

УДК 514.18

## **ФОРМУВАННЯ БАГАТОЛАНКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ У НЕВАГОМОСТІ ПІД ВПЛИВОМ ІМПУЛЬСІВ НА КІНЦЕВІ ТОЧКИ ЇЇ ЛАНОК**

Запольський Л.Л., к.т.н.

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

Адашевська І.Ю., к.т.н.

*Національний технічний університет «ХПІ»  
(м. Харків, Україна)*

*Наведено геометричну модель нового способу розкриття в умовах невагомості багатоланкової стержневої конструкції, елементи якої з'єднані подібно багатоланковому маятнику. Розкриття ланок конструкції відбувається завдяки впливу імпульсів піротехнічних реактивних двигунів на їх кінцеві точки. На орбіту комплекти стержнів доставляються у складеному вигляді (касети), після чого необхідно виконати операцію її розкриття для надання робочої форми всій просторовій стержневій конструкції. Розрахунок стержневих конструкцій такого класу пропонується здійснювати на основі Лагранжевої динаміки багатоланкових маятників як консервативної системи. Це дозволить одержати геометричні моделі послідовних фаз розкриття стержневих конструкцій з врахуванням динамічних властивостей. Застосування таких моделей на етапі проектування при подальших дослідженнях допоможе розрахувати параметри функціонування конструкції в цілому.*

*На актуальність обраної теми вказує необхідність вибору та дослідження можливого рушія процесу розкриття стержневої конструкції маятникового типу. Пропонується використати імпульсні піротехнічні реактивні двигуни, встановлені на кінцевих точках ланок стержневої конструкції. Вони набагато легші і дешевші порівняно, наприклад, з електродвигунами або пружинними пристроями. Особливо це важливо, коли на орбіті процес розкриття конструкції планується здійснити лише один раз. Найчастіше саме одноразово використовуються на орбіті рушії процесу розкриття стержневих конструкцій. Опис динаміки одержаного інерційного розкриття багатоланкової стержневої конструкції виконано за допомогою рівняння Лагранжа другого роду.*

*Результати призначено для використання при проектуванні систем розкриття великогабаритних конструкцій в умовах невагомості, наприклад, силових каркасів для сонячних дзеркал чи*

*космічних антен.*

*Ключові слова: стержнева конструкція, процес розкриття у космосі, багатоланкова стержнева конструкція, рівняння Лагранжа другого роду*

**Постановка проблеми.** Розвиток космічних технологій у провідних країнах світу потребує спорудження великогабаритних конструкцій як силових каркасів космічних антен, дзеркал та інших орбітальних інфраструктур [1]. При цьому на підготовлені стержневі конструкції закріплюються відбивальні поверхні, виготовлені, або з відбиваючого світло полотна – для космічних дзеркал, або з металевих дротів (сіткоплатна) – для космічних антен. Ці об'єкти є унікальними за земними масштабами. Створення великогабаритних конструкцій, що трансформуються у космосі, пов'язано з рішенням ряду проблем техніки і механіки, обумовлених унікальністю об'єктів. В результаті виникає питання про адаптування до невагомості процесу коливання багатоланкового маятника як основи геометричної моделі розкриття багатоланкової стержневої конструкції орбітального об'єкта. Відповідь на нього можна знайти шляхом застосування рівнянь Лагранжа другого роду для механічних систем у невагомості. Все це вказує на актуальність теми досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [2] розглядається методика моделювання динамічного процесу розкриття стержневого каркасу космічного базування рефлектора антени. В роботі [3] описано математичні моделі механізмів розкриття, тросової синхронізації, гальмування й фіксації панелей. Але в таких моделях механізмів розкриття не використовується інерційний спосіб трансформування великогабаритних сонячних батарей, а перевага віддається тросовій синхронізації, що складно реалізується для великогабаритних конструкцій. Увагу привертає спосіб забезпечення необхідного кінцевого розташування ланок маятника обмеженим моментом, прикладеним до першої ланки. У роботі [4] побудовано закон керування багатоланковим маятником на площині в околиці заданого положення рівноваги у формі зворотного зв'язку. Але такі роботи орієнтовані переважно на керуванням рівновагою оберненого маятника на візку у полі земного тяжіння. На практиці більш вживаними є каркасні тросові системи розкриття. У роботах [5, 6] наведені математичні моделі процесу розкриття багатоланкової каркасної конструкції сонячної батареї із тросовою системою синхронізації. Але застосування тросової системи розкриття на практиці обмежено розмірами конструкції та необхідністю синхронізувати дію електродвигунів, що є самостійною задачею при великій кількості ланок. Тому доцільним буде розробити інерційну

систему розгортання стержневих конструкцій з використанням нестандартних рушіїв розкриття.

