

УДК 515.2

## **МОДЕЛЮВАННЯ РОЗКРИТТЯ У НЕВАГОМОСТІ КАРКАСУ ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧОТИРИЛАНКОВОЇ СТЕРЖНЕВОЇ КОНСТРУКЦІЇ**

Куценко Л.М., д.т.н.

*Національний університет цивільного захисту України  
(м. Харків, Україна),*

Запольський Л.Л., к.т.н.

*Український науково-дослідний інститут цивільного захисту  
(м. Київ, Україна)*

*Запропоновано геометричну модель розкриття в умовах невагомості каркасу параболічної антени з використанням стержневої конструкції, подібної чотирьохланковому 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 параболічних антен, елементами яких є сім'я однакових співфокусних парабол, одержаних обертанням з певним кутовим кроком навколо спільної осі. Крім того, цікавими мають бути нові технології виконання монтажних робіт на орбіті з використанням конструкцій механічних захватів (типу «руки робота»), розташованих зовні космічних апаратів. Визначено параметри та початкові умови запуску руху чотириланкової стержневої конструкції з метою одержання необхідного розташування ланок. Показано, що для впровадження 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. Є можливість побудувати графіки зміни у часі функцій значень кутів як узагальнених координат, а також перших та других похідних цих функцій. В результаті можливо надати оцінки силовим характеристикам системи в момент гальмування (зупинки) процесу розкриття. 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:* чотириланкова стержнева конструкція, розкриття у невагомості, рівняння Лагранжа другого роду.

**Постановка проблеми.** У більшості випадків рефлекторні антени космічного базування складаються з жорсткого каркасу, який після доставки на орбіту необхідно трансформувати і тим самим надати йому розраховану форму конструкції. Компоненти великогабаритних космічних стержневих конструкцій доставляються на орбіту у згорнутому вигляді [1]. При реалізації розкриття чотириланкової стержневої конструкції у невагомості виникає проблема вибору способів активації її руху. В якості засобів ініціювання розкриття пропонується використовувати імпульсні реактивні двигуни (типу піропатронів [2]), встановлених на кінцевих точках ланок стержневої конструкції. Адже піротехнічні пристрої набагато легші і дешевші порівняно з засобами ініціювання розкриття конструкції, такими, як електродвигуни або пружинні пристрої з термопам'яттю [3]. Це вказує на доцільність дослідження моделі розкриття каркасу параболічної антени в умовах невагомості з використанням стержневих конструкцій з імпульсними двигунами на кінцевих точках їх ланок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На практиці застосовують каркасні тросові системи розкриття, де за допомогою електродвигунів та тросів здійснюється синхронізація зміни величин кутів між суміжними ланками [4, 5]. Але застосування тросової системи розкриття на практиці обмежено розмірами конструкції та необхідністю синхронізувати дію електродвигунів, що є самостійною задачею при великій кількості ланок. Робота [6] присвячена методу розрахунку розкриття великогабаритних конструкцій з використанням програмних комплексів MSC Software. В роботі [7] наведено приклад розрахунку розкриття за допомогою комплексу автоматизованого динамічного аналізу багатокомпонентних механічних систем EULER. Але зазначені програмні продукти не розраховані без відповідних надбудов на реалізацію інерційного способу розкриття багатоланкових конструкцій. В роботах [8-13] наведено результати, одержані попередньо на тему даної роботи.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є розробка геометричної моделі процесу розкриття в умовах невагомості каркасу параболічної антени за допомогою стержневих конструкцій, аналогічних чотириланковому маятнику. Для ініціювання руху конструкції необхідно змоделювати дію імпульсних піротехнічних

реактивних двигунів, встановлених на кінцевих точках ланок конструкції.

**Основна частина.** 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. 1).

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. Кожний 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:

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

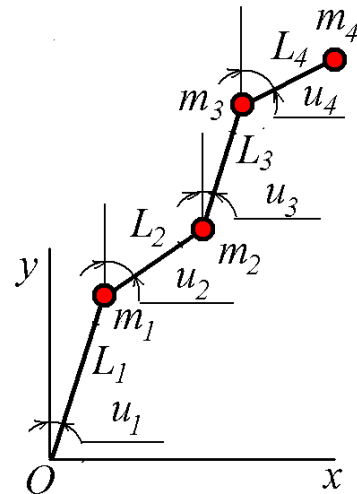


Рис. 1. Схема чотириланкової стержневої конструкції

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

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

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

У визначений за допомогою комп'ютерної анімації час  $t_0$  розкриття необхідно зупинити. Враховано, що багатоланкову стержневу конструкцію на орбіту доставляють у складеному вигляді (наочно це нагадує побутовий метр у складеному стані). Вектор значень початкових кутів відхилень матиме координати  $\mathbf{U} = \{\pi/2, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2\}$ .

