

УДК 515.2

**МОДЕЛЮВАННЯ РОЗКРИТТЯ У НЕВАГОМОСТІ  
КАРКАСУ ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ  
З НАПЕРЕД ЗАДАНОЮ ФОКУСНОЮ ВІДСТАННЮ**

Запольський Л.Л. , к.т.н.

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

Шевченко С.М.

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

*В даній роботі продовжено дослідження, розпочаті в статті [1]. Стаття присвячена геометричному моделюванню можливого способу розкриття космічних антен параболічного типу, які встановлюються на космічних апаратах різного призначення. Адже перспективи розвитку радіоастрономії, сонячної енергетики, космічного зв'язку, дослідження земної поверхні та інших планет з космосу в даний час безпосередньо пов'язані з можливістю виведення в космос великогабаритних конструкцій.*

*Розглянуто геометричну модель розкриття в умовах невагомості каркасу параболічної антени з наперед визначеною фокусною відстанню з використанням стержневої конструкції, подібної чотирьохланковому маятнику. Переміщення ланок конструкції відбуваються завдяки дії імпульсів піротехнічних двигунів на кінцеві точки ланок.*

*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 подібних співфокусних парабол, одержаних обертанням з певним кутовим кроком навколо спільної осі. 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  $U'$ . Результати призначено для геометричного моделювання варіантів розкриття чотириланкових стержневих конструкцій в умовах невагомості.*

*Ключові слова: чотириланкова стержнева конструкція, розкриття у невагомості, сім'я однакових співфокусних парабол, каркас параболічної антени*

**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 [2]. 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 [3]), 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 [4]. 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 [5, 6]. Але застосування тросової системи розкриття на практиці обмежено розмірами конструкції та необхідністю синхронізувати дію електродвигунів, що є самостійною задачею при великій кількості ланок. Робота [7] присвячена методу розрахунку розкриття великогабаритних конструкцій з використанням програмних комплексів MSC.Software. В роботі [8] 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 роботі [9] наведено результати, які одержано попередньо на тему даної роботи.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є розробка геометричної моделі процесу розкриття в умовах невагомості каркасу параболічної антени з наперед визначеною фокусною відстанню. При цьому мають використовуватися стержневі конструкції, аналогічні чотирьохланковому маятнику, а також ініціювання руху конструкції повинно здійснюватися з використанням імпульсних піротехнічних реактивних двигунів, встановлених на кінцевих точках ланок конструкції.

**Основна частина.** Побудову виконуватимемо на уявній площині 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.

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,  $\mathbf{U}' = \{u_1'(0), u_2'(0), u_3'(0), u_4'(0)\}$  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  $u_i'(0)$ , ( $i=1..4$ ). 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.

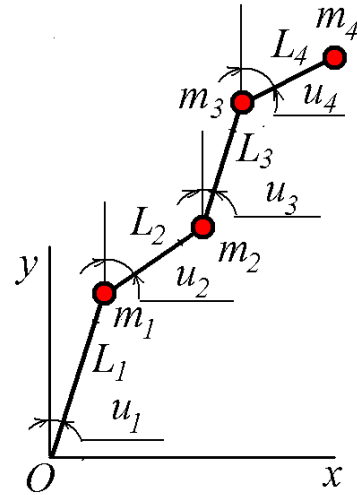


Рис. 1. Схема чотириланкової стержневої конструкції

При розрахунках 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.

Враховуючи обчислені координати вузлів як функції в часі, побудуємо кадри комп'ютерної анімації процесу розкриття з наперед заданою фокусною відстанню. В результаті спостереження за процесом розкриття обираємо момент часу  $t=t_0$  зупинки розкриття та визначаємо параметри стоп-коду  $\mathbf{U}_{\text{STOP}} = \{u_1(t_0), u_2(t_0), u_3(t_0), u_4(t_0)\}$ . Враховуючи, що багатоланкову стержневу конструкцію на орбіту доставляють у складеному вигляді (наочно це нагадує побутовий метр у складеному стані), то вектор значень початкових кутів відхилень матиме координати  $\mathbf{U} = \{\pi/2, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2\}$ .