**Формулювання цілей статті.** Продемонструвати інерційну систему розгортання конкретних стержневих конструкцій, де ініціювання їх розкриття у просторі здійснюється імпульсами піротехнічних реактивних двигунів, які впливають на вузлові елементи конструкції.

**Основна частина.** Вважатимемо, що циліндричні шарніри у вузлах стержневих конструкцій забезпечують їх розкриття лише у межах абстрактної площини, яка проходить через нерухому точку конструкції. Кожний імпульсний піротехнічний реактивний двигун повинен забезпечити розраховану для нього величину імпульсу. Крім того, реактивні двигуни повинні закріплюватися так, щоб дія була спрямована по нормалі до відповідної ланки.

В статтях [7, 8] наведено розрахунки розкриття чотириланкової стержневої конструкції, алгоритмами яких скористаємося в даній роботі. Наведемо тестові приклади геометричного моделювання розкриття чотириланкових каркасів шляхом розв'язання системи рівнянь Лагранжа другого роду. Як перспективний варіант, розглянемо стержневу конструкцію, складену з шести чотириланкових конструкцій зі спільним вузлом кріплення, кути між якими 60 градусів. Вважається, що розкриття стержневої конструкції здійснюють на близько розташованих паралельних площинах і не перешкоджають взаємним переміщенням.

Після виконання програми одержимо послідовність кадрів анімаційних зображень залежно від часу розкриття конструкції. За допомогою комп'ютерної анімації можна визначити моменти часу, коли виникне необхідне розташування стержневих конструкцій. Одночасно видаються наближені значення кутів, утворених ланками з певним обранням напрямком, які будуть використані для формування «стоп-коду» розкриття. Приклади ілюстровано аксонометричними зображеннями одержаних кінцевих фаз ланок стержневої конструкції. Анімаційні фільми процесів розкриття є на сайті [9].

*Приклад 1.* Довжини ланок:  $\mathbf{L}=\{4, 4, 4, 4.5\}$ . Імпульси величинами  $\mathbf{U}'=\{0, 1, -1, 1\}$  забезпечують реактивні двигуни, які розташовані на другому, третьому та четвертому вантажах.

На рис. 1 наведено стержневу конструкцію після розкриття шести стержневих конструкцій в момент часу  $t=2.65$ . Значення координат вектора «стоп-коду» визначатимуть числа:  $\mathbf{U}_{\text{STOP}}=\{0.2312, -0.9965, 2.115, 1.023\}$  (тут і далі всі значення в умовних величинах).

*Приклад 2.* Довжини ланок:  $\mathbf{L}=\{4.3, 5, 3.5, 6\}$ . Імпульси  $\mathbf{U}'=\{1, 0, 0, 0.5\}$  забезпечують реактивні двигуни, розташовані на першому та четвертому вантажах.

На рис. 2 наведено стан стержневої конструкції після розкриття шести стержневих конструкцій в момент часу  $t=1.76$ . Значення координат вектора «стоп-коду»:  $U_{\text{STOP}}=\{3.074, -2.276, 1.5, -0.6652\}$ .

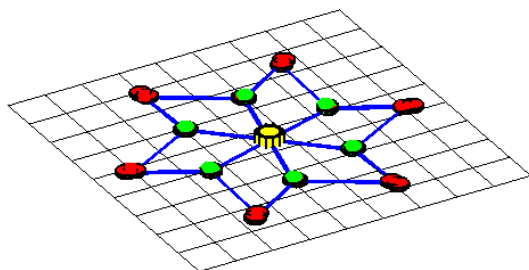


Рис. 1. Стержнева конструкція прикладу 1 в момент часу  $t=2,65$

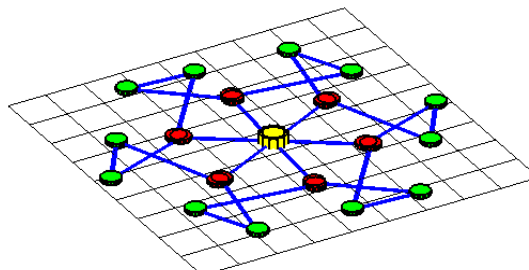


Рис. 2. Стержнева конструкція прикладу 2 в момент часу  $t=1,76$

*Приклад 3.* Довжини ланок стержневої конструкції  $L=\{1, 3, 3, 5.4\}$ . Початкові швидкості  $U'=\{0, 5, 0, 0\}$  забезпечує реактивний двигун, розташований тільки на другому вантажі.

