

УДК 515.1

Л. М. Куценко¹, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0003-1554-8848)

Л. Л. Запольський², к.т.н., с.н.с. (ORCID 0000-0003-4357-2933)

О. О. Ковальов¹, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-4974-5201)

Б. І. Кривошей¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-2561-5568)

С. М. Шевченко¹, викл. каф. (ORCID 0000-0002-6740-9252)

¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

²Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ДІЙ МАНІПУЛЯТОРА ТИПУ СХВАТА ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ ПІД ЧАС АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНИХ РОБІТ В УМОВАХ НЕВАГОМОСТІ

Запропоновано геометричну модель дії в умовах невагомості механічного маніпулятора типу схвата для захоплення та утримання просторових об'єктів циліндричної форми з використанням стержневої конструкції, яка є подібною до чотирьохланкового маятника. Переміщення ланок конструкції відбуваються завдяки дії імпульсів піротехнічних двигунів на кінцеві точки ланок. Опис руху одержаного інерційного розкриття стержневої конструкції виконано за допомогою рівняння Лагранжа другого роду, і, зважаючи на умови невагомості, побудованого з використанням лише кінетичної енергії системи. Актуальність теми визначається необхідністю удосконалення систем забезпечення профілактичних та ремонтних робіт, а також проведення аварійно-рятувальних робіт у випадку виникнення позаштатних аварійних ситуацій з космічними апаратами різних типів та характеристик. На основі інерційного розкриття чотириланкових стержневих конструкцій розроблено схеми дії маніпуляторів (схватів) для захвату просторових циліндричних об'єктів, осі яких розташовано паралельно або перпендикулярно відносно поверхні космічного апарату. Визначено параметри та початкові умови моменту початку руху чотириланкової стержневої конструкції з метою одержання необхідного для захоплення розташування ланок. Показано, що для впровадження інерційного розкриття необхідно на кінцеві точки ланок подіяти імпульсами піротехнічних пристроїв з величинами, відповідно, $\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ умовних одиниць. Побудовано графіки зміни у часі функцій значень кутів як узагальнених координат, а також перших та других похідних цих функцій. В результаті проведених розрахунків надано оцінки силовим характеристикам системи в момент гальмування (зупинки) процесу розкриття.

Ключові слова: чотириланкова стержнева конструкція, механічний схват, розкриття конструкції у невагомості, рівняння Лагранжа другого роду

1. Вступ

Тенденції розвитку космічної робототехніки визначаються швидкими змінами конструкцій транспортних маніпуляційних систем, стосовно яких накопичений значний досвід орбітальної експлуатації. В роботах [1–3] розглянуто особливості монтажно-сервісних операцій, потреба в автоматизації яких значною мірою окреслюватиме подальший розвиток засобів космічної робототехніки. Визначені завдання, обумовлені особливостями моделювання динаміки керованого руху маніпулятора.

Крім монтажно-сервісних операцій увагу слід приділяти можливості використання маніпуляторів (як схватів «руки» роботів) у випадку проведення профілактичних дій, а також у нештатних ситуаціях під час проведення ремонтних або аварійно-рятувальних робіт. Наприклад, маніпулятор «Canadarm» використовувався в позаштатній ситуації, яка виникла у ході місії STS-41D (1984 р.). За допомогою маніпулятора було вилучено небажане крижане утворення на зовнішній поверхні «Space Shuttle», щоб уникнути можливих проблем при поверненні на Землю [2].

Крім того, великорозмірні схвати можуть використовуватися як швартові пристрої в процесі причалювання одного космічного об'єкта до другого (де один з

об'єктів – рятувальник або буксир, здатний перевести космічний апарат на іншу орбіту). Враховуючи значні довжини схватів, то виникає проблема доставки на орбіту та трансформування їх у робочий стан. Але нештатні ситуації виникають не так часто, тому великогабаритні маніпулятори являються у певному розумінні баластом. Звідси зрозумілі пропозиції фахівців споруджувати схвати мінімальної маси та мінімальним кошторисом. Але основна маса та ціна багатоланкового маніпулятора припадає на електродвигуни та систему комутації (синхронізації) їх дії. Все це спонукало до пошуку нової схеми багатоланкового маніпулятора типу схвата для захоплення в умовах невагомості просторових об'єктів циліндричної (як приклад) форми з використанням розкриття стержневої конструкції, подібної чотирьохланковому маятнику.

Компоненти великогабаритних космічних стержневих конструкцій доставляються на орбіту у згорнутому вигляді (касети). Після чого необхідно їх трансформувати з метою надання стержням запланованої просторової форми. Зазначене трансформування здійснюється за допомогою механічної операції розкриття [4]. При реалізації розкриття чотириланкової стержневої конструкції у невагомості виникає проблема вибору способів активації її руху. Традиційними рушіями руху є електродвигуни та метали з термопам'яттю. В якості засобів ініціювання розкриття пропонується використовувати імпульсні реактивні двигуни (типу піропатронів), встановлених на кінцевих точках ланок стержневої конструкції. Піротехнічні пристрої набагато легші і дешевші порівняно з традиційними засобами ініціювання розкриття конструкції.

Динаміку процесу розкриття конструкції доцільно досліджувати на основі варіаційного принципу Лагранжа. При цьому необхідно адаптувати до невагомості «коливання» чотириланкової конструкції, подібної до чотириланкового маятника. При складанні рівнянь Лагранжа другого роду потенціальну енергію консервативної механічної системи вважатимемо «близькою до нуля» [5]. Маніпулятори типу схватів затребувані при виконанні операції зміни орбіти в області геосинхронних орбіт, особливо на геостаціонарній орбіті, де зараз перебуває близько 1200 різних великих об'єктів [6]. При цьому працездатними є порядку 420 супутників, а інші 800 об'єктів – це відпрацювавши свій строк космічні апарати й розгінні блоки, що представляють реальну небезпеку як космічне сміття [7].

Все це вказує на доцільність дослідження нових схем захватів у вигляді моделі розкриття стержневих конструкцій з імпульсними двигунами на кінцевих точках їх ланок. При виконанні монтажних та аварійно-рятувальних робіт на орбіті їх доцільно використовувати як механічні схвати типу "рука робота". Для спрощення в даній роботі розглянуто два варіанти захвату циліндричного тіла. У першому варіанті вісь циліндра розташована паралельно, а у другому – перпендикулярно поверхні космічного апарату. Підкреслимо, що в роботі розглядається лише геометричне моделювання схеми дії маніпулятора на базі розкриття чотириланкових стержневих конструкцій. Геометричне моделювання виявляється у створених комп'ютерних анімаційних фільмах, де унаочнюється взаємне переміщення ланок стержневих конструкцій в процесі розкриття з метою "захоплення" просторових об'єктів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Прикладом успішного рішення орбітальних завдань із застосуванням відпрацьованих засобів космічної робототехніки є маніпулятор «Canadarm» [2]. «Canadarm» у значній мірі персоніфікує рівень розвитку космічної робототехніки

у 1980-х – 1990-х роках і вважається одним з найбільш ефективних і надійних пристроїв проекту «Space Shuttle». Маніпулятор «Canadarm» призначений для переміщення корисного вантажу з вантажного відсіку в деяку точку робочої зони з необхідною орієнтацією, наприклад, при виведенні супутника на орбіту. Маніпулятор здатний захопити просторовий об'єкт, розмістити й зафіксувати його у вантажному відсіку. Досить часто використовується спільна робота астронавтів, один із яких закріплений на маніпуляторі, а другий має можливість вільно переміщатися в зоні проведення робіт.

