

д. т. н., професор **Куценко Л. М.**,
leokuts@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1554-8848>

к. т. н., доцент **Калиновський А. Я.**,
kalinovskiy.a@nuczu.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1021-5799>

асистент **Сухарькова О.І.**,
lena_sukharkova@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1033-4728>
Національний університет цивільного захисту України (м. Харків)

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ РОЗКРИТТЯ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНИХ РОБІТ У НЕВАГОМОСТІ

Для виконання аварійно-рятувальних робіт в умовах невагомості запропоновано спосіб формоутворення стержневих конструкцій, елементи яких поєднані подібно чотириланковому маятнику. 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 та дослідження нових технологічних схем розкриття каркасів космічних інфраструктур. У тому числі - каркасів конструкцій механічних захватів (типу «руки робота»), розташованих зовні космічних апаратів.

На основі інерційного розкриття чотириланкових стержневих конструкцій розроблено схеми дії маніпуляторів для захвату циліндричних тіл, осі яких розташовано паралельно або перпендикулярно відносно поверхні космічного апарату. Визначено параметри та початкові умови запуску руху чотириланкової стержневої конструкції з метою одержання необхідного розташування ланок. Показано, що для впроваджень варіантів інерційного розкриття необхідно застосувати комплект уніфікованих піротехнічних пристроїв, величини імпульсів яких визначаються координатами вектора $U'=\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ умовних одиниць.

Результати призначено для геометричного моделювання варіантів розкриття чотириланкових стержневих конструкцій в умовах невагомості. Наприклад, каркасів для орбітальних інфраструктур, а також механічних маніпуляторів для захвату космічних об'єктів

Ключові слова: стержнева конструкція; процес розкриття у космосі; маніпулятор для захвату тіл; рівняння Лагранжа другого роду.

Постановка проблеми. Задачі динаміки маятникових систем є традиційним предметом дослідження технічної механіки. Одна з таких задач присвячена поведженню маятникових систем у невагомості. Механічну інтерпретацію тут можна пов'язати з коливанням (трансформуванням) елементів багатоланкового маятника з метою надання стержневій конструкції необхідної форми після доставки її на орбіту у складеному вигляді. В роботі [1] наголошено, що переважна кількість космічних апаратів за своєю механічною суттю є просторово розвиненими механічними системами змінюваної конфігурації для роботи в космосі в умовах, близьких до невагомості. Моделі динаміки зазвичай представлені системами диференціальних рівнянь руху, а під математичним моделюванням розуміють чисельне розв'язання цих рівнянь або аналітичні інтерпретації можливих рішень. Особливості розрахунку розкриття великогабаритних конструкцій різних конфігурацій наведено в роботі [2]. Приклади космічних об'єктів, що трансформуються у просторі, наведено в роботах [3, 4].

Для визначеності далі мова піде про прямолінійні стержні, скріплені між собою подібно елементам багатоланкового маятника і складені при доставці ніби побутовий метр. Стержні виготовлені з надлегких матеріалів, наприклад, з полімерних композитних матеріалів на основі епоксидної смоли, армованої графітовими або кевларовими волокнами. Після доставки на орбіту запланована просторова форма конструкції утворюється шляхом трансформування стержнів за допомогою механічної операції *розкриття*. Розкриття чотириланкової стержневої конструкції розглядається як аналог «коливання» у невагомості чотириланкового маятника. Зазначимо, що термін «маятник» у випадку невагомості застосовувати не коректно. Тому далі часто вживатимемо термін «чотириланкова стержнева конструкція (або система)».

Керування розкриттям великогабаритних конструкцій у космічному просторі є складною науково-технічною задачею механіки, яка не має аналогів у наземній техніці. При реалізації будь-якої схеми розкриття стержневої конструкції у невагомості виникає проблема вибору технічних пристроїв для запуску (активації) процесу розкриття. На практиці найбільш ймовірним є одноразове розкриття, коли стержнева конструкція набуває геометричної форми і фіксується відразу після доставки на орбіту. Тоді електродвигуни або інші технічні пристрої (пружні елементи та метали з «термічною пам'яттю») після розкриття і фіксації конструкції утворюватимуть зайвий (і не дешевий) баласт.

Альтернативу традиційним рушіям розкриття можуть скласти піротехнічні імпульсні реактивні двигуни (типу піропатронів). В роботі [5] наведено основні відомості про піротехнічні пристрої для використання в космічних інфраструктурах. До переваг цих пристроїв слід віднести малу вагу і дешевизну, а також можливість налаштування на потрібну і заздалегідь розраховану величину імпульсу. Витримують переважання

в процесі доставки на орбіту. Імпульсні піропатрони не потребують розконсервування та тестування перед запуском розкриття конструкції. Важливим є можливість запуску їх дії дистанційно (без дротів) за допомогою радіосигналів або рентгенівського випромінювання. Не потрібне живлення струмом та здійснення комутації роботи. Все це спонукало розглянути піротехнічні імпульсні двигуни як перспективні пристрої для розкриття «маятникоподібних» стержневих конструкцій. При цьому імпульсні двигуни мають встановлюватися на кінцевих точках ланок стержневої конструкції. Зазначена технологія розкриття стержневих конструкцій прийнятна для виконання одноразового розкриття.

Динаміку процесу розкриття конструкції у вигляді чотириланкової стержневої системи доцільно досліджувати на основі варіаційного принципу Лагранжа. Виникає питання про адаптування до невагомості «коливання» чотириланкового маятника як основи геометричної моделі розкриття (трансформації) орбітального об'єкта. Відповідь на це питання можна знайти у роботах, присвячених застосуванню рівнянь Лагранжа другого роду для механічних систем у невагомості [6]. Формально вважається, що розрахунки стосовно трансформування у часі стержневих конструкцій у невагомості можна виконувати, користуючись лише поняттями кінетичних енергій. При складанні рівнянь Лагранжа другого роду потенціальну енергію консервативної механічної системи можна вважати «близькою до нуля». Після запуску коливань піротехнічними імпульсами, величина кінетичної енергії для малого проміжку часу має залишатися незмінною. Таке припущення дозволяє розробити формальний (ідеалізований) підхід до геометричного моделювання розкриття стержневих конструкцій – аналогів чотириланкових маятників. Геометричне моделювання проявляється у створених комп'ютерних анімаційних фільмах, де унаочнюється взаємне переміщення ланок стержневих конструкцій в процесі розкриття. При подальших дослідженнях такі припущення планується зняти. Використання розроблених моделей допоможе на етапі проектування розрахувати компоновку та параметри функціонування конструкції в цілому.

Отже, на актуальність обраної теми вказує необхідність дослідження і запровадження імпульсних реактивних пристроїв як невибагливих і дешевих рушіїв процесу розкриття стержневих конструкцій типу чотириланкових маятників. Це буде економічно оправдано, коли на орбіті процес розкриття конструкції планується здійснити лише один раз. В якості таких рушіїв пропонується використати імпульсні піротехнічні піропатрони, встановлені на кінцевих точках ланок чотириланкової стержневої конструкції. Піротехнічні пристрої мають ряд переваг порівняно з відомими засобами запуску розкриття конструкції. Все це вказує на доцільність дослідження геометричних моделей розкриття стержневих конструкцій в умовах невагомості з імпульсними двигунами на кінцевих точках їх ланок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При розробці схем розкриття багатоланкових конструкцій виникає необхідність у створенні математичних моделей, які адекватно описують рухи. В основу проведених досліджень покладено поняття багатоланкового маятника. В роботі [7] наведено дослідження динаміки N-ланкового маятника, а в роботі [8] – моделювання коливань маятника, елементами якого будуть геометричні об'єкти. Але роботах [7, 8] відсутнє графічне підтвердження результату моделювання. Деякі можливості математичного процесора Maple для моделювання коливань багатоланкового маятника продемонстровано в роботі [9]. У роботі [10] розглядається застосування методу окремих тіл для моделювання багатоланкових рухомих конструкцій космічних апаратів. На прикладі механічної системи розкриття стулок панелі сонячних батарей сформовані матриці кінематичних зв'язків, що визначають кінематику відносного руху суміжних тіл системи. У роботі [11] запропоновано опис динаміки сонячних батарей у процесі їхнього розкриття з врахуванням пружних властивостей елементів. Розроблено математичні моделі механізмів розкриття, тросової синхронізації, гальмування й фіксації панелей. У роботі [12] наведено розрахунки коливань N-ланкового оберненого маятника. У роботі [13] запропоновано спосіб керування багатоланковим оберненим маятником на площині в межах заданого положення рівноваги. За допомогою способу можна приводити маятник за кінцевий час у положення рівноваги обмеженим моментом, прикладеним до першої ланки. На відміну від плоского маятника, керованого скалярним моментом, у роботі [14] керування маятником із двоступеневими шарнірами являє собою двовимірний вектор. Ця обставина зажадала модифікації алгоритму побудови керування. Реалізовано керування у формі зворотного зв'язку, що приводить маятник з довільного положення рівноваги в задане положення обмеженим моментом, прикладеним до першої ланки. Але роботи [13, 14] орієнтовані переважно на керування рівновагою оберненого маятника на візку у полі земного тяжіння.