Для формування каркасу квазіпараболоїда (названо для коректності) обрано однакові довжини ланок  $\mathbf{L} = \{3, 3, 3, 3\}$  і маси вантажів  $\mathbf{m} = \{1, 1, 1, 1\}$ . На кінцеві точки ланок механізмів передбачено впливати піротехнічними пристроями, величини імпульсів яких визначаються координатами вектора  $\mathbf{U}' = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$ . Значення всіх параметрів в умовних величинах.

Час інтегрування системи рівнянь  $T=1.55$ . На рис. 2 наведено кадри схеми формування квазіпараболи, наближену чотириланковими

стержневими конструкціями. Координатами вектора «стоп-коду» будуть  $U_{\text{STOP}} = \{0.1642, 0.7710, 1.006, 1.435\}$ . На сайті [14] наведено анімаційні зображення, які підтверджують одержані результати.

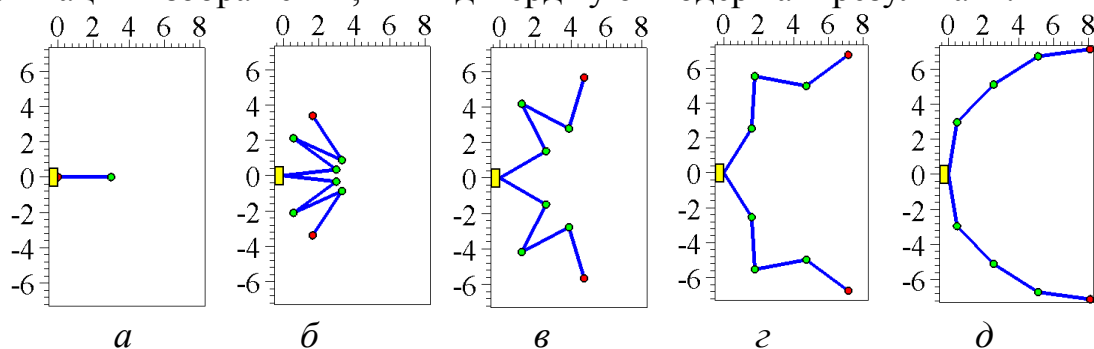


Рис. 2. Кадри процесу розкриття схеми квазіпараболи:  
 $a - t = 0$ ;  $б - t = 0.5$ ;  $в - t = 1$ ;  $г - t = 1.2$ ;  $д - t = 1.55$

На рис. 3 зображено форму каркасу квазіпараболоїда, одержану обертанням навколо осі  $Ox$  квазіпараболи з рис. 2,  $e$ .

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.

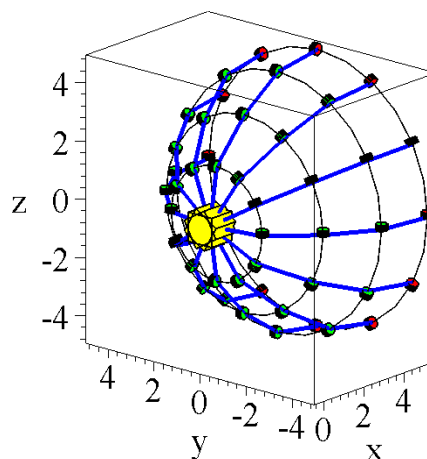


Рис. 3. Конструкція, яка наближає форму квазіпараболоїда

**Висновки.** Взаємне розташування елементів чотириланкових стержневих конструкцій, які наближають квазіпараболу та квазіпараболоїд, доцільно визначати за допомогою комп'ютерної анімації. Аналіз кадрів анімацій дозволяє обрати необхідний момент часу фіксації (зупинки) розкриття, коли виникне необхідне для використання (у даному випадку - у вигляді квазіпараболи) взаємне розташування ланок стержневих конструкцій.

### Література

1. Алпатов А.П. Динаміка перспективних космічних апаратів / А.П. Алпатов // Вісник НАН України, 2013. – № 7. – С. 6–13
2. Буянова Л.В. Методика проєктирования пиротехнических устройств систем отделения / Л.В. Буянова., Е.И. Журавлёв //