Друга концептуальна ідея застосування маніпуляторів реалізована [6] у недавно запущеній програмі SpiderFab, метою якої є спорудження на навколосеземній орбіті великогабаритних конструкцій, наприклад, сонячних батарей або космічних антен з кілометровими апертурами. Назву програма одержала у зв'язку з тим, що вона містить у собі робототехнічну систему, яка «виготовляє» за допомогою космічного принтера масштабні ажурні структури подібно тому, як павук плете свою павутину. Основою системи стануть шість ідентичних маніпуляторів, розроблених для виконання точних операцій (рис. 1). Установлені в потрібне положення елементи плетеної конструкції будуть фіксуватися за допомогою зварювання, клейких речовин, механічного кріплення або інших способів [8].

Інший приклад використання великогабаритних маніпуляторів дасть технологія складання на орбіті ATLAST (Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope) з апертурою 15,5 м. Початок місії запланований NASA на 2030 рік. Передбачається використання двох двадцатиметрових маніпуляторів для здійснення причалювання, м'якого стикування й переміщення на значні відстані космонавтів і конструкцій, і двох двометрових «спритних» маніпуляторів для здійснення точних операцій разом з екіпажем.

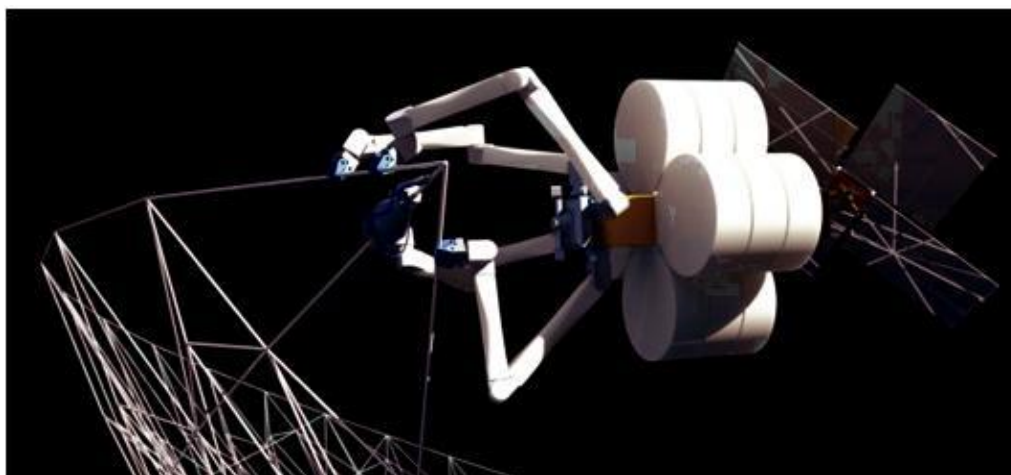


Рис. 1. Вигляд спорудження на навколосеземній орбіті великогабаритних конструкцій по програмі SpiderFab

Роботизировані засоби здатні захопити невеликий астероїд, що пролітає поблизу Землі, і перенаправляти його на стабільну білямісячну орбіту, так, щоб він перебував в межах досяжності перспективних космічних кораблів. Планується захоплювати й доставляти астероїди не більше 10 метрів у діаметрі. Після того як астероїд буде виведений на стійку стабільну орбіту, до нього будуть спрямовані пілотовані й безпілотні експедиції [9]. Перехоплення астероїда можна також вважати, у певному сенсі, аварійно-рятувальною роботою. Особливо, коли траєкторія руху астероїда буде проходити на небезпечній відстані від Землі.

Інший варіант використання маніпуляторів у вигляді схвата передбачає зближення з великим космічним об'єктом, посадку на його поверхню й захвата фрагмента розміром до декількох метрів з наступною доставкою його на навколунну орбіту для подальшого дослідження (рис. 2).



Рис. 2. Захват фрагмента астероїда

Для цього в NASA розроблено прототип маніпулятора зі спеціалізованим захватним пристроєм [10], що являє собою багато пальцевий захват з мікрошипами для втримання предмета (рис. 3, 4).

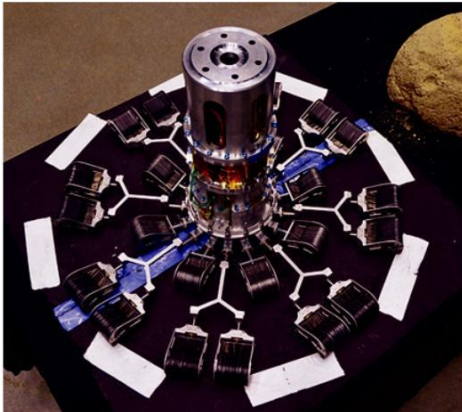


Рис. 3. Пристрій схвата

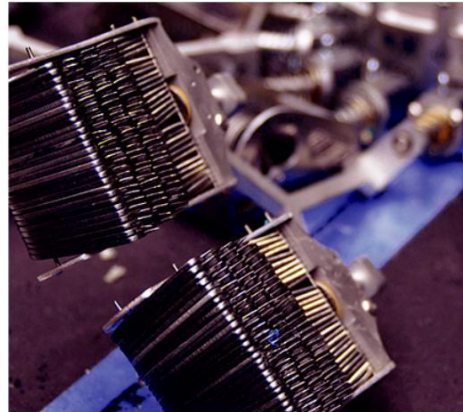


Рис. 4. Пальці схвата з шипами

Відмітимо зростаючу кількість і розмаїтість космічних маніпуляторів. Спочатку обходилися одним «Canadarm», потім для МКС потрібна була розширена система – з'явилися Canadarm2 і Dextre. Тепер же кожний новий модуль вимагає власної системи маніпуляторів – так були розроблені JEMRMS і ERA. Слід звернути увагу на грандіозну програму «Тяньгун» («Небесний чертог»), що розробляється в Китаї [11].

Представлена стаття у певному розумінні продовжує ряд розробок систем маніпуляторів. У роботах [12, 13] започатковано геометричну модель розкриття на уявній площині у невагомості стержневої конструкції як багатоланкового маятника. Розроблено схему ініціювання коливань шляхом впливу імпульсом на один з вузлових елементів маятника (модель імпульсного реактивного двигуна). В роботах [14–16] наведено ілюстрації деяких положень, які сприятимуть розумінню геометричної моделі розкриття стержневих конструкцій.

В результаті огляду літературних джерел [1–11] були виявлені питання, ще

не досліджені іншими авторами, що дозволило сформулювати наступну проблему досліджень. Розробити геометричну модель дії в умовах невагомості маніпулятора типу схвата для захоплення просторових об'єктів циліндричної форми з використанням стержневої конструкції, подібної чотириохланковому маятнику. Переміщення ланок конструкції має відбуватися за інерцією завдяки дії імпульсів піротехнічних двигунів на кінцеві точки ланок. При цьому наявність протяжних ланок конструкції не повинна принципово впливати на загальність реалізації інерційної способу розкриття.