Прототипом розглянутого в даній роботі способу розкриття стержневої конструкції є тросова система розкриття. Передбачає керування систем стержнів, з'єднаних подібно багатоланковому маятнику, за допомогою системи тросів, керованих електродвигунами. У роботі [15] побудовано математичну модель процесу розкриття багатоланкової конструкції сонячної батареї із тросовою системою розкриття. На основі аналізу кінематичної схеми системи розкриття обрані розміри радіусів роликів і передатного відношення двох типів шестерних механізмів, що забезпечують задану послідовність фіксації ланок. Для дослідження процесу розкриття сонячної батареї використане рівняння Лагранжа другого роду. У роботі [16] розглянуто математичні методи проектування тросової системи розкриття багатоланкової конструкції. На основі аналізу запропонованої математичної моделі розраховані додаткові кути повороту

ланок, викликані пружністю тросів системи синхронізації. Визначено попередні натяги тросів системи синхронізації й параметри конструкції для забезпечення гарантованого збереження працездатності системи розкриття при зміні моментів опорів у заданому діапазоні. У роботах [17, 18] для розв'язання завдання проектування тросової системи розкриття багатоланкової конструкції використано метод зовнішньої апроксимації. Досліджено можливість послідовної фіксації ланок (від останньої до першої) залежно від максимальних кутів повороту ланок, керованих за допомогою натягу тросів. При цьому не потрібно змінювати раніше знайдені оптимальні радіуси роликів.

Але існуючі схеми розкриття тросових систем є надто складними для реалізації у випадку великих розмірів ланок (порядку десятків метрів). Цей висновок базується на необхідності синхронізації та комутації електродвигунів для регулювання величин кутів в вузлах конструкцій з метою надання багатоланковій конструкції розрахованої геометричної форми, що є самостійною задачею.

У роботі [19] розглянуто моделювання процесу розкриття багатоланкових замкнутих космічних конструкцій із застосуванням програмних комплексів EULER і Adams на прикладі складного антенного контуру й фрагмента космічного відбивача. У роботі [20] виконано моделювання процесу розкриття великогабаритних космічних конструкцій із застосуванням сучасних програмних комплексів на прикладі трьох кінематичних схем розкриття сонячних батарей. Дано загальний підхід до побудови моделей таких конструкцій. Результати цих робіт дозволяють моделювати процес розкриття багатоланкових космічних конструкцій, з визначенням швидкості і тривалості розгортання, а також форми проміжних положень.

У роботах [21, 22] 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). Це дозволило реалізувати розкриття багатоланкового маятника за допомогою одного двигуна, що не потребує синхронізувати між собою засоби керування величинами кутів в окремих вузлах багатоланкової конструкції. У роботі [24] досліджено допустиму похибку величини імпульсу для ініціювання розгортання багатоланкової стержневої конструкції з інерційною системою розкриття за умови одержання необхідного розташування її ланок. А також наведено спосіб визначення параметрів та початкових умов ініціювання коливань двохланкової стержневої конструкції для одержання циклічної траєкторії кінцевої точки другої ланки. У роботах [23, 25] наведено ілюстрації деяких положень, які сприятимуть розумінню геометричної моделі розкриття стержневих конструкцій.

В результаті огляду літературних джерел [1–20] були виявлені питання, ще не досліджені іншими авторами, що дозволило сформулювати наступну проблему досліджень. Необхідно дослідити питання запуску та зупинки руху багатоланкових конструкцій у невагомості завдяки дії імпульсних двигунів на кінцеві точки ланок конструкції, а також питання визначення необхідного моменту часу фіксації (зупинки) розкриття у разі виникнення прийняттого для використання взаємного розташування у просторі ланок стержневих конструкцій. При цьому наявність протяжних ланок конструкції не повинна принципово впливати на загальність реалізації інерційного способу розкриття.

Формулювання цілей статті. Розробити способи:

- запуску та зупинки руху багатоланкових конструкцій у невагомості завдяки дії імпульсних двигунів на кінцеві точки ланок конструкції;
- визначення необхідного моменту часу фіксації (зупинки) розкриття у разі виникнення прийняттого для використання взаємного розташування у просторі ланок стержневих конструкцій.
- навести тестові приклади геометричних моделей формування у просторі деяких об'єктів (типу «рука робота») на основі розкриття чотириланкових стержневих конструкцій.

Основна частина. Розглянемо геометричну модель процесу розкриття у невагомості стержневої конструкції, аналогічної чотириланковому маятнику.

1. Пояснимо загальну схему розрахунку процесу розкриття стержневої конструкції з використанням механіки Лагранжа.

Для наочності наведемо покрокову послідовність дій при моделюванні процесу розкриття у невагомості на уявній площині стержневої конструкції у вигляді чотириланкового маятника. Вважається, що перша ланка чотириланкової стержневої конструкції приєднується до космічного апарату. Маса апарату на порядки більша сумарної маси елементів конструкції, тому вузол кріплення вважається нерухомим. Оскільки маса космічного апарату набагато більша за масу стержневої конструкції, то її орієнтація стабілізується. Також вважатимемо, що стержні виготовлено з легкого та міцного вуглепластика, тому вся маса стержневої конструкції буде зосереджена у вантажах вузлових точок.

Крок 1. На уявній площині обираються узагальнені координати руху стержневої системи у вигляді кутів, які ланки конструкції утворюють з фіксованим напрямком. Задаються параметри стержневої конструкції – довжини ланок та маси вантажів. З використанням кутів та параметрів описуються формальні (віртуальні) координати вузлових точок ланок чотириланкової стержневої системи.

Крок 2. За допомогою узагальнених координат та параметрів визначається лагранжіан рухомої стержневої системи, опис якого у

випадку невагомості співпадатиме з виразом для кінетичної енергії системи.

Крок 3. За допомогою лагранжіана складаємо диференціальні рівняння Лагранжа другого роду, кількість яких відповідає кількості функцій – узагальнених координат стержневої системи. Як правило, аналітичні вирази для рівнянь Лагранжа другого роду є надто громіздкими. Тому бажано використовувати комп'ютерні пакети, спроможні оперувати з інформацією у вигляді аналітичних виразів. Наприклад, пакет *maple* дозволяє оперувати з одержаним наближеним розв'язком диференціального рівняння як зі звичайною функцією.

Крок 4. Находимо наближені розв'язки рівняння Лагранжа другого роду, використовуючи у якості умов початкові значення кутів та миттєвих швидкостей зміни значень цих кутів як відповідні похідні. Підставивши знайдені наближені розв'язки у «формальні» формули кроку 2 одержуємо описи реальних координат точок ланок чотириланкової стержневої системи.

Крок 5. На основі одержаних залежностей в часі реальних координат кінцевих точок ланок створюємо комп'ютерний анімаційний фільм процесу розкриття чотириланкової стержневої системи. Завдяки унаочненню переміщення ланок стержневої конструкції можна, у певному розумінні, переконатися у адекватності одержаного розв'язку. Для цього, спираючись на зоровий аналізатор при спостереженні за кадрами фільму, необхідно проаналізувати рух стержневої конструкції і виявити хибні розв'язки у випадку «дивних» рухів ланок.

Крок 6. Розвиток процесу розкриття конструкції спостерігаємо за допомогою послідовних кадрів комп'ютерної анімації. В результаті обирається форма (тобто розташування ланок) стержневої конструкції, прийнятна для застосування. Це дає змогу визначити момент часу для зупинки (стопоріння) розкриття, а також обчислити відповідні цьому моменту миттєві значення величин кутів (узагальнених координат). Ці значення визначають стоп-код для фіксації розкриття пристроями в циліндричних шарнірах.

Крок 7. За допомогою одержаних наближених розв'язків рівняння Лагранжа другого роду будуємо графіки зміни у часі величин кутів як функцій узагальнених координат, а також перших та других похідних цих функцій. Зазначені залежності дають можливість обчислити швидкості та прискорення зміни величин цих кутів. Вказане дозволяє оцінити силові характеристики системи в момент зупинки і фіксування розкриття. У випадку, коли значення силових характеристик у вузлах виявляться недопустимо великими, то визначаємо інший моменту часу, коли стержнева конструкція в процесі шостого кроку розкриття набуде просторової форми, прийнятної для застосування.

В перелічених кроках дослідження процесу розкриття чотириланкової стержневої конструкції у невагомості особлива роль

належить крокам 5 і 6. В основу цих кроків закладено геометричне моделювання руху механічної системи. Дійсно, без унаочнення окремих фаз розкриття конструкції не можливо було б обрати момент часу, коли стержнева конструкція набула просторової форми, прийнятної для використання. Завдяки цьому у визначений момент часу з'являється можливість проводити в тому числі і аналіз механічних параметрів системи.

2. Далі наведемо пояснення принципу розкриття та зупинки в заданий момент часу чотириланкової стержневої конструкції.