Для формування каркасу квазіпараболоїда (названо для коректності) з фокусною відстанню  $3$  обрано однакові довжини ланок  $\mathbf{L} = \{3, 3, 3, 3\}$ . На кінцеві точки ланок механізмів передбачено

впливати піротехнічними пристроями, величини імпульсів яких визначаються координатами вектора  $U'=\{0.25, 2, 1.45, 2.53\}$  та маси в вузлах  $M'=\{1, 1, 0.8, 1.53\}$ , для параболи з фокусом ;4 координати вектора будуть  $U'=\{0.2, 1.9, 1.45, 2.55\}$  та маси в вузлах  $M'=\{1, 1, 0.7, 1.97\}$ . Значення всіх параметрів в умовних величинах, рис. 2 та рис 3.

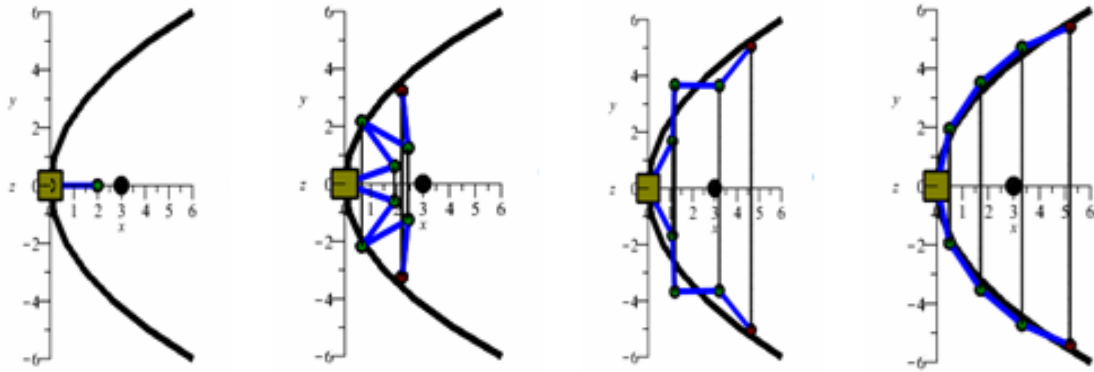


Рис. 2. Деякі кадри розкриття схеми квазіпараболи з фокусною відстанню 3 умовні одиниці

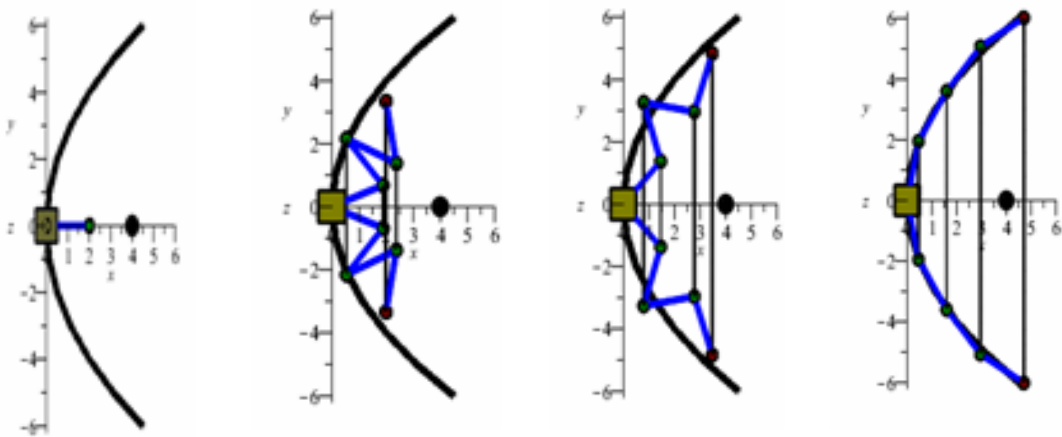


Рис. 3. Деякі кадри розкриття схеми квазіпараболи з фокусною відстанню 4 умовні одиниці

На рис. 4 зображено форму каркасу квазіпараболоїда, утворену обертанням навколо осі  $Ox$  квазіпарабол, одержаних на рис. 2 і 3.

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.

**Висновки.** За допомогою анімації можна визначити взаємне розташування елементів чотириланкових конструкцій, які наближають квазіпараболоїд з наперед визначеною фокусною відстанню.