3. Мета та завдання дослідження

Метою статті є розробка геометричної моделі дії маніпулятора в умовах невагомості, який складається з системи стержневих конструкцій, поєднаних подібно чотириохланковому маятнику. Для ініціювання руху конструкції змоделювати дію імпульсних піротехнічних реактивних двигунів, встановлених на кінцевих точках ланок конструкції.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розв'язати систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду для опису плоских коливань в невагомості чотириланкової стержневої конструкції;
- розробити схему ініціювання коливань конструкції шляхом впливу імпульсами реактивних двигунів на кінцеві точки її ланок та визначення величин імпульсів для забезпечення необхідного їх розташування;
- за допомогою комп'ютерної анімації визначити необхідний момент часу фіксації (зупинки) розкриття, коли виникне прийнятне для використання взаємне розташування у просторі ланок стержневих конструкцій;
- побудувати графіки зміни у часі перших та других похідних функцій значень кутів як узагальнених координат, і на базі цього оцінити силові характеристики системи в момент фіксації (зупинки) розкриття;
- навести тестові приклади (типу «рука робота») моделей формування у просторі розташування ланок конструкції, прийнятного для захоплення у просторі циліндричних об'єктів.

4. Розробка моделей «покриття» місцевості на стадії проектування району забудови

4.1. Пояснення принципу розкриття та зупинки в заданий момент часу чотириланкової стержневої конструкції

Оберемо уявну площину з декартовими координатами Oxy , на якій в умовах невагомості має переміщуватися чотириланкова стержнева конструкція. Вона складатиметься з чотирьох невагомих нерозтяжних стержнів довжин L_1 , L_2 , L_3 і L_4 , шарнірно з'єднаних між собою вузловими циліндричними шарнірами з масами m_1 , m_2 , m_3 і m_4 . Рух без тертя у циліндричних шарнірах забезпечує переміщення вантажів лише у межах обраної уявної площини. Тобто циліндричні шарніри у вузлах конструкції забезпечують її розкриття лише у межах абстрактної площини, яка проходить через нерухому точку конструкції.

Початок першої ланки стержневої конструкції збігається з початком координат O . У якості напрямку відліку оберемо вісь Oy . Узагальненими координатами вважатимемо кути $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ і $u_4(t)$, утворені на площині відповідними ланками з напрямком відліку (рис. 5).

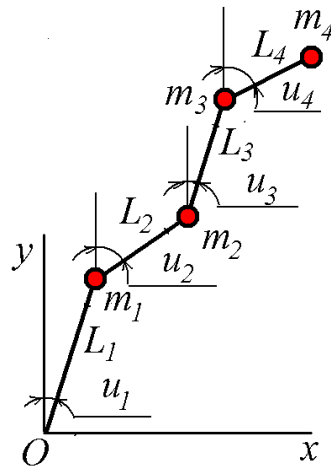


Рис. 5. Схема чотириланкової стержневої конструкції

Запуск руху стержневої конструкції у невагомості здійснюється шляхом вибору величин імпульсів, наданих кожному з кутів відхилень. Наприклад, $U' = \{u_1'(0), u_2'(0), u_3'(0), u_4'(0)\}$ означає, що i -тому вантажу масою m_i надано імпульс величиною $m_i u_i'(0)$, ($i=1...4$). Тобто кутам розкриття $u_i(t)$ надано початкові швидкості $u_i'(0)$, ($i=1...4$). З врахуванням наданої реактивними двигунами миттєвих швидкостей $u_1'(0)$, $u_2'(0)$, $u_3'(0)$ і $u_4'(0)$, стержнева конструкція далі має розкриватися за інерцією. Наведене пояснює термін «інерційна система розкриття». Кожний імпульсний піротехнічний двигун (типу піропатрона) повинен забезпечити розраховану величину імпульсу. Реактивні двигуни повинні закріплюватися так, щоб їх дії були спрямовані по нормалі до відповідної ланки в площині розкриття.

Для опису руху чотириланкової стержневої конструкції складемо та розв'яжемо систему рівнянь Лагранжа другого роду. За допомогою узагальнених координат обчислюємо координати вузлових точок:

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &= L_1 \sin(u_1(t)); & y_1(t) &= L_1 \cos(u_1(t)) \\
 x_2(t) &= x_1(t) + L_2 \cdot \sin(u_2(t)); & y_2(t) &= y_1(t) + L_2 \cdot \cos(u_2(t)) \\
 x_3(t) &= x_2(t) + L_3 \cdot \sin(u_3(t)); & y_3(t) &= y_2(t) + L_3 \cdot \cos(u_3(t)) \\
 x_4(t) &= x_3(t) + L_4 \cdot \sin(u_4(t)); & y_4(t) &= y_3(t) + L_4 \cdot \cos(u_4(t)).
 \end{aligned} \quad (1)$$

За умови відсутності дисипативних сил і з врахуванням «нульової» потенціальної енергії опис розкриття стержневої конструкції на уявній площині виконаємо на основі лагранжіана

$$L = 0,5 \cdot [m_1(x_1'^2 + y_1'^2) + m_2(x_2'^2 + y_2'^2) + m_3(x_3'^2 + y_3'^2) + m_4(x_4'^2 + y_4'^2)] \quad (2)$$

Опис руху чотириланкової стержневої конструкції одержимо у вигляді системи з чотирьох диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду відносно функцій $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ і $u_4(t)$ (з причини громіздкості тут не наведено). При розв'язанні системи рівнянь слід враховувати координати таких векторів: довжин ланок стержневої конструкції: $L = \{L_1, L_2, L_3, L_4\}$; значень мас вантажів (шарнірів): $m = \{m_1, m_2, m_3, m_4\}$; значень початкових кутів відхилень: $U = \{u_1(0), u_2(0), u_3(0), u_4(0)\}$, а також значень початкових швидкостей, наданих кутам відхилень $U' = \{u_1'(0), u_2'(0), u_3'(0), u_4'(0)\}$. Всі значення параметрів в умовних величинах.

З врахуванням відповідних початкових умов систему рівнянь Лагранжа другого роду розв'язано методом Рунге-Кутти в середовищі математичного пакету *maple*, і одержані наближені розв'язки позначено символами $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$ і $U_4(t)$. В обраній на площині системі координат Oxy з використанням одержаних розв'язків визначаємо координати вузлових точок в момент часу t . Для цього використовуємо вирази (1) для обчислення координат вузлів стержневої конструкції за допомогою узагальнених координат, замінивши там малі літери u на великі U .

Враховуючи обчислені координати вузлів стержневої конструкції як функції в часі, побудуємо кадри комп'ютерної анімації процесу розкриття.

В результаті спостереження за процесом розкриття обираємо момент часу $t=t_0$ зупинки розкриття та визначаємо параметри стоп-коду $U_{STOP}=\{u_1(t_0), u_2(t_0), u_3(t_0), u_4(t_0)\}$. У визначений за допомогою комп'ютерної анімації час t_0 розкриття необхідно зупинити.

Вважається, що в цьому випадку ланки стержневої конструкції зайняли необхідне для використання розташування на уявній площині. Для зупинки руху необхідно забезпечити одночасне спрацювання завдяки дії піротехнічних пристроїв вмонтованих у всі циліндричні шарніри ригелі. Піротехнічні пристрої повинні активуватися сигналом у визначений момент t_0 часу зупинки.

На рис. 6, а наведено кадр запуску процесу розкриття (піропатрон зображено «пігулкою»), на рис. 6, б – кадр проміжного положення процесу розкриття, і на рис. 6, в – кадр зупинки розкриття стержневої конструкції за допомогою циліндричного ригеля. При разовому використанні можливе наскрізне пробивання обох циліндрів шарніру.

На сайті [18] наведено анімаційний фільм активації та зупинки процесу розкриття.

