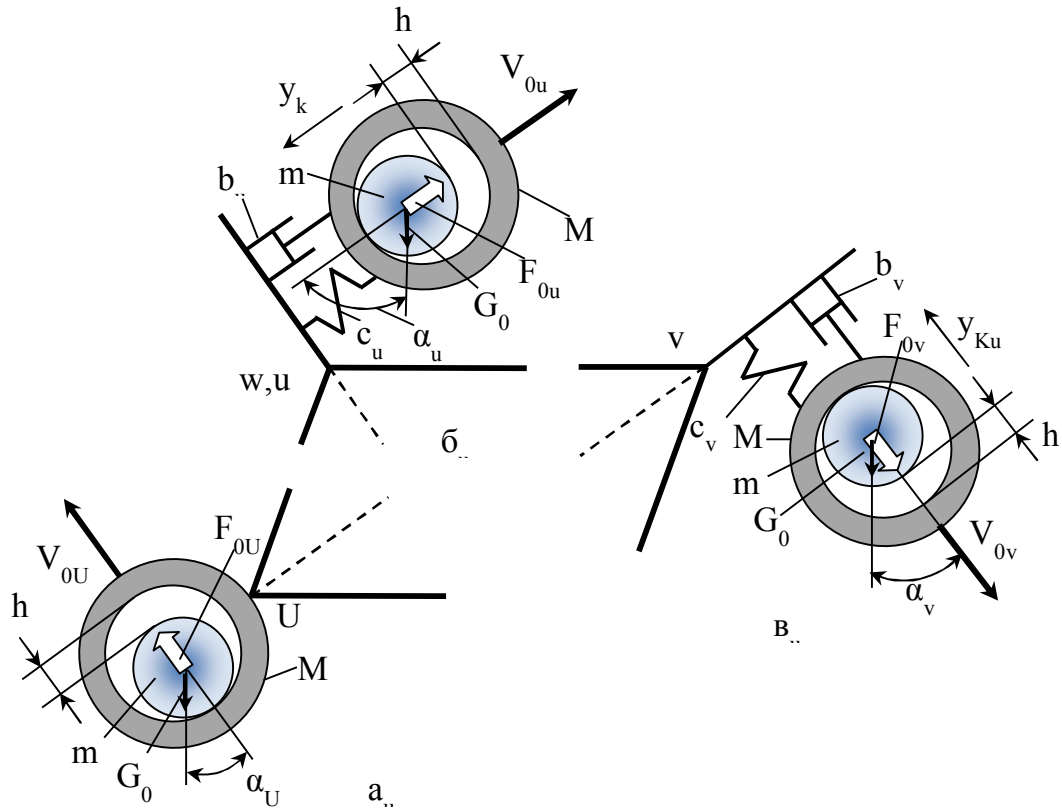


Рис. 3. Динамічні моделі інерційних приводів, що розміщені в різних вершинах просторового механізму: а – привод у вершині U, що знаходиться на нерухомій основі; б – модель відповідна приводам, що знаходяться у вершинах u та w; в – привод розміщений у вершині v

В першому наближенні прийемо, що магнітна сила мало змінюється при зміні положення сфери, а рівняння (1) має нульові початкові умови:

$$\text{при } t = 0, y_{cU} = 0, dy_{cU} / dt = 0. \quad (2)$$

Розв'язок рівняння руху сфери (1) із врахуванням початкових умов (2) має вигляд:

$$y_{cU} = \frac{(F_{0U} - G_0 \cos \alpha_U)}{2m} t^2, \quad \frac{dy_{cU}}{dt} = \frac{(F_{0U} - G_0 \cos \alpha_U)}{m} t. \quad (3)$$

Сфера проходить відстань h за проміжок часу:

$$t_m = \sqrt{\frac{2hm}{F_{0U} - G_0 \cos \alpha_U}}.$$

В кінці руху сфера набуває швидкість:

$$V_m = \sqrt{\frac{2(F_{0U} - G_0 \cos \alpha_U)h}{m}}.$$

Після удару сфери по корпусу вони рухаються як одне ціле.

Із закону збереження кількості руху при ударі [9] визначається швидкість вузла U після удару:

$$V_{0U} = \frac{V_m \cdot m}{M + m} = \frac{\sqrt{2(F_0 - G_0 \cos \alpha_U)mh}}{M + m}.$$

Відповідно вузол U набуває кінетичну енергію:

$$T_U = \frac{m^2 h}{(M + m)^2} (F_{0U} - G_0 \cos \alpha_U). \quad (4)$$

Розглянемо інерційні приводи, розміщені у вузлах u і w (див. рис. 1). Динамічні моделі даних приводів (див. рис. 3 б) включають корпуси встановлені на пружній основі. Жорсткість пружної системи механізму октаедричного типу c_u обумовлена деформаціями ланок механізму, де коефіцієнт опору при деформаціях приводів враховує витрати енергії в механізмі.