На рис. 3 наведено стержневу конструкцію після розкриття шести стержневих конструкцій в момент часу  $t=1.03$ . Значення координат вектора «стоп-коду»:  $U_{\text{STOP}}=\{5.19, 0.2166, -1.132, 1.539\}$ .

Зазначимо, що процес розкриття багатоланкової стержневої конструкції у невагомості є аналогом процесу коливання багатоланкового маятника у полі земного тяжіння. Їх математичні моделі відрізнятимуться, по суті, значеннями константи  $g$  (прискоренням вільного падіння):

$g \approx 0$  у першому випадку, і  $g \approx 9.81$  у другому. Тоді застосувавши розроблений алгоритм моделювання коливання багатоланкового маятника в полі тяжіння (при  $g \approx 9.81$ ) і перевіривши на адекватність одержані тестові результати, можна використовувати цей алгоритм і для розрахунку розкриття стержневих конструкцій у невагомості (при  $g \approx 0$ ). Причому, у адекватності коливань дозволяє переконатися зоровий аналізатор людини при аналізі комп'ютерної моделі процесу коливань.

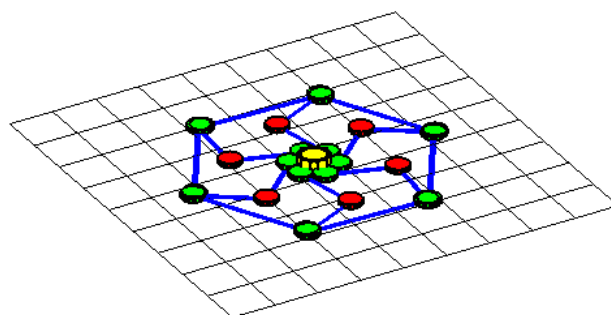


Рис. 4. Стержнева конструкція прикладу 3 в момент часу  $t=1.03$

**Висновки.** В роботі розглянуто інерційну систему розгортання конкретних стержневих конструкцій, де ініціювання їх розкриття у просторі здійснюється імпульсами піротехнічних реактивних

двигунів, які впливають на вузлові елементи конструкції. За допомогою комп'ютерної анімації було прогнозовано у часі взаємне розташування ланок стержневих конструкцій.

### *Література*

1. Алпатов А.П. Космические платформы для орбитальных промышленных комплексов: проблемы и перспективы [Текст] / А.П. Алпатов, В.П. Горбулин // Вісник НАН України, № 12, 2013. – С. 26–38
2. Гутовский И. Е., Моделирование динамики раскрытия ферменного каркаса трансформируемого рефлектора антенны космического базирования методом конечных элементов [Текст] / И.Е. Гутовский, А.В. Золин, С.В. Курков, В.А. Пантелеев, В.А. Хлебников // Современное машиностроение. Наука и образование. – № 2, 2012. – С. 276–285.
3. Бакулин Д. В. Моделирование процесса раскрытия солнечных батарей [Текст] / Д.В. Бакулин, С.В. Борзых, Н.С. Ососов, Ю. Н. Щиблев // Матем. моделирование. – Том 16, № 6, 2004. – С. 88–92.
4. Анохин Н. В. Приведение многозвенного стержневої конструкції в положение равновесия с помощью одного управляющего момента [Текст] / Н. В. Анохин // Изв. РАН. Теория и системы управления. – № 5, 2013. – С. 44–53.
5. Deployable Perimeter Truss with Blade Reel Deployment Mechanism. NASA's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. Tuesday, 01 March 2016. Режим доступа: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/24098>.
6. Бушуев А. Ю. Математическое моделирование процесса раскрытия солнечной батареи большой площади [Текст] / А.Ю. Бушуев, Б.А. Фарафонов // Математическое моделирование и численные методы. – № 2, 2014. – С. 101–114.
7. Kutsenko L. Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness / L. Kutsenko, O. Shoman, O. Semkiv, L. Zapolsky, I. Adashevskay, V. Danylenko, V. Semenova-Kulish, D. Borodin, J. Legeta // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/7 ( 90 ), 2017 – 42–50 pp.
8. Куценко Л.М. Ілюстрації до геометричного моделювання інерційного розкриття багатоланкового стержневої конструкції у невагомості [Електронний ресурс] / Л.М. Куценко, М.М. Пікрасов, Л.Л. Запольський // Режим доступу: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>.
9. Куценко Л.М. Ілюстрації до геометричного моделювання коливань багатоланкових стержневих конструкцій в невагомості під впливом

імпульсів на прикінцеві точки ланок. [Електронний ресурс] / Л.М. Куценко, М.М. Пікрасов, Л.Л. Запольський // Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>.