Запуск розкриття. Оберемо уявну площину з декартовими координатами Ox , 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. 1).

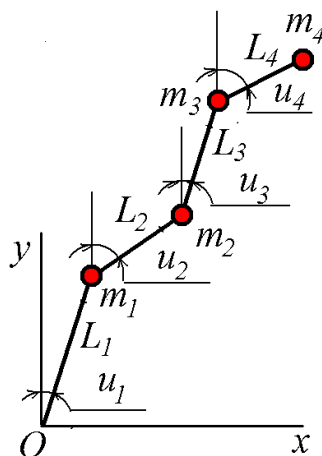


Рис. 1. Схема чотириланкової стержневої конструкції

Запуск руху стержневої конструкції у невагомості здійснюється шляхом вибору величин імпульсів, наданих кожному з кутів відхилень [22, 23]. Наприклад, $\mathbf{U}' = \{u_1'(0), u_2'(0), u_3'(0), u_4'(0)\}$ 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 $u_i'(0)$, ($i=1...4$). Вектори \mathbf{R}_i ($i=1...4$) напрямку надання швидкостей співпадають з напрямком дії імпульсних двигунів, направлених перпендикулярно відповідній ланці стержневої конструкції у кінцевих точках.

З врахуванням наданим 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 для нього величину імпульсу. І обов'язково піропатрони повинні закріплюватися так, щоб дії були спрямовані по нормалі до відповідної ланки в площині розкриття.

Для опису руху чотириланкової стержневої конструкції необхідно скласти та розв'язати систему рівнянь Лагранжа другого роду [7–9]. Для цього за допомогою узагальнених координат обчислюємо «віртуальні» координати вузлових точок:

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

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

$$\begin{aligned} L &= [m_1(x_1'^2 + y_1'^2) + m_2(x_2'^2 + y_2'^2) + \\ &+ m_3(x_3'^2 + y_3'^2) + m_4(x_4'^2 + y_4'^2)] / 2. \end{aligned} \quad (2)$$

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: $\mathbf{L}=\{L_1, L_2, L_3, L_4\}$; значень мас вантажів (шарнірів): $\mathbf{m}=\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$; значень початкових кутів відхилень: $\mathbf{U}=\{u_1(0), u_2(0), u_3(0), u_4(0)\}$, а також значень початкових швидкостей, наданих кутам відхилень $\mathbf{U}'=\{u_1'(0), u_2'(0), u_3'(0), u_4'(0)\}$. Всі значення параметрів в умовних величинах.

З врахуванням 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 [22].

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 $U_{\text{STOP}}=\{u_1(t_0), u_2(t_0), u_3(t_0), u_4(t_0)\}$.

Зупинка розкриття. У визначений за допомогою комп'ютерної анімації час t_0 виникає проблема зупинки розкриття. Вважається, що в цьому випадку ланки стержневої конструкції зайняли необхідне для використання розташування на уявній площині. Для зупинки руху необхідно одночасно застосувати вмонтовані у всі циліндричні шарніри стержневої конструкції спеціальні пристрої, здатні зафіксувати кути між ланками. Наприклад, в циліндричному шарнірі можливо передбачити ригель, який спрацьовував би завдяки дії піротехнічного пристрою. Піротехнічний пристрій повинен активуватися сигналом у визначений момент t_0 часу зупинки.

На рис. 2, *а* наведено кадр запуску процесу розкриття (піропатрон зображено червоним кольором), на рис. 2, *б* – кадр проміжного положення процесу розкриття, і на рис. 2, *в* – кадр зупинки розкриття стержневої конструкції за допомогою циліндричного ригеля (позначено червоним кольором). При разовому використанні можливе наскрізне пробивання обох циліндрів шарніру. На сайті [26] наведено анімаційний фільм активації та зупинки процесу розкриття.

Ригелі у всіх циліндричних шарнірах спрацьовують одночасно завдяки дистанційному керуванню піротехнічними пристроями. Сигнал на зупинку процесу розкриття надає комп'ютерна програма у вигляді «стоп-коду» в момент t_0 розкриття, який забезпечить розраховане розташування всіх ланок стержневої конструкції.

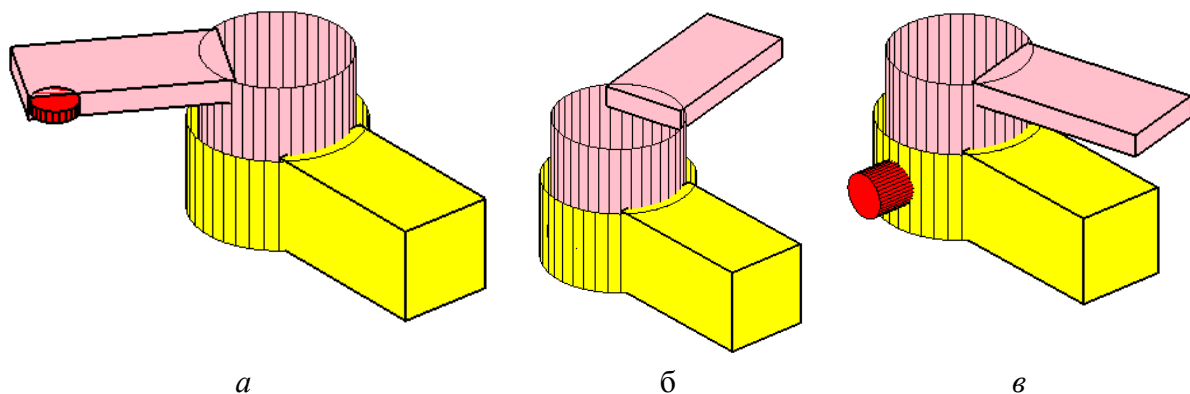


Рис. 2. Кадри дії піротехнічних пристроїв вузла маятника для:
а – активації руху (червоним зображено піропатрон);
б – руху за інерцією стержня;
в – зупинки процесу розкриття циліндричним ригелем

Отже, для функціонування розглянутої схеми розкриття стержневої конструкції необхідно два типи піротехнічних пристроїв.

Пристрої першого типу розташовуються на кінцевих точках ланок конструкції і призначені для запуску розкриття. Характеризуються високою точністю забезпечення величини «стартового» імпульсу. Ці величини можуть бути різними залежно від ланки конструкції. Команда початку розкриття подається одночасно на всі піротехнічні пристрої першого типу.

Пристрої другого типу розташовуються в циліндричних шарнірах і призначені для спрацювання ригелів. Характеризуються величиною імпульсу, достатньою для фіксування циліндрів шарніра, у тому числі і шляхом наскрізного пробивання. Отже, керування розглянутою схемою розкриття чотириланкової стержневої конструкції полягає у подачі двох сигналів піротехнічним пристроям – на запуск та на зупинку розкриття.

Для запобігання надмірних навантажень на елементи конструкції, що виникають при зупинці розгортання конструкції, стержні слід виготовляти з надлегких матеріалів. Наприклад, з полімерних композитних матеріалів на основі епоксидної смоли, армованої кевларовими волокнами.

3. Наведемо основні блоки maple програми моделювання об'єктів, геометрична форма яких базується на розкритті чотириланкових стержневих конструкцій.

Обираємо вхідні параметри та узагальнені координати, а також визначаємо кінетичну енергію системи (синтаксис мови maple):

```
L1 := 3: L2 := 3: L3 := 3: L4 := 3:
m1 := 1.: m2 := 1.: m3 := 1.: m4 := 1.:
q1 := Pi/2: q2 := -Pi/2: q3 := Pi/2: q4 := -Pi/2:
Dq1 := 0.1: Dq2 := 1.: Dq3 := 1.55: Dq4 := 2.5:
x1 := L1*sin(u1(t)): y1 := L1*cos(u1(t)):
x2 := x1 + L2*sin(u2(t)): y2 := y1 + L2*cos(u2(t)):
x3 := x2 + L3*sin(u3(t)): y3 := y2 + L3*cos(u3(t)):
x4 := x3 + L4*sin(u4(t)): y4 := y3 + L4*cos(u4(t)):
```

Обираємо наближений опис кінетичної енергії:

```
K := (m1*(diff(x1,t)^2 + diff(y1,t)^2) +
      m2*(diff(x2,t)^2 + diff(y2,t)^2) +
      m3*(diff(x3,t)^2 + diff(y3,t)^2) +
      m4*(diff(x4,t)^2 + diff(y4,t)^2) )/2:
```

За допомогою розробленої програми складаємо систему рівнянь Лагранжа другого роду у «maple - символічному» вигляді:

```
ODE1 := dT_U1_dt - dP_U1 = 0:
ODE2 := dT_U2_dt - dP_U2 = 0:
ODE3 := dT_U3_dt - dP_U3 = 0:
ODE4 := dT_U4_dt - dP_U4 = 0:
```

Задаємо початкові значення узагальнених координат:

```

initial := {u1(0)=q1, D(u1)(0)=Dq1, u2(0)=q2,
D(u2)(0)=Dq2, u3(0)=q3, D(u3)(0)=Dq3, u4(0)=q4,
D(u4)(0)=Dq4}:

```

За допомогою програми **dsolve** одержуємо наближені розв'язки системи рівнянь Лагранжа другого роду:

```

sol := dsolve({ODE1, ODE2, ODE3, ODE4}
union initial, numeric, output=listprocedure):
solu1 := subs(sol, u1(t)):
solu2 := subs(sol, u2(t)):
solu3 := subs(sol, u3(t)):
solu4 := subs(sol, u4(t)):
dsolu1 := subs(sol, diff(u1(t), t)):
dsolu2 := subs(sol, diff(u2(t), t)):
dsolu3 := subs(sol, diff(u3(t), t)):
dsolu4 := subs(sol, diff(u4(t), t)):

```

За допомогою одержаних наближених значень функцій та їх похідних будуюмо миттєві положення ланок маятника з використанням формул (1), а також будуюмо фазові траєкторії узагальнених координат. В результаті виконання програми одержимо залежно від часу послідовність кадрів анімаційних зображень розкриття конструкції. Під час перегляду кадрів анімацій обирається необхідне розташування ланок стержневих конструкцій і фіксується час t_0 , який відповідатиме обраному розташуванню. Одночасно видаються наближені значення поточних величин кутів $u_1(t_0)$, $u_2(t_0)$, $u_3(t_0)$ і $u_4(t_0)$ для обраного моменту часу t_0 . Ці значення будуть використані для формування «стоп-коду» процесу розкриття. Приклади ілюстровано аксонометричними зображеннями одержаних кінцевих фаз ланок стержневої конструкції.

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 $\mathbf{U}=\{\pi/2, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2\}$. 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 визначити силові характеристики в шарнірах між ланками в момент фіксування стержневої конструкції.

Вхідні параметри. Для всіх прикладів обрано однакової довжини ланок $\mathbf{L}=\{3, 3, 3, 3\}$ і маси вантажів $\mathbf{m}=\{1, 1, 1, 1\}$. А також на кінцеві точки ланок механізмів передбачено впливати комплектом уніфікованих піротехнічних пристроїв, величини імпульсів яких визначаються координатами вектора $\mathbf{U}'=\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$. Конкретні впровадження у прикладах відрізняються часом інтегрування системи рівнянь Лагранжа

другого роду (тобто часом процесу розкриття стержневої конструкції). А також координатами вектора «стоп-коду» U_{STOP} , які визначають досягнення прийнятної для використання взаємного розташування ланок в момент зупинки розкриття.

4. Наведемо приклади геометричного моделювання деяких об'єктів.

Приклад 1. При виконанні монтажних та аварійно-рятувальних робіт на орбіті доцільно використовувати конструкції механічних захватів типу "рука робота". Для спрощення розглянемо варіанти захвату циліндричного тіла. Наведемо геометричне моделювання схеми дії маніпулятора на базі розкриття чотириланкових стержневих конструкцій для захвату циліндра, розташованого паралельно поверхні космічного апарату.

Спочатку розглянемо схему розкриття двох чотириланкових стержневих конструкцій з метою захоплення області круга (рис. 3) радіуса $R=1.3$ з координатами центру $(0, -4.7)$.

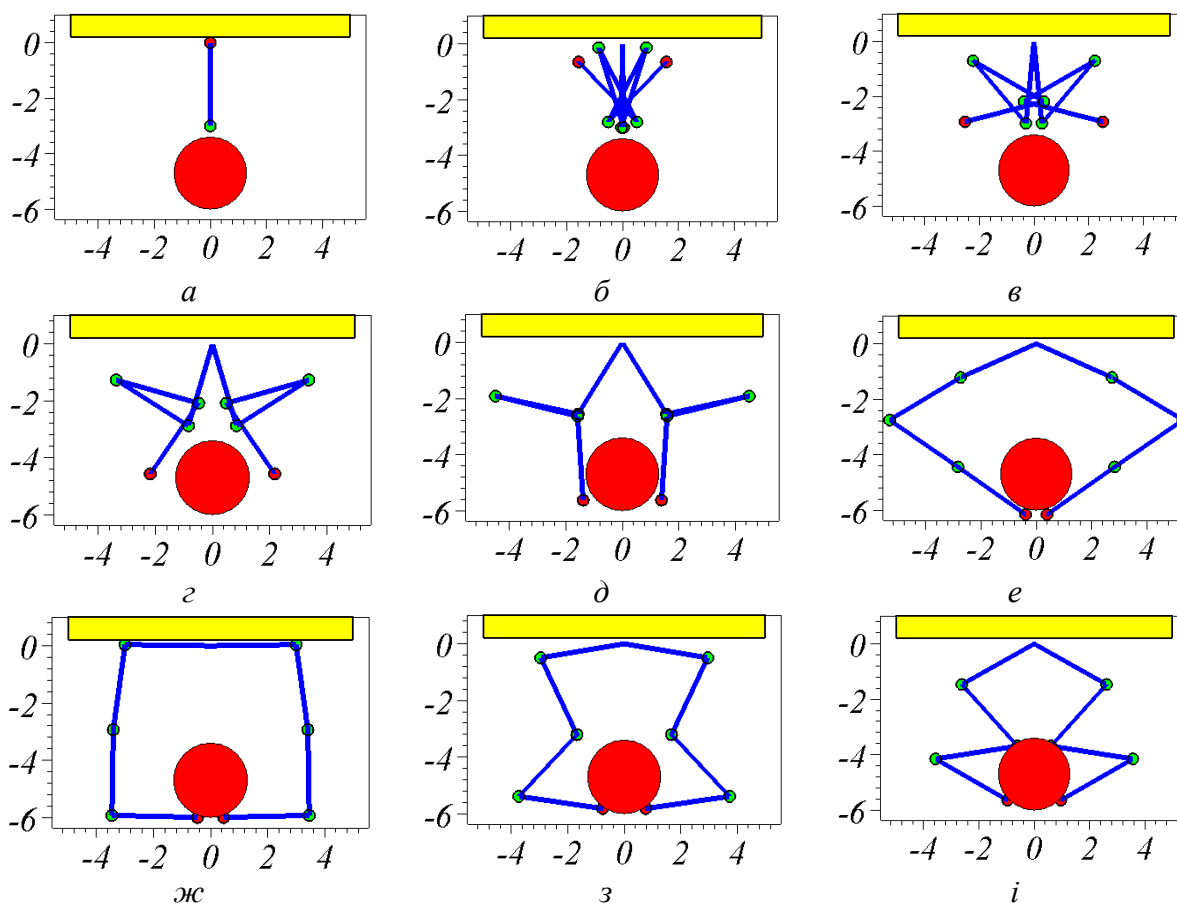


Рис. 3. Кадри схеми процесу захвата круга:
 $a - t=0$; $b - t=0.3$; $в - t=0.78$; $г - t=1.2$; $д - t=1.52$;
 $e - t=2$; $ж - t=2.5$; $з - t=2.8$; $i - t=3.14$

Значення всіх параметрів в умовних величинах. Для захоплення круга необхідно на кінцеві точки ланок подіяти комплектом уніфікованих піротехнічних пристроїв. Величини імпульсів яких визначаються координатами вектора $U'=\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$. Час інтегрування системи рівнянь $T=3.14$. На рис. 3 наведено послідовні кадри схеми захвату круга

двома чотириланковими стержневими конструкціями. Значення координат вектора «стоп-коду»: $U_{\text{STOP}} = \{0.5102, 2.306, 0.1527, 6.621\}$.

На рис. 4 зображено одержану на основі рис. 3, *i* геометричну модель захвату циліндра, розташованого паралельно поверхні космічного апарату.

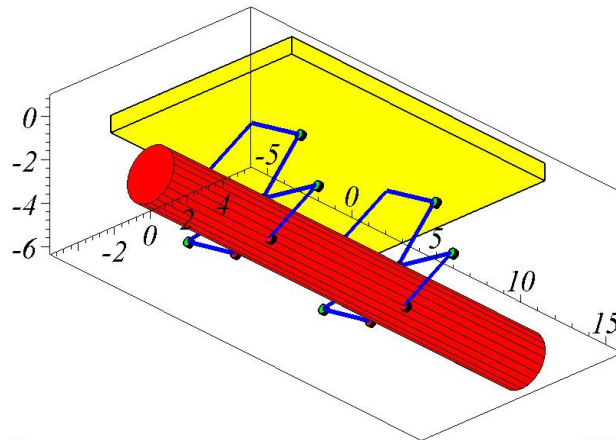


Рис. 4. Пара стержневих конструкцій для захвату циліндра у просторі, розташованого паралельно поверхні космічного апарату

На рис. 5 зображені фазові траєкторії узагальнених координат для прикладу 1. На фінальній стадії розкриття швидкості відповідних вузлів матимуть значення: $u_1'(3,14)=1$; $u_2'(3,14)=0.4$; $u_3'(3,14)=-2$; $u_4'(3,14)=-1.5$.