В початковий момент часу включається електромагніт, який створює магнітну силу F_{0u} яка діє між сферою і корпусом привода. Сфера переміщується в порожнині корпусу згідно закону (3). Переміщення і швидкість сфери визначаються залежностями:

$$y_c = \frac{(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u)}{2m} t^2, \quad \frac{dy_c}{dt} = \frac{(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u)}{m} t. \quad (5)$$

Переміщення сфери відбувається в межах зазору між сферою і корпусом із врахуванням переміщення корпусу y_k . Сфера вільно переміщується в проміжок часу:

$$t_{mu} = \sqrt{\frac{2m(h - y_{km})}{F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u}}. \quad (6)$$

де y_{km} - переміщення корпусу, яке має місце в момент часу t_{mu} .

При цьому сфера набуває швидкості:

$$V_{mu} = \sqrt{\frac{2(h - y_{km})(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u)}{m}}. \quad (7)$$

Визначимо закон переміщення корпусу. Починаючи з часу $t=0$ корпус привода рухається під дією постійної сили F_{0u} . Рівняння його руху має вигляд:

$$M \frac{d^2 y_k}{dt^2} = F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u - c_u y_k - b_u \frac{dy_k}{dt}. \quad (8)$$

де M - маса корпусу; c_u - жорсткість вузла закріплення корпусу в просторовому механізмі, b_u - коефіцієнт опору при коливаннях корпусу.

Перетворимо рівняння (8) до стандартного виду:

$$T^2 \frac{d^2 y_k}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy_k}{dt} + y_k = K(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u). \quad (9)$$

Значення постійних в даному рівнянні:

$$T = \sqrt{\frac{M}{c_u}}, \quad K = \frac{1}{c_u}, \quad \xi = \frac{b_u}{2\sqrt{Mc_u}}. \quad (10)$$

Одержане рівняння (9) має нульові початкові умови. При $t=0$, $y_k=0$, $\frac{dy_k}{dt}=0$.

Розв'язок даного рівняння при нульових початкових умовах має вигляд [10]:

$$y_k = K \cdot (F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u) \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\frac{\xi t}{T}} \cdot \sin \left[\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot t + \arctg \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1} \right] \right\}. \quad (11)$$

По формулі (11) розрахункове переміщення корпусу відповідає коливальному процесу (рис. 4 а).

Коливання корпусу згідно формули (11) відбуваються відносно усталеного положення:

$$y_{ky} = K(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u).$$

Швидкість руху корпусу визначена диференціюванням залежності (11) і складає:

$$V_k = \frac{K(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u)}{T\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{\xi t}{T}} \sin \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t. \quad (12)$$

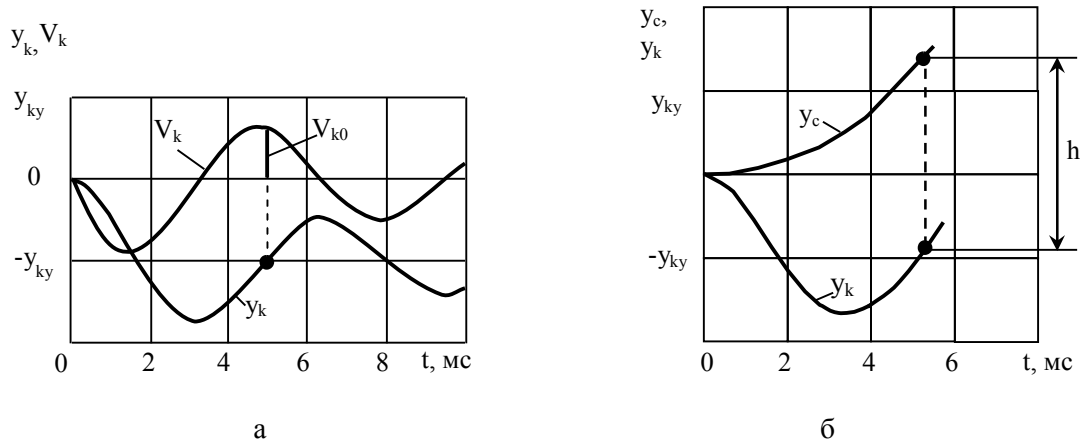


Рис. 4. Переміщення сфери і корпусу інерційного привода розташованого у вершині u механізму: а – вільні коливання корпусу внаслідок дії магнітної сили; б – фактичні переміщення корпусу і сфери до удару