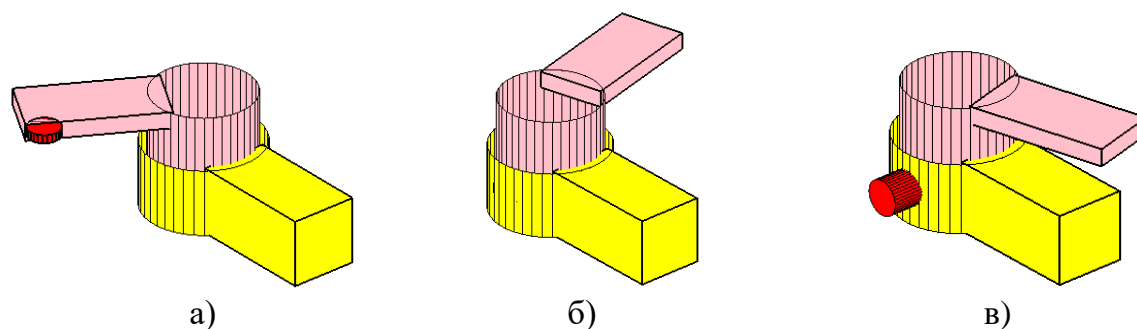


Рис. 6. Кадри дії механізму зупинки розкриття: а) активація руху; б) рух за інерцією; в) зупинка процесу розкриття циліндричним ригелем

Одержані залежності для функцій узагальнених координат дозволяють будувати графіки зміни у часі величин кутів як функцій узагальнених координат, а також перших та других похідних цих функцій. А це, в свою чергу, дозволяє оцінити силові характеристики системи в момент фіксування (стопоріння) розкриття. Силові характеристики обчислюються як добуток відповідної маси на значення другої похідної функції узагальненої координати (тобто прискорення). У випадку, коли значення силових характеристик є недопустимими, то за допомогою комп'ютерної анімації можна визначити інший момент часу, коли в процесі розкриття стержнева конструкція набуде іншої прийнятної форми.

4.2. Приклади моделювання розкриття чотириланкової стержневої конструкції з метою захоплення циліндричних об'єктів

При розрахунках слід враховувати, що багатоланкову стержневу конструкцію на орбіту доставляють у складеному вигляді (наочно це нагадує побутовий метр у складеному стані). Тобто початкове положення множини ланок стержневої конструкції має «складений» вигляд, і вектор значень початкових кутів відхилень завжди матиме координати $U = \{\pi/2, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2\}$. За допомогою розробленої Maple програми крім переміщення вузлових точок можна визначити їх швидкості, що дає можливість будувати відповідні фазові траєкторії переміщення. Одержані графіки прискорень зміни кутів розкриття дозволяють визначати силові характеристики в шарнірах між ланками в момент фіксування стержневої конструкції.

Для прикладу обрано однакові довжини ланок $L = \{3, 3, 3, 3\}$ і маси вантажів $m = \{1, 1, 1, 1\}$. На кінцеві точки ланок механізмів передбачено впливати піротехнічними пристроями. Визначено значення величин цих імпульсів, які мають визначатися координатами вектора $U' = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$. Значення всіх параметрів в умовних величинах.

Приклад 1. Наведемо геометричне моделювання схеми дії маніпулятора на базі розкриття чотириланкових стержневих конструкцій для захвату циліндра, розташованого паралельно поверхні космічного апарату. Попередньо розглянемо схему розкриття двох чотириланкових стержневих конструкцій з метою «захоплення» області круга радіуса $R = 1.3$ з координатами центру $(0, -4.7)$. На кінцеві точки ланок механізмів подіємо піротехнічними пристроями, величини імпульсів яких визначаються координатами вектора $U' = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$. Час інтегрування системи рівнянь $T = 3.14$. На рис. 7 наведено послідовні кадри схеми захвату круга двома чотириланковими стержневими конструкціями. Значення координат вектора «стоп-коду» визначатимуть числа: $U_{STOP} = \{0.5102, 2.306, 0.1527, 6.621\}$.

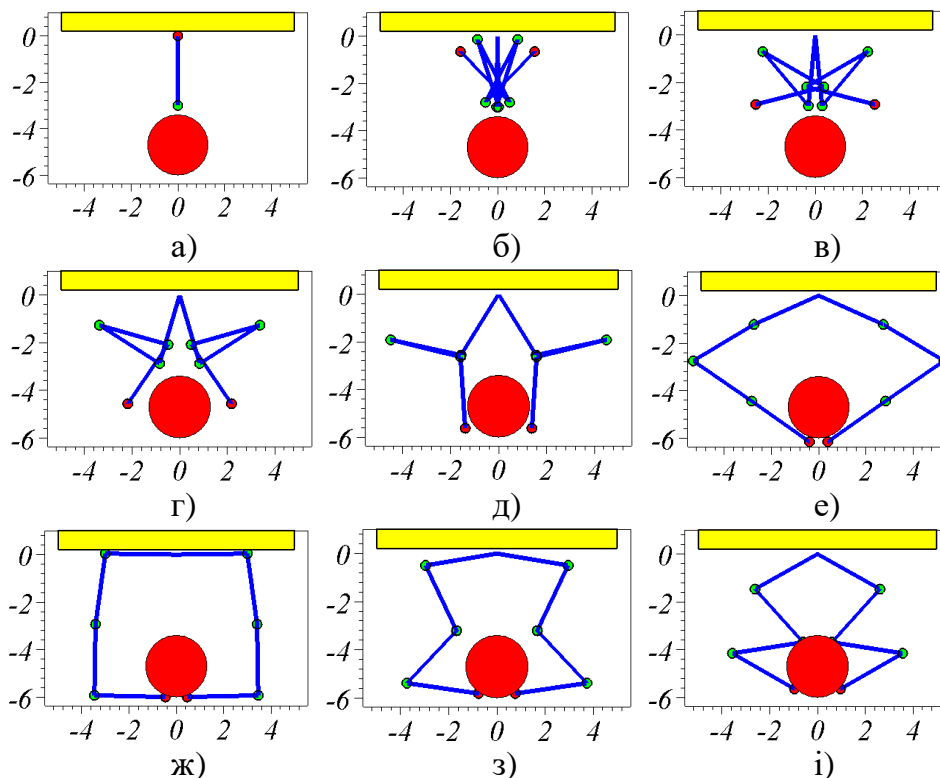


Рис. 7. Кадри схеми процесу захвату круга: а) $t=0$; б) $t=0.3$; в) $t=0.78$; г) $t=1.2$; д) $t=1.52$; е) $t=2$; ж) $t=2.5$; з) $t=2.8$; і) $t=3.14$

На рис. 8 зображено одержану на основі рис. 7, і геометричну модель захвату циліндра, розташованого паралельно поверхні космічного апарату.

На рис. 9 зображені фазові траєкторії узагальнених координат розкриття чо-тириланкової стержневої конструкції для прикладу 1. На фінальній стадії розкриття швидкості відповідних вузлів матимуть значення: $u1'(3,14) = 1$; $u2'(3,14) = 0,4$; $u3'(3,14) = -2$; $u4'(3,14) = -1,5$.