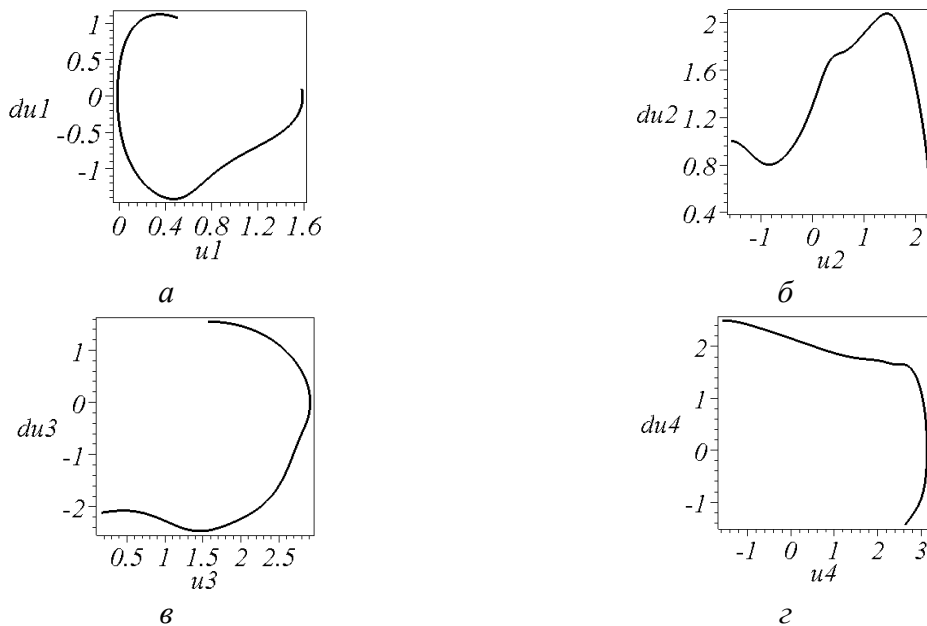


Рис. 5. Фазові траєкторії узагальнених координат для прикладу 1:

$a - u_1(t)$; $б - u_2(t)$; $в - u_3(t)$; $г - u_4(t)$

Приклад 2. Продовжуючи тему попереднього прикладу розглянемо інший варіант захвату циліндричного тіла. А саме, наведемо схему 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 необхідно на вузлові точки подіяти комплектом уніфікованих піротехнічних пристроїв. Час інтегрування системи рівнянь необхідно обрати $T=1.48$.

На рис. 6 наведено послідовні кадри схеми формування паралельного розташування останніх ланок двох чотириланкових стержневих конструкцій зі спільною нерухомою точкою. Значення координат вектора «стоп-коду» визначатимуть числа: $\mathbf{U}_{\text{STOP}}=\{1.051, -0.256, 2.906, 1.57\}$.

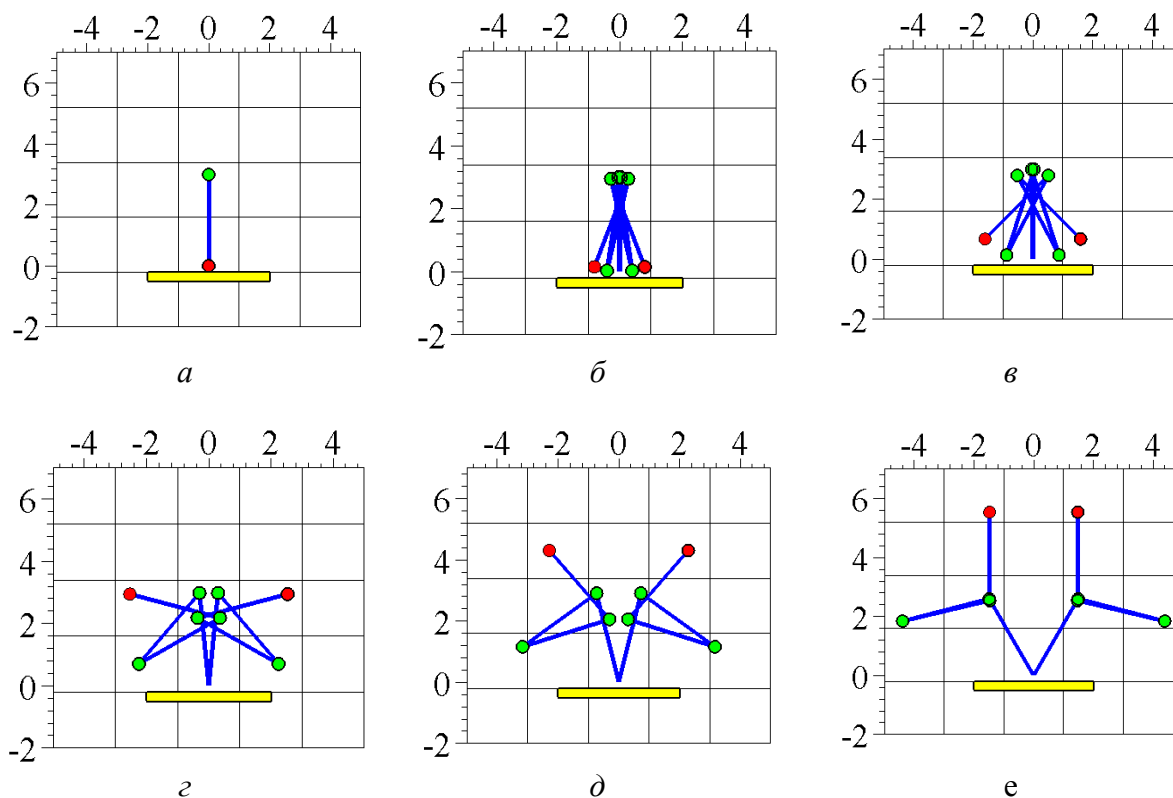


Рис. 6. Кадри процесу забезпечення схеми розташування паралельно двох останніх ланок:

$a - t=0$; $b - t=0.15$; $c - t=0.5$; $d - t=0.8$; $e - t=1.3$; $e - t=1.48$

На рис. 7 зображено геометричну модель одержаного на основі рис. 6, *e* схеми захвата циліндра радіуса $R=1.4$, розташованого перпендикулярно поверхні космічного апарату.

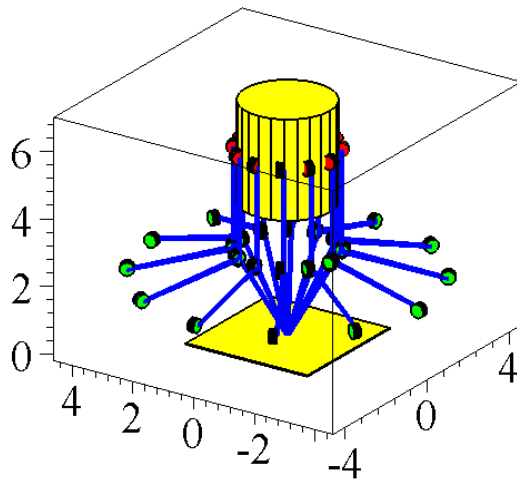


Рис. 7. Стержева конструкція, у якій останні ланки захватять циліндр, який розташовано перпендикулярно поверхні космічного апарату

На рис. 8 зображені фазові траєкторії узагальнених координат розкриття чотириланкової стержевої конструкції для прикладу 2. На фінальній стадії розкриття швидкості відповідних вузлів матимуть значення: $u_1'(1.48)=-0.8$; $u_2'(1.48)=1.05$; $u_3'(1.48)=-0.5$; $u_4'(1.48)=1.78$.