Із аналізу формули (12) випливає, що в проміжок часу $\frac{\pi T}{\sqrt{1-\xi^2}} < t < \frac{2\pi T}{\sqrt{1-\xi^2}}$ швидкість корпусу становиться від'ємною, тобто він рухається в тому ж напрямку, що і сфера. Оцінкою максимального значення швидкості є розрахунок по формулі (12) при:

$$t_e = \frac{3}{2} \frac{\pi T}{\sqrt{1-\xi^2}}. \quad (13)$$

Дане значення часу наближено відповідає екстремуму залежності (12) і складає:

$$V_{k0} = \frac{K(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u)}{T\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{\xi \cdot 3\pi}{2\sqrt{1-\xi^2}}} \sin \left[\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot \frac{3\pi T}{2\sqrt{1-\xi^2}} \right], \quad (14)$$

В даний момент часу переміщення корпусу складає y_{km} і обчислюється згідно залежності (11), в якій значення часу визначено формулою (13). Відповідно:

$$y_{km} = K(F_{0u} - G_0 \cos \alpha_u) \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{3\xi\pi}{2\sqrt{1-\xi^2}}} \sin \left[\frac{3\pi}{2} + \arctg \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1} \right] \right\},$$

Виберемо параметри привода такими, щоб час t_e відповідав часу руху сфери t_m . Це буде досягнуто у випадку $t_e = t_m$. Підставивши значення величин із (6) і (13) одержимо необхідне значення магнітної сили:

$$F_{0u} = \frac{8m(h - y_{km})(1 - \xi^2)}{9\pi^2 T^2} + G_0 \cos \alpha_u, \quad (15)$$

Дана величина магнітної сили реалізується мехатронною системою керування електромагнітного привода.

Після удару сфера по корпусу вони рухаються як одне ціле набуваючи швидкості:

$$V_{0u} = \frac{M \cdot V_{k0} + mV_{mu}}{M + m}, \quad (16)$$

Подібні залежності мають місце для вузла w , який розташований симетрично.

Під дією імпульсу сили і відповідної зміни швидкості вузлів u і w вони набувають кінетичної енергії:

$$T_u = T_w = \frac{1}{2} \frac{(M \cdot V_{k0} + mV_{mu})^2}{M + m}, \quad (17)$$

Подібні залежності мають місце для інерційного привода розмішеного у вузлі v просторового механізму (див. рис. 1). Згідно динамічної моделі (див. рис. 4 в) відмінністю даного привода від розглянутого раніше є співпадіння напрямку дії гравітаційної сили із

напрямком дії магнітної сили. Тому швидкість сфери в момент удару для даного привода визначиться формулою (7) при врахуванні зміни знака і складе:

$$V_{mv} = \sqrt{\frac{2(h - y_{km})(F_{0v} + G_0 \cos \alpha_v)}{m}}, \quad (18)$$

Необхідне значення магнітної сили, яке повинно бути забезпечено системою керування, визначиться формулою аналогічною (15) і складе:

$$F_v = \frac{8m(h - y_{km})(1 - \xi^2)}{9\pi^2 T^2} - G_0 \cos \alpha_v. \quad (19)$$

В наведених формулах значення констант T і ξ розраховані по формулам (10) при значеннях жорсткості c_v та коефіцієнта опору b_v . Кінетична енергія вузла v розрахована згідно формули (17) для відповідних значень констант і складає:

$$T_v = \frac{(MV_{k0} + mV_{mv})^2}{2(M + m)}. \quad (20)$$

Таким чином встановлено, що в момент часу $t=0$ внаслідок переміщення магнітних сфер вузли механізму U, u, w та v набувають початкової швидкості та відповідної кінетичної енергії. Умовою здійснення операції кантування механізму є перевищення набутої кінетичної енергії над енергією необхідною для зміни положення механізму.

В початковому положенні механізму U, u, w, v , його потенціальна енергія є мінімальною (рис. 5 а).

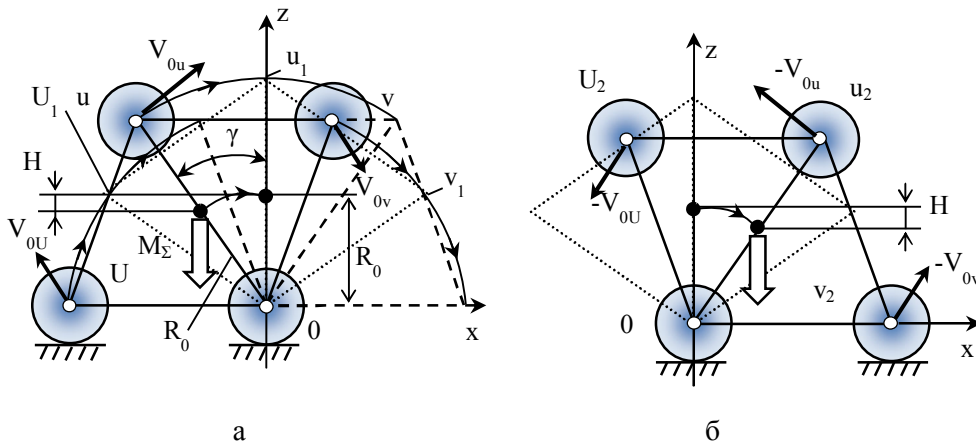


Рис. 5. Схема переміщення механізму при його кантуванні шляхом повороту навколо вісі ou : а – початок руху механізму із початкового положення; б – гальмування механізму при підході до кінцевого положення на завершальній стадії процесу кантування