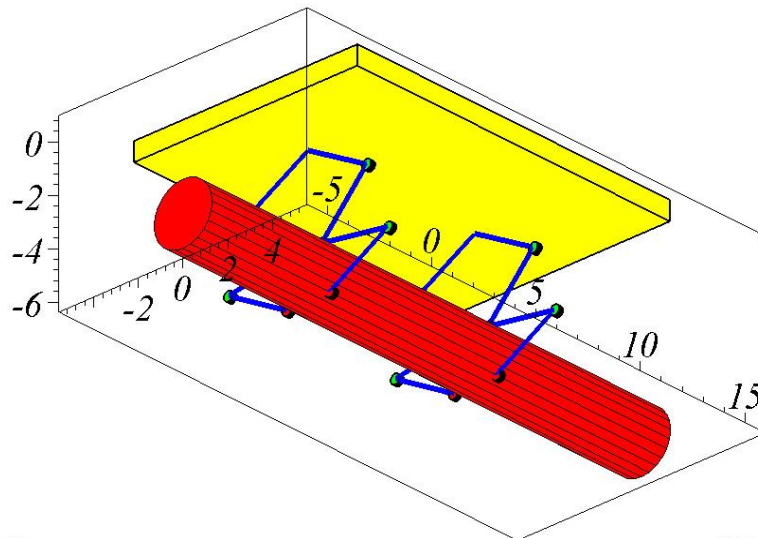


Рис. 8. Пара стержневих конструкцій для захвату циліндра у просторі, розташованого паралельно поверхні космічного апарату

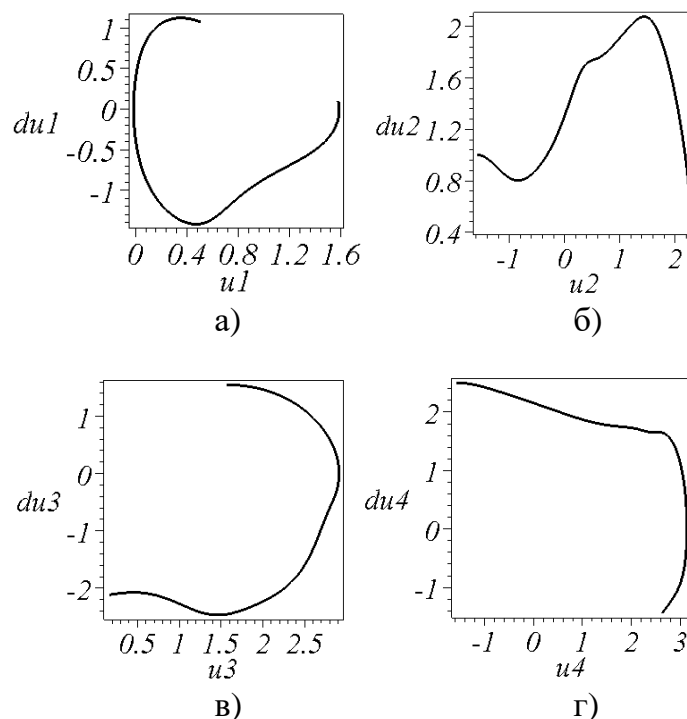


Рис. 9. Фазові траєкторії узагальнених координат для прикладу 1: а) $u1(t)$; б) $u2(t)$; в) $u3(t)$; г) $u4(t)$

Далі проаналізуємо сили, які діють на вузлові елементи стержневої конструкції. На рис. 10 наведено графіки сил, одержаних за допомогою графіка прискор-

рень, помножених на відповідні маси. На фінальній стадії розкриття сили у відповідних вузлах матимуть значення: $F1(3,14)=0$; $F2(3,14)=-3.2$; $F3(3,14)=0$; $F4(3,14)=-1.8$.

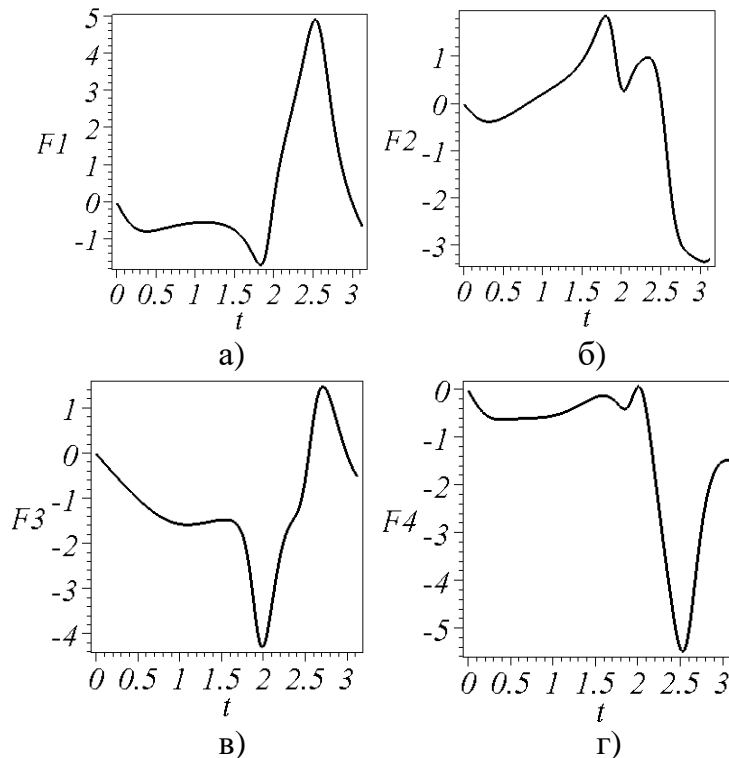


Рис. 10. Графіки сил впливу на вузлові елементи для прикладу: а) $F1(t)$; б) $F2(t)$; в) $F3(t)$; г) $F4(t)$

Приклад 2. Продовжуючи тему попереднього прикладу розглянемо інший спрощений варіант захвату циліндричного тіла. А саме, наведемо геометричне моделювання схеми дії маніпулятора на базі розкриття чотириланкових стержневих конструкцій для захвату циліндра, розташованого перпендикулярно поверхні космічного апарату.

Спочатку розглянемо схему розкриття двох чотириланкових стержневих конструкцій з метою досягнення паралельного розташування їх останніх ланок. Для цього на кінцеві точки ланок механізмів необхідно подіяти піротехнічними пристроями, величини імпульсів яких визначаються числами, відповідно, $U'=\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$. Час інтегрування системи рівнянь необхідно обрати $T=1.48$.

На рис. 11 наведено послідовні кадри схеми формування паралельного розташування останніх ланок двох чотириланкових стержневих конструкцій зі спільною нерухомою точкою. Значення координат вектора «стоп-коду» визначатимуть числа: $U_{STOP}=\{1.051, -0.256, 2.906, 1.57\}$.

На рис. 12 зображено геометричну модель одержаного на основі рис. 7, е схеми захвату циліндра радіуса $R=1.4$, розташованого перпендикулярно поверхні космічного апарату.

На рис. 13 зображені фазові траєкторії узагальнених координат розкриття чотириланкової стержневої конструкції для прикладу 2. На фінальній стадії розкриття швидкості відповідних вузлів матимуть значення: $u1'(1.48)=-0.8$; $u2'(1.48)=1.05$; $u3'(1.48)=-0.5$; $u4'(1.48)=1.78$.