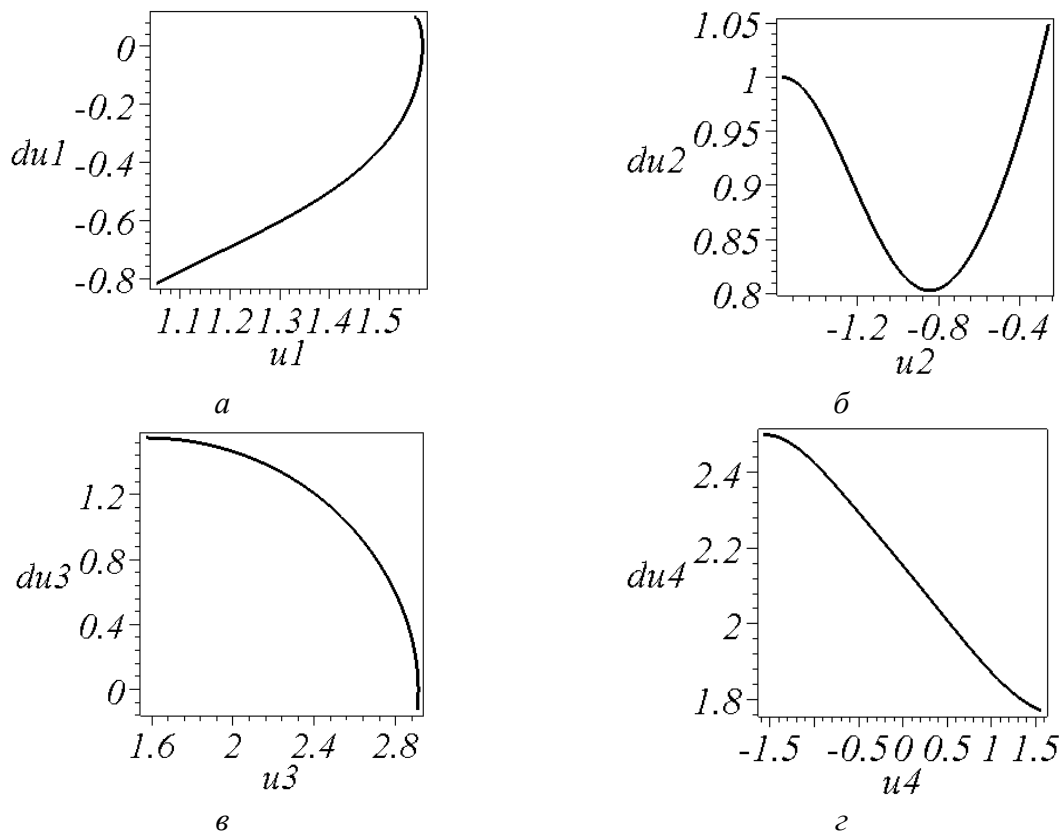


Рис. 8. Фазові траєкторії узагальнених координат для прикладу 2:
 $a - u_1(t)$; $б - u_2(t)$; $в - u_3(t)$; $г - u_4(t)$

Приклад 3. В деяких випадках необхідно забезпечити захват просторового об'єкта, але без дотику до нього (з причини його коштовності або безпеки). Для цього доцільно утворити сітку, яка б охоплювала об'єкт. Наведемо геометричне моделювання схеми утворення маніпулятора-сітки на базі розкриття чотириланкових стержневих конструкцій.

Спочатку розглянемо схему розкриття двох чотириланкових стержневих конструкцій з метою обмеження частини площини. Для задовільного розташування ланок двох чотириланкових стержневих конструкцій необхідно на вузлові точки подіяти комплектом уніфікованих піротехнічних пристроїв. Час інтегрування системи рівнянь необхідно обрати $T=2.38$. На рис. 9 наведено послідовні кадри доведення до схеми "замкненого" розташування елементів двох чотириланкових стержневих конструкцій зі спільною нерухомою точкою. Значення координат вектора «стоп-коду» визначатимуть числа: $U_{STOP}=\{0.036, 1.163, 1.871, 3.026\}$.

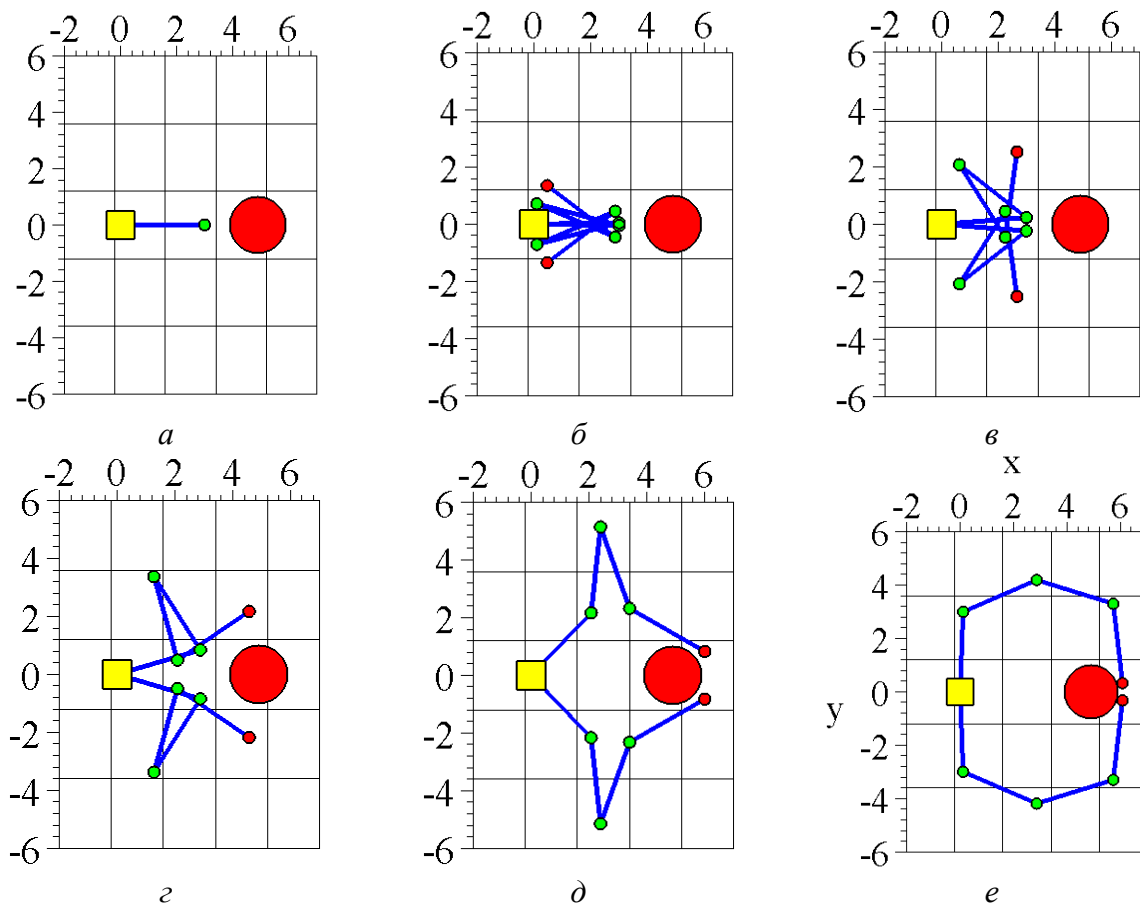


Рис. 9. Кадри процесу доведення до схеми "замкненого" розташування елементів стержневих конструкцій:
 $a - t=0$; $b - t=0.1$; $v - t=0.5$; $z - t=1.1$; $d - t=1.8$; $e - t=2.38$

На рис. 10 зображено геометричну модель захвата просторового об'єкта, одержаного на основі схеми рис. 9, *e*.

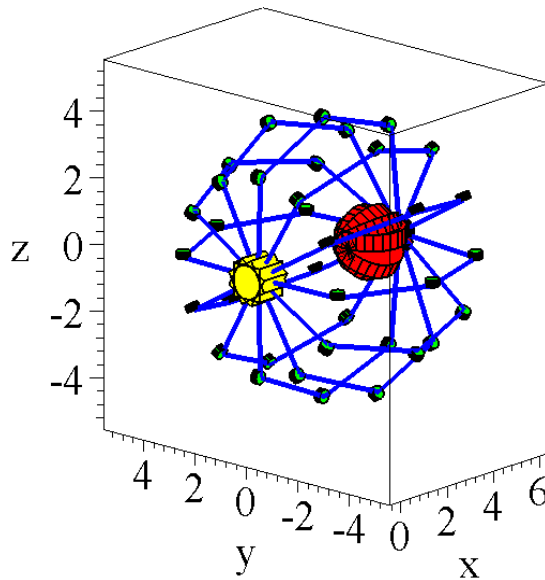


Рис. 10. Стержева конструкція, яка охоплює без дотику просторовий об'єкт

На рис. 11 зображені фазові траєкторії узагальнених координат розкриття чотириланкової стержевої конструкції для прикладу 3. На фінальній стадії розкриття швидкості відповідних вузлів матимуть значення: $u_1'(2.38)=-0.78$; $u_2'(2.38)=2$; $u_3'(2.38)=-2.2$; $u_4'(2.38)=1.3$.