Для зміни положення механізму він повинен переміститися в верхнє положення $U_1u_1w_1v_1$ де його потенціальна енергія є максимальною. Приріст потенціальної енергії складе:

$$\Pi = M_{\Sigma} \cdot g \cdot H = M_{\Sigma} \cdot g \cdot R_0(1 - \cos \gamma),$$

де M_{Σ} - загальна маса механізму, H - зміна висоти положення загального центра мас механізму; R_0 - відстань від точки повороту до центра мас. Таким чином умовою переміщення механізму шляхом кантування є нерівність:

$$T_U + T_u + T_w + T_v \geq \Pi.$$

Складові, які входять в ліву частину даної нерівності, визначено по наведеним вище формулам з певними похибками. Тому для надійного переміщення механізму необхідно забезпечити надлишок набутої кінетичної енергії.

На початку переміщення механізму його вузли набувають початкової швидкості. В подальшому швидкість переміщення дещо зменшується, але після переходу через верхнє положення, швидкість механізму зростає. Максимальна швидкість досягається при виході в кінцеве положення $U_2u_2w_2v_2$. Це приводить до виникнення ударних навантажень на механізм. Для зниження інтенсивності ударних навантажень безпосередньо перед моментом контакту

вузла v із нерухомою основою здійснюється включення інерційних приводів. Внаслідок дії приводів виникає гальмівний імпульс (див. рис. 5 б), який знижує інтенсивність ударної взаємодії системи приводів із нерухомою основою.

В процесі регламентної роботи системи приводів (без кантування) інерційні приводи використовуються як пасивні демпфери коливань пружно-деформованої системи приводів.

Висновки

1. Встановлено, що розроблений просторовий механізм октаедричного типу із сильфонними пневмодвигунами може переміщуватись змінюючи своє положення шляхом кантування, яке полягає у повороті механізму навколо осі одного із 12 сильфонів за допомогою спеціальних інерційних приводів.

2. Раціональною конструкцією інерційного привода є пристрій, який має магнітну сферу, що переміщується за допомогою електромагнітів в сферичній порожнині корпусу заповненій феромагнітною рідиною. При ударі сфери по поверхні порожнини корпусу виникає динамічна дія на просторовий механізм, яка спричиняє його переміщення.

3. Кінетична енергія, яку набуває інерційний привід, що знаходиться на основі, пропорційна силі дії електромагніта, а кінетичні енергії приводів, які знаходяться у вершинах гнучкого механізму мають додаткову складову пов'язану із рухом корпусу привода при умові, що удар сфери по корпусу відбувається синфазно із знаком віброшвидкості.

4. Умовою переміщення механізму є перевищення сумарної кінетичної енергії приводів над максимальною потенціальною енергією механізму при його повороті. При цьому для забезпечення працездатності механізму необхідно створити гальмуючу динамічну дію в приводах при його постановці в нове положення при кантуванні.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується дослідження експлуатаційних характеристик систем приводів у вигляді деформованих просторових структур, що здійснюють переміщення шляхом кантування за допомогою розроблених інерційних магнітних приводів із феромагнітною рідиною.

Література

1. Сяньвень Кун, Клемент Госселин Структурный синтез параллельных механизмов. – М.: Физматлит, 2012. – 275 с.
2. Рыбак Л.А., Ержуков В.В., Чичварин А.В. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики работа-станка параллельной структуры. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 148 с. ISBN978-5-9221-1296-3.
3. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications – Berlin: Springer, 2006. – 394 p.
4. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обработывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / Под общ. ред В.Л. Афолина. – М.:Изд-во МГТУ Станкин, Янус. – К., 2006. – 452с.
5. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 448с. ISBN 5-217-003341-х.
6. Спыну Г.А., Юмашев В.Е. Робототехника: Монография. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 332 с.
7. Струтинський С.В. Просторові системи приводів: Монографія / ав. Струтинський С.В., Гуржій А.А. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.
8. Радионов А.В. Комбинированные магнитожидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой/ А.В. Радионов, А.Н. Виноградов // Збагачення корисних копалин: Наук.техн.зб. – 2009. – Вип. 35(76). – С.148-155.
9. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.
10. Струтинський В.Б., Колот О.В. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: Монографія. – Краматорськ: ЗАТ «Тираж-51», 2005. – 530 с.