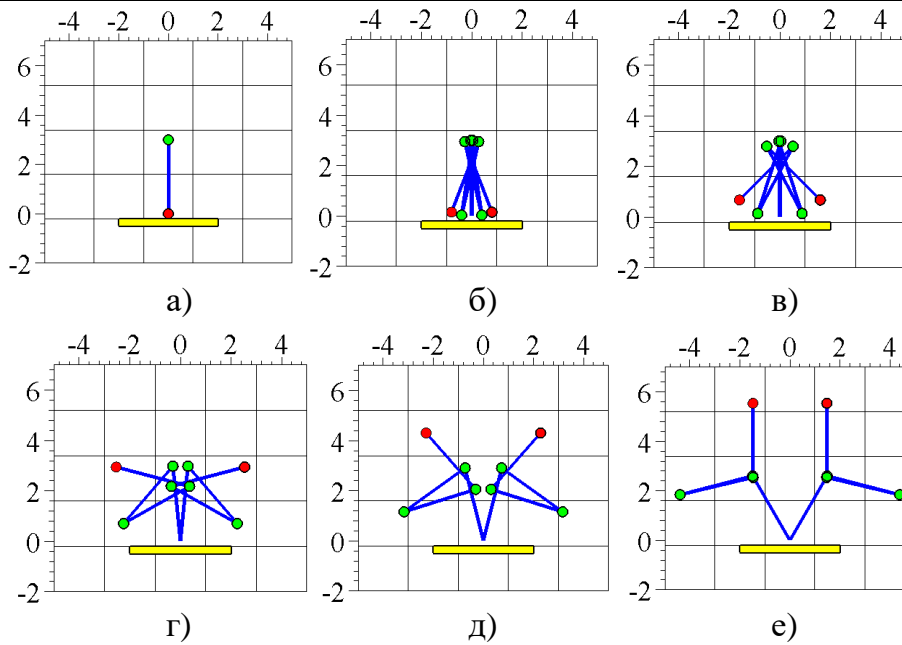


Рис. 11. Кадри процесу забезпечення схеми розташування паралельно двох останніх ланок: а) $t=0$; б) $t=0.15$; в) $t=0.5$; г) $t=0.8$; д) $t=1.3$; е) $t=1.48$

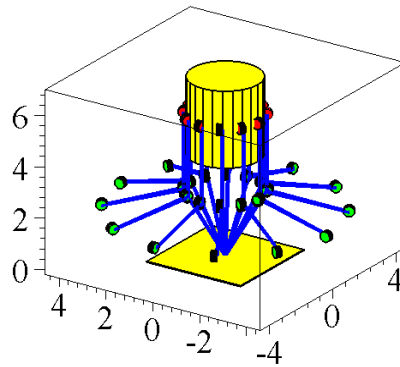


Рис. 12. Стержнева конструкція, у якій останні ланки захватять циліндр у просторі, розташованого перпендикулярно поверхні космічного апарату

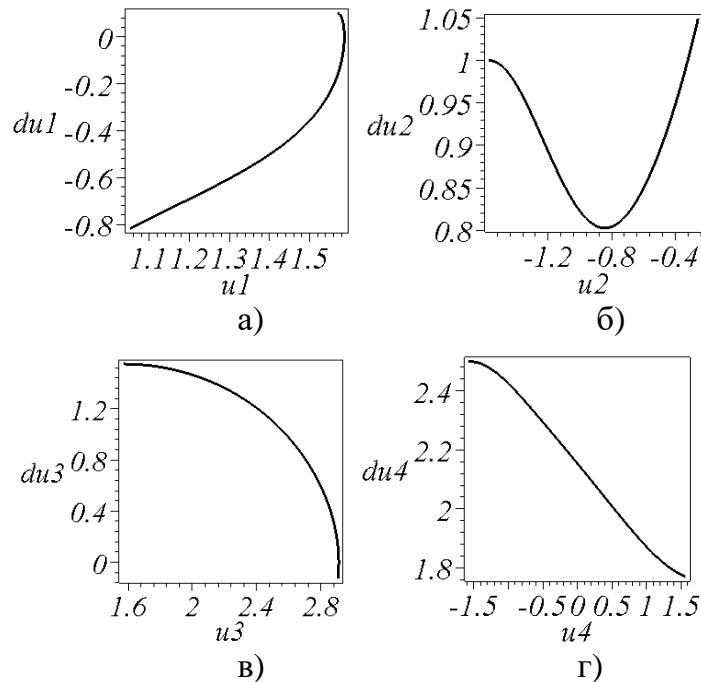


Рис. 13. Фазові траєкторії узагальнених координат для прикладу 2: а) $u_1(t)$; б) $u_2(t)$; в) $u_3(t)$; г) $u_4(t)$

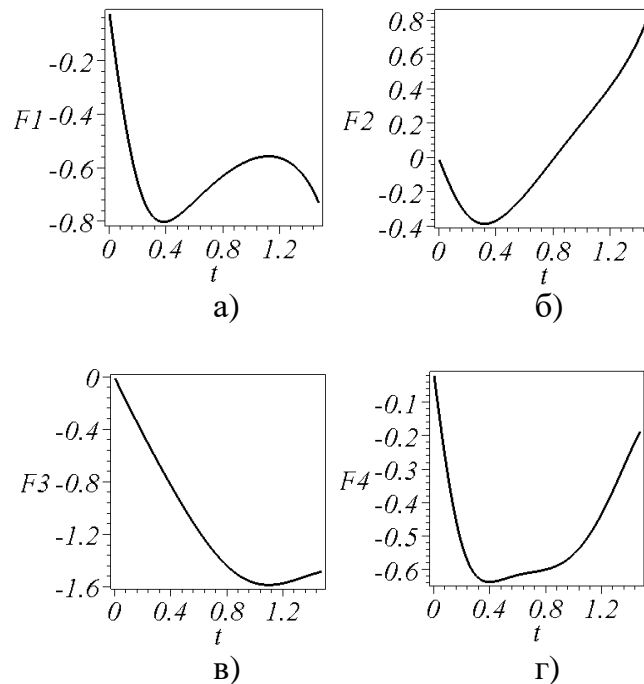


Рис. 14. Графіки сил впливу на вузлові елементи для прикладу 2: а) $F1(t)$; б) $F2(t)$; в) $F3(t)$; г) $F4(t)$

Отже, для кожного з наведених прикладів було обчислено і побудовано:

– розташування елементів чотириланкових стержневих механізмів в процесі розкриття;

– фазові траєкторії функцій узагальнених координат, які дозволяють визначити діапазон зміни значень кутів і швидкостей розкриття;

– графіки зміни у часі величин кутів як функцій узагальнених координат, а також перших та других похідних цих функцій;

– графіки прискорення та силової характеристики зміни величин кутів як функцій узагальнених координат;

– варіанти розкриття декількох чотириланкових стержневих механізмів зі спільною нерухомою точкою.

Для всіх прикладів обрано однакові довжини ланок $L=\{3, 3, 3, 3\}$ і маси вантажів $m=\{1, 1, 1, 1\}$. При цьому, що важливо, продемонстровано можливість застосування раніше підготовленого комплексу уніфікованих піротехнічних пристроїв, величини імпульсів яких визначаються числами, відповідно, $U'=\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$. Конкретні впровадження у прикладах відрізняються часом процесу розкриття стержневої конструкції, а також координатами вектора «стоп-коду» USTOP зупинки розкриття. У достовірності одержаних результатів можна переконатися за допомогою комп'ютерних анімацій, наведених на сайті [18].

5. Результати досліджень

В роботі одержано ідеалізовані геометричні моделі розкриття стержневих конструкцій, подібних до чотириланкових маятників. Вони орієнтовані на застосування у якості маніпуляторів для захоплення об'єктів циліндричної форми. Показано, що в якості рушіїв процесу розкриття доцільно обирати імпульсні піротехнічні реактивні двигуни, встановлені на кінцевих точках ланок стержневої конструкції. Такі двигуни доцільно застосовувати тоді, коли розкриття конструкції на орбіті необхідно виконати лише один раз.

До переваг піротехнічних пристроїв, на яких базується запропонована схема розкриття багатоланкової стержневої конструкції, слід віднести:

- малу вагу і дешевизну;
- можливість налаштування на розраховану величину імпульсу;
- стійкість до перевантажень в процесі доставки на орбіту;
- відсутність додаткових технічних регламентів: розконсервування та тестування конструкції перед запуском розкриття;
- можливість активізації дії дистанційно за допомогою радіосигналів або рентгенівського випромінювання.