- Инженерный вестник, 2015. – № 07. – С. 56–62.
3. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций // В.Н. Зимин, А.В. Крылов, В.Е. Мешковский, А.Н. Сдобников, Ф.Р. Файзуллин, С.А. Чурилин // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – № 10. – С. 179–191. doi: <https://doi.org/10.7463/1014.0728802>.
  4. Deployable Perimeter Truss with Blade Reel Deployment Mechanism. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/24098>.
  5. Бушуев А. Ю. Математическое моделирование процесса раскрытия солнечной батареи большой площади / А.Ю. Бушуев, Б.А. Фарафонов // Математическое моделирование и численные методы, 2014. – № 2. – С. 101–114.
  6. Щесняк С. Проектирование и расчет крупногабаритных раскрывающихся конструкций с помощью программных комплексов MSC.Software / С.Щесняк, А.Романов // CADmaster, 2009. – № 2-3. – С. 28–36.
  7. Бойков В.Г. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER / В.Г. Бойков // САПР и графика, 2009. – № 9. – С. 17–20.
  8. Куценко Л.М. Геометричне моделювання розгортання у невагомості багатоланкової конструкції з інерційним розкриттям / Л.М. Куценко, Л.Л. Запольський // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2017. – Т.2, № 3 (62). – С. 284–291.
  9. Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness / L. Kutsenko, O. Shoman, O. Semkiv, L. Zapolsky, I. Adashevskaya, V. Danylenko et. al. // 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>.
  10. Куценко Л.М. Ілюстрації до геометричного моделювання інерційного розкриття багатоланкового маятника у невагомості. / Л.М. Куценко, М.М. Пікрасов, Л.Л. Запольський. – URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>.
  11. Geometrical modeling of the shape of a multilink rod structure in weightlessness under the influence of pulses on the end points of its links / Kutsenko L., Semkiv O., Zapolskiy L., Shoman O., Ismailova N., Vasyliiev S. et. al. // 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>.
  12. Куценко Л.М. Ілюстрації до статті геометричне моделювання процесу розкриття стержневих конструкцій у невагомості. /

- Л.М. Куценко, М.М. Пікрасов, Л.Л. Запольський. – URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>.
13. Куценко Л.М. Геометричне моделювання розкриття у невагомості деяких просторових стержневих конструкцій. / Л.М. Куценко, М.М. Пікрасов, Л.Л. Запольський. – URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7051>.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСКРЫТИЯ В НЕВЕСОМОСТИ КАРКАСА ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ПРИ ПОМОЩИ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОЙ СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Куценко Л.Н., Запольский Л.Л.

*Предложено геометрическую модель раскрытия в условиях невесомости каркаса параболической антенны с использованием стержневой конструкции, подобной 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. В том числе каркасов параболических антенн, элементами которых являются семейство одинаковых софокусных парабол, полученных вращением с определенным угловым шагом вокруг общей оси. Кроме того, интересными должны быть новые технологии выполнения монтажных работ на орбите с использованием конструкций механических захватов (типа «руки работа»), расположенных снаружи космических аппаратов. Определены параметры и начальные условия запуска движения четырехзвенной стержневой конструкции с целью получения необходимого расположения звеньев. Показано, что для внедрений вариантов инерционного раскрытия необходимо применить комплект унифицированных пиротехнических устройств, величины импульсов которых определяются координатами вектора  $U = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$  условных единиц. Возможны построения графиков изменения во времени функций значений углов как обобщенных координат, а также первых и вторых производных этих функций. В результате можно получить оценки силовым характеристикам системы в момент торможения (остановки) процесса раскрытия. Результаты предназначено для геометрического моделирования вариантов раскрытия*

четырёхзвенных стержневых конструкций в условиях невесомости. Например, каркасов для орбитальных инфраструктур, а также механических манипуляторов для захвата космических объектов.

Ключевые слова: четырёхзвенная стержневая конструкция, раскрытие в невесомости, уравнения Лагранжа второго рода.

## **GEOMETRICAL MODELING OF THE UNFOLDING OF SPATIAL ROD STRUCTURES, SIMILAR TO THE FOUR-LINK PENDULUM, IN WEIGHTLESSNESS**

Kutsenko L., Zapolskiy L.

*A geometrical model of opening in the zero gravity framework of a parabolic antenna with the use of a rod structure similar to a four-link pendulum is proposed. The movement of the links of the structure occurs due to the action of the pulses of pyrotechnic engines on the end points of the links. The description of the motion of the obtained inertial disclosure of the core structure was carried out 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 research new technological schemes for disclosing the frameworks of space infrastructures. Including frames of parabolic antennas, elements of which are a family of identical confocal parabolas, obtained by rotation with a certain angular step around a common axis. In addition, interesting should be new technologies to perform installation work in orbit using the structures of mechanical grips (such as "hands work"), located outside the spacecraft. The parameters and initial conditions for launching the motion of a four-bar core structure are determined in order to obtain the necessary arrangement of links. It is shown that for implementations of variants of inertial opening it is necessary to apply a set of unified pyrotechnic devices, the magnitudes of which pulses are determined by the coordinates of the vector  $U = \{0.1, 1.9, 1.3, 2.5\}$  conventional units. It is possible to construct graphs of the time variation of the functions of the angles as generalized coordinates, as well as the first and second derivatives of these functions. As a result, you can get an estimate of the power characteristics of the system at the time of braking (stopping) the process of disclosure. The results are intended for geometric modeling of variants for the disclosure of four-bar core structures in zero gravity. For example, frames for orbital infrastructures, as well as mechanical manipulators for capturing space objects.*

*Keywords: four-bar core construction, opening in weightlessness, Lagrange equations of the second kind.*