## **ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОЗВЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ В НЕВЕСОМОСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИМПУЛЬСОВ НА КОНЕЧНЫЕ ТОЧКИ ЕЕ ЗВЕНЬЕВ**

Запольский Л.Л. , Адашевська И.Ю.

*Приведена геометрическая модель нового способа раскрытия в условиях невесомости многозвенной стержневой конструкции, элементы которой соединены подобно многозвенному маятнику. Раскрытие звеньев конструкции происходит благодаря влиянию импульсов пиротехнических реактивных двигателей на их конечные точки. На орбиту комплекты стержней доставляются в составленном виде (кассеты), после чего необходимо выполнить операцию ее раскрытия для предоставления рабочей формы всей пространственной стержневой конструкции. Расчет стержневых конструкций такого класса предлагается осуществлять на основе Лагранжевой динамики многозвенных маятников как консервативной системы. Это позволит получить геометрические модели последовательных фаз раскрытия стержневых конструкций с учетом динамических свойств. Применение таких моделей на этапе проектирования при дальнейших исследованиях поможет рассчитать параметры функционирования конструкции в целом. На актуальность избранной темы указывает необходимость выбора и исследование возможного движителя процесса раскрытия стержневой конструкции маятникового типа. Предлагается использовать импульсные пиротехнические реактивные двигатели, установленные на конечных точках звеньев стержневой конструкции. Они более легкие и более дешевые по сравнению, например, с электродвигателями или пружинными устройствами. Особенно это важно, когда на орбите процесс раскрытия конструкции планируется осуществить лишь один раз. Чаще всего именно одноразово используются на орбите движители раскрытия стержневых конструкций. Расчет динамики инерционного раскрытия многозвенной стержневая конструкция выполнен при помощи уравнений Лагранжа второго рода.*

*Результаты предназначены для использования при проектировании систем раскрытия крупногабаритных конструкций в условиях невесомости, например, силовых каркасов для солнечных зеркал или космических антенн.*

*Ключевые слова: стержневая конструкция, процесс раскрытия в космосе, многозвенная стержневая конструкция, уравнение Лагранжа второго рода.*

## **FORMATION OF A MULTIPLE STRUCTURE IN WEIGHTLESSNESS UNDER THE INFLUENCE OF PULSES FOR THE FINAL POINTS OF ITS LINKS**

*Zapolsky L., Adashevska I.*

*A geometric model of a new method of opening in the conditions of weightlessness of a multi-link rod structure, the elements of which are connected like a multi-link pendulum, is given. The opening of the links of the structure is due to the influence of the pulses of pyrotechnic jet engines on their end points. The sets of rods are delivered into orbit in a compiled form (cassettes), after which it is necessary to perform the operation of its opening to provide the working form of the entire spatial core structure. The calculation of core structures of this class is proposed to be carried out on the basis of the Lagrangian dynamics of the multi-link pendulums as a conservative system. This will allow to obtain geometric models of successive phases of the disclosure of core structures with regard to dynamic properties. The use of such models at the design stage for further research will help to calculate the parameters of the functioning of the structure as a whole. The relevance of the chosen topic indicates the need to select and study a possible driver for the disclosure of the core design of the pendulum type. It is proposed to use pulsed pyrotechnic jet engines installed on the end points of the links of the core structure. They are lighter and cheaper in comparison with, for example, electric motors or spring devices. This is especially important when the process of disclosing a structure is planned to be carried out only once in orbit. Most often, it is the disposable thrusters of core structures that are once used in orbit. The calculation of the dynamics of the obtained inertial disclosure of the multi-link bar structure was carried out using the Lagrange equations of the second kind.*

*The results are intended for use in designing systems for the deployment of large-sized structures in zero gravity, for example, power frames for solar mirrors or space antennas.*

*Keywords: core structure, process of opening in space, multi-link bar structure, Lagrange equation of the second kind.*