Отримані результати можна пояснити можливістю застосування варіаційного принципу Лагранжа до розрахунку механічних конструкцій з використанням лише кінетичної енергії в умовах невагомості. Це дозволило використати рівняння Лагранжа другого роду для опису руху аналогу чотириланкового маятника у невагомості, що дозволило визначити розташування ланок стержневої конструкції залежно від часу розкриття. Отримані результати також можна пояснити можливістю пов'язати похідні початкових умов при розв'язанні системи рівнянь Лагранжа другого роду з величинами імпульсів піротехнічних пристроїв, які діють на кінцеві точки ланок конструкції. І, нарешті, результати можна пояснити можливістю одночасного дистанційного запуску піротехнічних пристроїв як на початок розкриття, так і одночасного запуску цих пристроїв для його зупинки.

Одержані результати можна покласти в основу геометричного моделювання керування роботами на орбітальній станції в супервізорному режимі із центра керування польотами з переходом в особливо відповідальних випадках на ручне керування. Такий підхід можна реалізувати за умови достатньо високого рівня сенсорного й телекомунікаційного оснащення, що забезпечить функціонування безлюдних технологій. Це являється головною перевагою робототехнічних баз на орбіті. Вони не вимагатимуть систем життєзабезпечення, таких як підтримання атмосфери, постачання їжі, води, ліквідації відходів. А найголовніше забезпечать питання безпеки як захисту людей від несприятливих умов космічного простору. Все це приводить до істотного зниження коштовності експлуатації космічних апаратів.

Зрозуміло, що наведена геометрична модель чотириланкової стержневої конструкції в невагомості потребує подальших досліджень для її наближення до реальної конструкції. Необхідно розробити конструкцію циліндричного шарніру з системою фіксації розкриття, а також враховувати моменти інерції стержнів при обертанні елементів конструкції. До ще не реалізованих можливостей дослідження руху маятнкової системи у невагомості можна віднести врахування нерівних довжин ланок стержневої конструкції, а також нерівних мас вузлових елементів і ланок. Розробка ілюстративної геометричної моделі інерційного розкриття багатоланкової стержневої конструкції пояснює використання умовних одиниць параметрів у тестових прикладах.

6. Висновки

1. Одержані розв'язки системи диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду дозволили наближено описати рухи у невагомості стержневої конструкції, подібної чотириланковому маятнику. Це дало можливість конкретизувати геометричні моделі розкриття стержневих конструкцій та спостерігати за ними в режимі комп'ютерної анімації.

2. Для моделювання дії піротехнічного пристрою розроблено схему запуску руху стержневої конструкції шляхом впливу імпульсами на кінцеві точки її ланок. Помічено, що імпульс дії на ланку стержневої конструкції чисельно дорівнює значенню першої похідної функції, яка описує зміну величини відповідного кута як узагальненої координати. А також розроблено схему зупинки руху за допомогою піротехнічних пристроїв у циліндричних шарнірах між ланками. Це дало можливість продемонструвати у вигляді геометричних моделей реалізації імпульсних реактивних двигунів у якості елементів впливу на процеси розкриття стержневої конструкції.

3. За допомогою комп'ютерної анімації визначено взаємне розташування ланок чотириланкових стержневих конструкцій, одержаних в результаті інерційного розкриття відповідних ланок за допомогою імпульсних реактивних двигунів. Аналіз кадрів анімацій дозволив обрати необхідний момент часу фіксації (зупинки) розкриття, коли виникне необхідне для використання взаємне розташування ланок стержневих конструкцій, а також обчислити поточні значення кутів між ланками.

4. На основі інерційного розкриття чотириланкових стержневих конструкцій наведено схеми дії маніпуляторів для захвату циліндричних тіл, осі яких розташовано паралельно або перпендикулярно відносно поверхні космічного апарату. Показано, що для впроваджень інерційного розкриття необхідно на кінцеві точки ланок подіяти імпульсами піротехнічних пристроїв з величинами, відповідно, $\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ умовних одиниць. Для забезпечення конкретних впроваджень було розраховано час розкриття конструкції та визначено величини кінцевих кутів розкриття.

5. В результаті досліджень було побудовано графіки зміни у часі функцій узагальнених координат, а також перших та других похідних цих функцій; на базі цього оцінено силові характеристики системи в момент фіксації (зупинки) розкриття. Одержані фазові траєкторії процесу розкриття дозволяють оцінити швидкості елементів конструкцій в момент гальмування розкриття.

6. Наведено тестові приклади розкриття у невагомості деяких варіантів чотириланкових стержневих конструкцій типу «рука робота» для захоплення у просторі об'єктів циліндричної форми. Приклади доводять можливості геометричного моделювання об'єктів в невагомості на основі розкриття чотириланкових стержневих конструкцій, коли рушіями процесу будуть імпульсні реактивні двигуни, встановлені на кінцевих точках ланок стержневої конструкції.

Література

1. Алпатов А. П., Белоножко П. А., Белоножко П. П., Витушкин А. А., Тарасов С. В., Фоков А. А. Тенденции развития космических манипуляционных систем. Сборник докладов научной конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». Днепропетровск, 2011. С. 176–180.

2. Белоножко П. П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. // Аналитический обзор № 12. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 110–153.

3. Алпатов А. П., Белоножко П. А., Белоножко П. П., Кузьмина Л. К., Тарасов С. В., Фоков А. А. Перспективы использования и особенности исследования динамики космических манипуляторов с упругими конструктивными элементами // Техническая механика, 2012. № 1. С. 82–93.

4. Алпатов А. П. Динаміка перспективних космічних апаратів // Вісник НАН України, 2013. № 7. С. 6–13.

5. Зимин В. Н., Крылов А. В., Мешковский В. Е., Сдобников А. Н., Файзуллин Ф. Р., Чурилин С. А. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. № 10. С. 179–191. doi:10.7463/1014.0728802

6. Виноградов П. В., Железняков А. Б., Спасский Б. А. Актуальные направления развития космической робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. №4. Вып. 9. С. 3–12.

7. Jonathan's Space Report – Latest Issue/ Geostationary Satellite Log [Electronic resource] // Jonathan's Space Report. URL: <http://planet4589.org/space/book/LOGS/logindex/geo.html>

8. Hoyt R., Cushing J. and Slostad J. SpiderFab: Process for On-Orbit Construction of Kilometer-Scale Apertures. // Tethers Unlimited Inc. Report. National Aeronautics and Space Administration. Available URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Hoyt_2012_PhI_SpiderFab.pdf (дата звернення: 03.11.2018).

9. The Global Exploration Roadmap, International Space Exploration Coordination Group, August 2013 // National Aeronautics and Space Administration: URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/GER-2013_Small.pdf. (дата звернення: 03.11.2018).

10. Evan Ackerman. NASA Will Grab an Asteroid Using a Spiky Robot Gripper // NASA-IEEE: URL: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/space-robots/heres-how-nasa-will-graban-asteroid> (дата звернення: 03.11.2018).

11. Danger from space junk // Wonderful-planet.ru: URL:<http://wonderful-planet.ru/chto-novogo/60-...skij-musor.html> (дата звернення: 03.11.2018).

12. Куценко Л. М., Запольський Л. Л. Геометричне моделювання розгортання у невагомості багатоланкової конструкції з інерційним розкриттям // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2017. Т. 2, № 3. Вип. 62. С. 284–291.