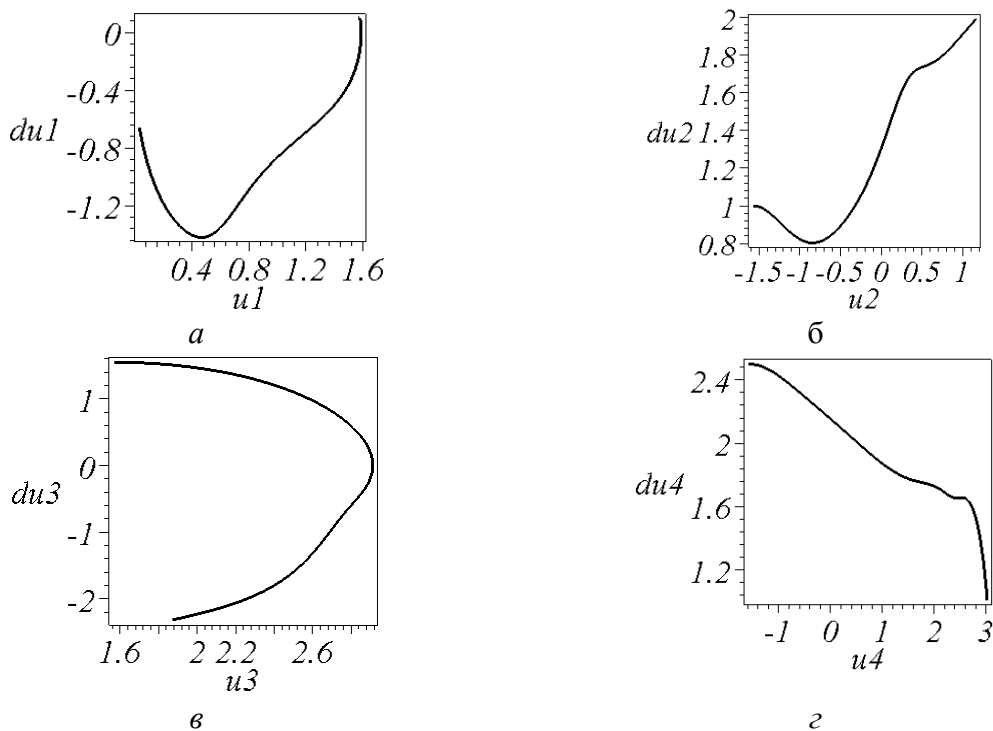


Рис. 11. Фазові траєкторії узагальнених координат для прикладу 3:
 $a - u_1(t)$; $б - u_2(t)$; $в - u_3(t)$; $г - u_4(t)$

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 координатами вектора $U'=\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$. Конкретні впровадження у прикладах відрізняються часом процесу розкриття стержневої конструкції, а також координатами вектора «стоп-коду» U_{stop} зупинки розкриття. У достовірності одержаних результатів можна переконатися за допомогою комп'ютерних анімацій, наведених на сайті [26].

Перспективи досліджень. Розроблений метод дозволяє спрогнозувати розташування елементів чотириланкових стержневих механізмів в процесі розкриття, а також будувати фазові траєкторії функцій узагальнених координат, які дозволяють визначити діапазон зміни значень кутів і швидкостей розкриття. В перспективі можливо визначати графіки прискорення та силових характеристик зміни величин кутів як функцій узагальнених координат.

В роботі наведено ідеалізовані геометричні моделі розкриття стержневих конструкцій, подібних до чотириланкових маятників. Показано, що в якості рушіїв процесу розкриття доцільно обирати імпульсні піротехнічні піропатрони, 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;
- не потребують розконсервування та тестування перед запуском розкриття конструкції;
- 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.

Зрозуміло, що наведена геометрична модель чотириланкової стержневої конструкції в невагомості потребує подальших досліджень для її наближення до реальної конструкції. Необхідно врахувати моменти інерції стержнів при обертанні елементів конструкції. До ще не реалізованих можливостей дослідження руху маятникової 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.

Розвиток даного напрямку досліджень полягатиме у використанні інших варіантів багатоланкових стержневих конструкцій – у яких проміжні вузли «материнської» конструкції можуть слугувати початковими вузлами «дочірніх» багатоланкових стержневих конструкцій. Цей напрямок важливий при розрахунку схем розкриття «зіркових» геометричних структур, коли декілька стержневих конструкцій матимуть спільну нерухому точку. Труднощі розвитку досліджень в цьому напрямку виникнуть при спробі розв'язати обернену задачу компоновки. А саме – по заданому кінцевому розташуванню елементів стержневої конструкції необхідно визначити раціональний набір параметрів багатоланкового маятника та початкових умов його руху, які забезпечать шукане розкриття. Проведені дослідження мають на меті створити основу розрахунку просторових багатоланкових стержневих конструкцій, у яких ланки в процесі розкриття виходитимуть за межі певної площини.

Висновки та перспективи.

1. 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.

2. 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.

3. 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 впровадження інерційного розкриття необхідно на кінцеві точки ланок подіяти імпульсами піротехнічних пристроїв з величинами $U'=\{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ умовних одиниць. Було розраховано час розкриття конструкції та визначено величини координат відповідного вектора «стоп-коду» U_{STOP} .

Література

1. Алтатов А.П. Динаміка перспективних космічних апаратів. *Вісник НАН України*. 2013. Вип. 7. С. 6–13.
2. 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. Вып. 10. С. 179–191. doi: <https://doi.org/10.7463/1014.0728802>.
3. Yan X., Fu-ling G., Yao Z., Mengliang Z. Kinematic analysis of the deployable truss structures for space applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2012. Vol. 4, Issue 4. P. 453–462. DOI: <https://doi.org/10.5028/jatm.2012.04044112>
4. Deployable Perimeter Truss with Blade Reel Deployment Mechanism. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/24098>
5. Буянова Л.В., Журавлёв Е.И. Методика проектирования пиротехнических устройств систем отделения. *Инженерный вестник*. 2015. Вып. 7. С. 56–62.
6. Szuminski W. Dynamics of multiple pendula without gravity. *Chaotic Modeling and Simulation*. 2014. Vol. 1. P. 57–67. URL: http://www.cmsim.eu/papers_pdf/january_2014_papers/7_CMSIM_Journal_2014_Szuminski_1_57-67.pdf.
7. Lopes A.M., Tenreiro Machado J.A. Dynamics of the N-link pendulum: a fractional perspective. *International Journal of Control*. 2016. Vol. 90, Issue 6. P. 1192–1200. doi: <https://doi.org/10.1080/00207179.2015.1126677>
8. Udwadia F.E., Koganti P.B. Dynamics and control of a multi-body planar pendulum. *Nonlinear Dynamics*. 2015. Vol. 81, Issue 1-2. P. 845–866. doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2034-0>
9. Martinez-Alfaro H. Obtaining the dynamic equations, their simulation, and animation for N pendulums using Maple. URL: <http://www2.esm.vt.edu/~anayfeh/conf10/Abstracts/martinez-alfaro.pdf>

10. Юдинцев В.В. Моделирование процессов раскрытия многоэлементных конструкций космических аппаратов. *Полет*. 2012. Вып. 5. С. 28–33.
11. Бакулин Д.В., Борзых С.В., Ососов Н.С., Щиблев Ю.Н. Моделирование процесса раскрытия солнечных батарей. *Математическое моделирование*. 2004. Т. 16, Вып. 6. С. 88–92.
12. Gmiterko A., Grossman M. N-link Inverted Pendulum Modeling. *Recent Advances in Mechatronics*. 2010. P. 151–156. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-05022-0_26
13. Анохин Н.В. Приведение многозвенной стержневой конструкции в положение равновесия с помощью одного управляющего момента. *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2013. Вып. 5. С. 44–53.
14. Ананьевский И.М., Анохин Н.В. Управление пространственным движением многозвенного перевернутого маятника с помощью момента, приложенного к первому звену. *Прикладная математика и механика*. 2014. Т. 78, Вып. 6. С. 755–765.
15. Бушуев А.Ю., Фарафонов Б.А. Математическое моделирование процесса раскрытия солнечной батареи большой площади. *Математическое моделирование и численные методы*. 2014. Вып. 2. С. 101–114.
16. Бушуев А.Ю. Проектирование тросовой системы раскрытия многозвенной конструкции солнечной батареи в условиях неопределенности. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017. Вып. 1. С. 1–11.
17. Бушуев А.Ю. Математическая модель дублирующей системы раскрытия солнечной батареи большой площади. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017. Вып. 2. С. 1–11.
18. Бушуев А.Ю., Фарафонов Б.А. Оптимизация параметров тросовой системы раскрытия многозвенной конструкции солнечной батареи. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2015. Вып. 7.
19. Крылов А.В., Чурилин С.А. Моделирование разворачивания многозвенных замкнутых космических конструкций. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана*. Сер.: Машиностроение. 2012. С. 80–91.
20. Крылов А.В., Чурилин С.А. Моделирование раскрытия солнечных батарей различных конфигураций. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана*. Сер.: Машиностроение. 2011. Вып. 1. С. 106–111.
21. Куценко Л. М., Запольський Л. Л. Геометричне моделювання розгортання у невагомості багатоланкової конструкції з інерційним розкриттям. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. Т. 2. Вип. 3 (62). С. 284–291.
22. 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. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114269>

23. 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>

24. 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. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126693>

25. Куценко Л.М., Пікрасов М.М., Запольський Л.Л. Ілюстрації до статті геометричне моделювання процесу розкриття стержневих конструкцій у невагомості.

URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>

26. 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>

References

1. Alpatov, A. P. (2013). Dynamika perspektyvnykh kosmichnykh aparativ. *Visnyk NAN Ukrainy*, 7, 6–13.

2. Zimin, V., Krylov, A., Meshkovskii, V., Sdobnikov, A., Fayzullin, F., Churilin, S. (2014). Features of the Calculation Deployment Large Transformable Structures of Different Configurations. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 10, 179–191. doi: <https://doi.org/10.7463/1014.0728802>

3. Yan, X., Fu-ling, G., Yao, Z., Mengliang, Z. (2012). Kinematic analysis of the deployable truss structures for space applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4 (4), 453–462. doi: <https://doi.org/10.5028/jatm.2012.04044112>

4. Deployable Perimeter Truss with Blade Reel Deployment Mechanism. Available at:

<https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/24098>

5. Buyanova, L. V., Zhuravlev, E. I. (2015). Metodika proektirovaniya pirotekhnicheskikh ustroystv sistem otdeleniya. *Inzhenerniy vestnik*, 07, 56–62.

6. Szuminski, W. (2014). Dynamics of multiple pendula without gravity. *Chaotic Modeling and Simulation*, 1, 57–67. Available at: http://www.cmsim.eu/papers_pdf/january_2014_papers/7_CMSIM_Journal_2014_Szuminski_1_57-67.pdf

7. Lopes, A. M., Tenreiro Machado, J. A. (2016). Dynamics of the N-link pendulum: a fractional perspective. *International Journal of Control*, 90 (6), 1192–1200. doi: <https://doi.org/10.1080/00207179.2015.1126677>

8. *Udwadia, F. E., Koganti, P. B.* (2015). Dynamics and control of a multi-body planar pendulum. *Nonlinear Dynamics*, 81 (1-2), 845–866. doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2034-0>
9. *Martinez-Alfaro, H.* Obtaining the dynamic equations, their simulation, and animation for N pendulums using Maple. Available at: <http://www2.esm.vt.edu/~anayfeh/conf10/Abstracts/martinez-alfaro.pdf>
10. *Yudincev, V. V.* (2012). Modelirovanie processov raskrytiya mnogoelementnykh konstrukciy kosmicheskikh apparatov. *Polet*, 5, 28–33.
11. *Bakulin, D. V., Borzyh, S. V., Ososov, N. S., Shchiblev, Yu. N.* (2004). Modelirovanie processa raskrytiya solnechnykh batarey. *Matematicheskoe modelirovanie*, 16 (6), 88–92.
12. *Gmiterko, A., Grossman, M.* (2010). N-link Inverted Pendulum Modeling. *Recent Advances in Mechatronics*, 151–156. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-05022-0_26
13. *Anohin, N. V.* (2013). Privedenie mnogozvennogo sterzhnevoy konstrukcii v polozhenie ravnovesiya s pomoshch'yu odnogo upravlyayushchego momenta. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 5, 44–53.
14. *Anan'evskiy, I. M., Anohin, N. V.* (2014). Upravlenie prostranstvennym dvizheniem mnogozvennogo perevernutogo mayatnika s pomoshch'yu momenta, prilozhennogo k pervomu zvenu. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 78 (6), 755–765.
15. *Bushuev, A. Yu., Farafonov, B. A.* (2014). Matematicheskoe modelirovanie processa raskrytiya solnechnoy batarei bol'shoy ploshchadi. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody*, 2, 101–114.
16. *Bushuev, A. Yu.* (2017). Proektirovanie trosovoy sistemy raskrytiya mnogozvennoy konstrukcii solnechnoy batarei v usloviyah neopredelennosti. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovacii*, 1, 1–11.
17. *Bushuev, A. Yu.* (2017). Matematicheskaya model' dubliruyushchey sistemy raskrytiya solnechnoy batarei bol'shoy ploshchadi. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovacii*, 2, 1–11.
18. *Bushuev, A. Yu., Farafonov, B. A.* (2015). Optimizaciya parametrov trosovoy sistemy raskrytiya mnogozvennoy konstrukcii solnechnoy batarei. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovacii*, 7.
19. *Krylov, A. V., Churilin, S. A.* (2012). Modelirovanie razvertyvaniya mnogozvennykh zamknutykh kosmicheskikh konstrukciy. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie*, 80–91.
20. *Krylov, A. V., Churilin, S. A.* Modelirovanie raskrytiya solnechnykh batarey razlichnykh konfiguraciy. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie*, 1, 106–111.
21. *Kutsenko, L. M., Zapolskiy, L. L.* (2017). Heometrychne modeliuvannia rozghortannia u nevahomosti bahatolankovoi konstruktsiyi z inertsijnym rozkryttiam. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 2 (3 (62)), 284–291.

22. Kutsenko, L., Shoman, O., Semkiv, O., Zapolsky, 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 (7 (90)), 42–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114269>
23. Kutsenko, L. M., Pikasov, M. M., Zapolskyi, L. L. Iliustratsiyi do heometrychnoho modeliuvannya inertsynoho rozkryttia bahatolankovoho maiatnyka u nevahomosti. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>
24. 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 (7 (92)), 44–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126693>
25. Kutsenko L. M., Pikasov M. M., Zapolskyi L. L. Iliustratsiyi do statii heometrychne modeliuvannya protsesu rozkryttia sterzhnevyykh konstruktsiyi u nevahomosti. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>
26. Kutsenko, L. M., Pikasov, M. M., Zapolskyi, L. L. Heometrychne modeliuvannya rozkryttia u nevahomosti deiakykh prostorovykh sterzhnevyykh konstruktsiy. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7051>

Д. Т. Н., профессор **Л. М. Куценко**,
leokuts@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1554-8848>

К. Т. Н., доцент **А. Я. Калиновский**,
kalinovskiy.a@nuczu.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1021-5799>

Ассистент **Е.И. Сухарькова**,
lena_sukharkova@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1033-4728>

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ РАСКРЫТИЯ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ В НЕВЕСОМОСТИ

Для выполнения аварийно-спасательных работ в условиях невесомости предложен способ формообразования стержневых конструкций, элементы которых соединены подобно четырехзвенному маятнику. Перемещение звеньев конструкции происходит благодаря действию импульсов пиротехнических двигателей на конечные точки звеньев. Описание движения полученного инерционного раскрытия стержневой конструкции выполнено с помощью уравнения Лагранжа второго рода и, учитывая условия невесомости, построенного с использованием только кинетической энергии системы.

Актуальность темы определяется необходимостью усовершенствования и исследования новых технологических схем

раскрытия каркасов космических инфраструктур. Среди них – каркасов конструкций механических захватов (типа «руки робота»), расположенных снаружи космических аппаратов.

На основе инерционного раскрытия четырехзвенных стержневых конструкций разработаны схемы действия манипуляторов для захвата цилиндрических тел, оси которых расположены параллельно или перпендикулярно поверхности космического аппарата. Определены параметры и начальные условия запуска движения четырехзвенной стержневой конструкции с целью получения необходимого расположения звеньев. Показано, что для внедрения вариантов инерционного вскрытия необходимо применить комплект унифицированных пиротехнических устройств, величины импульсов которых определяются координатами вектора $U^1 = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ условных единиц. Построены графики изменения во времени функций значений углов как обобщенных координат.

Результаты предназначены для геометрического моделирования вариантов раскрытия четырехзвенных стержневых конструкций в условиях невесомости. К примеру, каркасов для орбитальных инфраструктур, а также механических манипуляторов для захвата космических объектов

Ключевые слова: стержневая конструкция; процесс раскрытия в космосе; манипулятор для захвата тел; уравнение Лагранжа второго рода.

D. t. n., professor **L. Kutsenko**,

leokuts@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1554-8848>

к. т. н., docent **A. Kalynovskij**,

kalinovskiy.a@nuczu.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1021-5799>

assistant **L. Sukharkova**,

lena_sukharkova@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1033-4728>

DEVELOPMENT OF MODELS OF OPENING OF ROD STRUCTURES FOR EMERGENCY RESCUE WORK IN WEIGHTLESSNESS

To perform rescue operations in weightlessness, a method is proposed for shaping bar structures, the elements of which are connected like a four-link pendulum. The movement of the links of the structure occurs due to the action of the impulses of the pyrotechnic engines on the end points of the links. The description of the movement of the resulting inertial opening of the rod structure is made using the Lagrange equation of the second kind and, taking into account the conditions of weightlessness, constructed using only the kinetic energy of the system.

The relevance of the topic is determined by the need to improve and study new technological schemes for opening the frameworks of space infrastructures. Among them are frames of structures of mechanical grippers (such as "robot arms") located outside the spacecraft.

On the basis of the inertial opening of four-link rod structures, schemes of manipulator action for capturing cylindrical bodies, the axes of which are parallel or perpendicular to the surface of the spacecraft, have been developed. The parameters and initial conditions for starting the movement of a four-link rod structure are determined in order to obtain the necessary arrangement of the links. It is shown that for the implementation of variants of inertial opening it is necessary to apply a set of unified pyrotechnic devices, the impulse values of which are determined by the coordinates of the vector $U^1 = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ conventional units. Graphs of the change in time of the functions of the values of the angles as generalized coordinates are constructed.

The results are intended for geometric modeling of options for opening four-link bar structures under weightless conditions. For example, frames for orbital infrastructures, as well as mechanical manipulators for capturing space objects

Key Words: rod structure; opening process in space; manipulator for capturing bodies; Lagrange equation of the second kind.