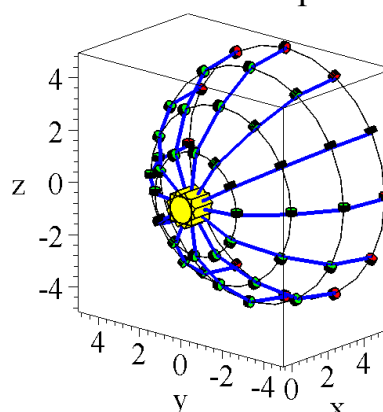


Рис. 4. Конструкція, яка наближає форму квазіпараболоїда

### Література

1. Куценко Л.М., Запольський Л.Л. Моделювання розкриття у невагомості каркасу параболічної антени за допомогою чотириланкової стержневої конструкції. *Сучасні проблеми моделювання. Збірник наукових праць. МДПУ ім. Б. Хмельницького*. Мелітополь, 2018. Вип. 13. С. 92–99.
2. Алпатов А. П. Динаміка перспективних космічних апаратів. *Вісник НАН України*. 2013. № 7. С. 6–13
3. Буянова Л. В., Журавлєв Е. И. Методика проєктирования піротехнічних устроїв систем одделения. *Інженерний вестник*. 2015. № 07. С. 56–62.
4. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций / Зимин В. Н., Крылов А. В., Мешковский В. Е., Сдобников А. Н., Файзуллин Ф. Р., Чурилин С. А. // *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 10. С. 179–191. doi: <https://doi.org/10.7463/1014.0728802>.
5. Deployable Perimeter Truss with Blade Reel Deployment Mechanism. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/24098>.
6. Бушуев А.Ю. Фарафонов Б.А. Математическое моделирование процесса раскрытия солнечной батареи большой площади. *Математическое моделирование и численные методы*. 2014. № 2. С. 101–114.
7. Щесняк С. Романов А. Проектирование и расчет крупногабаритных раскрывающихся конструкций с помощью

- программных комплексов MSC.Software. CADmaster. 2009. № 2-3. С. 28–36.
8. Бойков В. Г. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER. САПР и графика. 2009. № 9. С. 17–20.
  9. Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness / Kutsenko L., Shoman O., Semkiv O., Zapolsky L., Adashevskaya I., Danylenko V. et. al. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 7 (90). P. 42–50.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСКРЫТИЯ В НЕВЕСОМОСТИ КАРКАСА ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С ЗАРАНЕЕ ЗАДАНЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ**

Запольский Л.Л., Шевченко С.М.

*В данной работе продолжены исследования, начатые в статье [1]. Статья посвящена геометрическому моделированию возможного способа раскрытия космических антенн параболического типа, которые устанавливаются на космических аппаратах разного назначения. Ведь перспективы развития радиоастрономии, солнечной энергетики, космической связи, исследования земной поверхности и других планет из космоса в настоящее время непосредственно связаны с возможностью выведения в космос крупногабаритных конструкций. Рассмотрена геометрическая модель раскрытия в условиях невесомости каркаса параболической антенны с заранее определенным фокусным расстоянием с использованием стержневой конструкции, подобной четырехзвенному маятнику. Перемещения звеньев конструкции происходят благодаря действию импульсов пиротехнических двигателей на конечные точки звеньев.*

*Актуальность темы определяется необходимостью усовершенствования и исследования новых технологических схем раскрытия каркасов космических инфраструктур. В том числе каркасов параболических антенн, элементами которых является семейство подобных софокусных парабол, полученных вращением с определенным угловым шагом вокруг общей оси. Найдены 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  $U$ . Результаты предназначены для*

*геометрического моделирования вариантов раскрытия четырехзвенных стержневых конструкций в условиях невесомости.*

*Ключевые слова: четырехзвенная стержневая конструкция, раскрытие в невесомости, семья одинаковых софокусных парабол, каркас параболической антенны*

## **A DESIGN OF OPENING IS IN WEIGHTLESSNESS FRAMEWORK OF PARABOLIC AERIAL WITH THE BEFOREHAND SET FOCAL DISTANCE**

Zapolskiy L., Shevchenko S.

*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  $U'$ . 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.*

*Keywords: four-bar core construction, opening in weightlessness, Lagrange equations of the second kind, family of identical confocal parabolas*