13. Kutsenko L., Shoman O., Semkiv O., Zapolsky L., Adashevskay I., Danylenko V. et. al. Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. Vol. 6. Issue 7(90). P. 42–50.

14. Куценко Л. М., Пікрасов М. М., Запольський Л. Л. Ілюстрації до геометричного моделювання інерційного розкриття багатоланкового маятника у невагомості. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>

15. Kutsenko L., Semkiv O., Zapolskiy L., Shoman O., Ismailova N, Vasyliiev S. et. al. Geometrical modeling of the shape of a multilink rod structure in weightlessness under the influence of pulses on the end points of its links // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018. Vol. 2. Issue 7(92). P. 44–58.

16. Куценко Л. М., Пікрасов М. М., Запольський Л. Л. Ілюстрації до статті геометричне моделювання процесу розкриття стержневих конструкцій у невагомості // Режим доступу: URL:<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>

17. Kutsenko L., Vanin V., Semkiv O., Zapolskiy L., Shoman O., Martynov V., Morozova G., Danylenko V., Kryvoshei B., Kovalov O. Geometrical modeling of the unfolding of spatial rod structures, similar to the four-link pendulum, in weightless // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018. Vol. 5. Issue 7 (95). P. 70–80.

18. Куценко Л. М., Пікрасов М. М., Запольський Л. Л. Геометричне моделювання розкриття у невагомості деяких просторових стержневих конструкцій. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7051>

L. Kutsenko¹, DSc, Professor, Professor of the Department

L. Zapolskiy², PhD, Senior Research

O. Kovalev¹, PhD, Associate Professor of the Department

B. Krivoshey¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

S. Shevchenko¹, Lecturer of the Department

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*Ukrainian Research Institute of Civil Defense, Kyiv, Ukraine*

SIMULATION OF THE ACTION OF A GRIPPER TYPE FOR CYLINDRICAL OBJECTS DURING RESCUE OPERATIONS UNDER ZERO GRAVITY CONDITIONS

A geometric model of the mechanical manipulator designed for capturing and holding cylindrical objects in zero gravity conditions is proposed. The movement of the individual links of the manipulator is possible due to the action of the pyrotechnic engines pulses at the end points of the links. The relevance of the topic is determined by necessity to improve methods of providing preventive, repair and rescue operations in zero gravity by using mechanical grips of the “robot arm” located outside of various types of spacecraft. To describe the inertial motion of opening the manipulator core structure in zero gravity, second-order Lagrange equations were used, additionally, only the kinetic energy of the system were taken into account. Based on the inertial opening of the mechanical manipulator’s four-bar core structures, schemes of mechanical grippers actions with cylindrical objects have been developed. The axes of these grippers are perpendicular to the body of the spacecraft. The parameters and original conditions of the initial movement of the four-bar structure are determined for the optimal placement of these bars. It is shown that for inertial opening of the mechanical manipulator core structures is rational to use pyrotechnic engines, the pulse magnitudes of which are determined by corresponding coordinates of the vector $U' = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ in standard units. The graphs of the time variation for the functions of angles as the generalized coordinates, as well as the first and second derivatives of these functions, are constructed. In a result of the calculations, an assessment of the power characteristics of the system at the time of braking the process of disclosure is given.

Keywords: four-bar core construction, mechanical grip, structure opening in weightlessness, second-order Lagrange equations

References

1. Alpatov, A. P., Belonozhko, P. A., Belonozhko, P. P., Vitushkin, A. A., Tarasov, S. V., Fokov, A. A. (2011). Trends in the development of space-based manipulation systems. Collection of reports of the scientific conference "Information technologies in the management of complex systems. Dnepropetrovsk, 176–180.
2. Belonozhko, P. P. (2016). Space Robotics. The current state, future tasks, development trends. Analytical review. Science and education. Bauman MGTU, № 12. 110–153. DOI: 10.7463/1216.0853919
3. Alpatov, A. P., Belonozhko, P. A., Belonozhko, P. P., Kuzmina, L. K., Tarasov, S.V., Fock, A. A. (2012). Prospects for the use and features of the study of the dynamics of space manipulators with elastic structural elements. Technical Mechanics, 1, 82-93.
4. Alpatov, A. P. (2013). Dynamics of perspective spacecraft. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, 7, 6–13.
5. Zimin, V. N., Churilin, A.V. (2014). Features of the calculation of the disclosure of large-sized transformable structures of different configurations. Science and Education. Bauman MGTU, 10. 179–191. DOI: 10.7463/1014.0728802
6. Vinogradov, P. V., Zheleznyakov, A. B., Spassky, B. A. (2015). Actual directions of development of space robotics. Robotics and technical cybernetics, 4(9), 3–12.
7. Jonathan’s Space Report (2018). Latest Issue. Geostationary Satellite Log. Retrieved from: <http://planet4589.org/space/book/LOGS/logindex/geo.html>
8. Hoyt, R., Cushing, J. and Slostad, J. (2013). SpiderFab: Process for On-Orbit

Construction of Kilometer-Scale Apertures. Tethers Unlimited Inc. Report. National Aeronautics and Space Administration. Retrieved from: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/Hoyt_2012_PhI_SpiderFab.pdf

9. The Global Exploration Roadmap, International Space Exploration Coordination Group (2013). National Aeronautics and Space Administration. Retrieved from: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/GER-2013_Small.pdf

10. Evan Ackerman (2015). NASA Will Grab an Asteroid Using a Spiky Robot. IEEE. Retrieved from: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/space-robots/heres-how-nasa-will-graban-asteroid>

11. Danger from space junk (2013). Wonderful-planet.ru. Retrieved from <http://wonderful-planet.ru/chto-novogo/60-...skij-musor.html>

12. Kutsenko, L. M., Zapolsky, L. L. (2017). Geometric modeling of deployment in weightlessness of multi-faceted design with inertial disclosure. Bulletin of Kherson National Technical University, 3(62), 284–291.

13. Kutsenko, L., Shoman, O., Semkiv, O., Zapolskiy, L., Adashevskay, I., Danylenko, V. et. al. (2017). Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6, Issue 7(90), 42–50. doi: doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114269

14. Kutsenko, L. M., Pikasov, M. M., Zapolskiy, L. L. (2017). Illustrations for geometric modeling of inertial disclosure of a multi-faceted pendulum in weightlessness. Retrieved from: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>

15. Kutsenko, L., Semkiv, O., Zapolskiy, L., Shoman, O., Ismailova, N., Vasyliiev, S. et. al. (2018). Geometrical modeling of the shape of a multilink rod structure in weightlessness under the influence of pulses on the end points of its links. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2, Issue 7(92), 44–58. doi: [10.15587/1729-4061.2018.126693](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126693)

16. Kutsenko, L. M., Pikasov, M. M., Zapolsky, L. L. (2018) Illustrations to the article geometric modeling of the process of opening the bar structures in weightlessness. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>

17. Kutsenko, L., Vanin, V., Semkiv, O., Zapolskiy, L., Shoman, O., Martynov, V., Morozova, G., Danylenko, V., Kryvoshei, B., Kovalov, O. (2018). Geometrical modeling of the unfolding of spatial rod structures, simular to the four-link pendulum, in weightless. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5, Issue 7(95), 70–80.

18. Kutsenko, L. M., Pikasov, M. M., Zapolsky, L. L. (2018). Geometrical modeling of the opening of the weightlessness of some spatial rod structures. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7051>

Надійшла до редколегії: 05.09.2018

Прийнята до друку: 09.11.2018