

УДК 514.18

МОДЕЛЬ РОЗКРИТТЯ ЧОТИРИЛАНКОВОЇ СТЕРЖНЕВОЇ КОНСТРУКЦІЇ З РУХОМОЮ ТОЧКОЮ ВІДЛІКУ

Куценко Л.М., д.т.н.,

Семків О.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)

Наведено спосіб побудови геометричної моделі процесу розкриття стержневої конструкції в умовах невагомості. Особливість досліджень полягає у тому, що конструкція не кріпиться своєю «початковою» точкою до масивного об'єкта в космосі. Аналогом точки кріплення в нашому випадку є точка відліку (термін авторів), яка переміщується в просторі. Ініціювання руху стержневої конструкції передбачає наступне.

У початковому положенні чотириланкова (як приклад) стержнева конструкція розташовується на поверхні космічного апарата, завдяки чому її ланки утворюють пряму лінію. Стержнева конструкція приводиться до руху завдяки одночасному спрацюванню піропатронів, розташованих у вузлах конструкції [1,2]. В результаті стержнева конструкція має відокремитись від поверхні космічного апарата і, обертаючись, має рухатись у просторі в межах умовної площини. Задача полягає у тому, як обчислити величини зарядів піропатронів, а також як визначити напрямки дії цих піропатронів, щоб стержнева конструкція набувала евентуальних (можливих за певних умов) конфігурацій. Логічно виникаюче питання «як спіймати» стержневу конструкцію, що віддаляється, можна розв'язати за допомогою проведення аналогічних заходів, спрямувавши другу стержневу конструкцію «назустріч» першій конструкції. Варіант такої схеми розглянуто в даній роботі.

Одержані результати дозволяють змодельовати траєкторії руху кожного вузла стержневої конструкції. Дослідження базуються на головних положеннях лагранжевої механіки, за допомогою якої вдалося описати геометричну модель процесу розкриття чотириланкової конструкції з врахуванням її основних параметрів, а також умов її не прив'язаності до космічного апарату.

У достовірності геометричного моделювання процесу розкриття можна пересвідчитись переглянувши комп'ютерні

анімації на сайті [3].

Ключові слова: чотириланкова стержнева конструкція, лагранжева механіка, узагальнені координати, траєкторії руху вузлових точок.

Постановка проблеми. Розробка геометричних моделей різноманітних об'єктів є важливим етапом попереднього конструювання виробів. Особливо тих, які мають функціонувати в екстремальних умовах, наприклад, близьких до невагомості. Це стосується і геометричних моделей космічних інфраструктур, які споруджуються із стержневих конструкцій

Відомі схеми спорудження космічних об'єктів використовують технологію розкриття стержневої конструкції зі складеного «транспортного» стану у робоче положення. При цьому рушіями можуть бути пружини, електродвигуни, пневматичні пристрої, матеріали з термічною пам'яттю форми, тощо.

Але реалізація таких засобів на практиці є досить коштовною справою і потребує певних заходів під час доставки і перед використанням на орбіті. Альтернативу зазначеним рушіям розкриття можуть скласти піротехнічні імпульсні реактивні двигуни (типу піропатронів). Звідси виникла задача – формалізувати на рівні розробки геометричної моделі технологію трансформування стержневих конструкцій при моделюванні спорудження об'єктів в умовах невагомості (близьких до невагомості). Наголосимо, що в роботі розглядаються лише геометричні моделі процесу розкриття, а реалізація їх у реальних виробках потребує допомоги інженерів-технологів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наших статтях [1, 2] наведено огляди робіт, присвячених тематиці розкриття стержневих конструкцій в умовах невагомості. Наголошується, що у переважній кількості робіт розкриття конструкцій передбачається у випадку, коли точка кріплення є нерухомою (відносно космічного корабля) Тобто коли стержнева конструкція приєднана до корабля.

В результаті огляду літературних джерел були виявлені питання, ще не досліджені іншими авторами, що дозволило сформулювати наступну проблему досліджень. Розробити універсальний спосіб визначення форми евентуальних (можливих за певних умов) геометричних моделей елементів орбітальних інфраструктур. При цьому головною умовою переміщення стержневої конструкції є рухомість точки відліку (аналогу точки кріплення чотириланкового маятника).

Формулювання цілей статті. Описати геометричну модель процесу розкриття чотириланкової конструкції з врахуванням не лише

її параметрів, але й умови її не прив'язаності до космічного апарату.

Основна частина. Розглянемо безопірне розкриття чотириланкової конструкції в умовах невагомості, коли точка кріплення буде рухомою.

Закон руху чотириланкової конструкції визначимо з використанням узагальнених координат - кутів $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ і $u_4(t)$, а також координат точки відліку $x(t)$ і $y(t)$.

Для опису переміщення чотириланкової стержневої конструкції з рухомою точкою відліку було складено та розв'язано систему рівнянь Лагранжа другого роду. Для цього за допомогою узагальнених координат спочатку обчислюємо «віртуальні» координати вузлових точок консервативної системи:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1(t) &= x(t) + L_1 \sin(u_1(t)); & \bar{y}_1(t) &= y(t) + L_1 \cos(u_1(t)); \\ \bar{x}_2(t) &= \bar{x}_1(t) + L_2 \sin(u_2(t)); & \bar{y}_2(t) &= \bar{y}_1(t) + L_2 \cos(u_2(t)); \\ \bar{x}_3(t) &= \bar{x}_2(t) + L_3 \sin(u_3(t)); & \bar{y}_3(t) &= \bar{y}_2(t) + L_3 \cos(u_3(t)); \\ \bar{x}_4(t) &= \bar{x}_3(t) + L_4 \sin(u_4(t)); & \bar{y}_4(t) &= \bar{y}_3(t) + L_4 \cos(u_4(t)). \end{aligned} \quad (1)$$

Опис розкриття конструкції виконаємо на основі лагранжіана:

$$\begin{aligned} L = 0,5[m_0(x'^2 + y'^2) + m_1(x_1'^2 + y_1'^2) + \\ + m_2(x_2'^2 + y_2'^2) + m_3(x_3'^2 + y_3'^2) + m_4(x_4'^2 + y_4'^2)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Рівняння руху чотириланкової стержневої конструкції одержимо у вигляді системи з шести диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду відносно функцій $x(t)$, $y(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ і $u_4(t)$ (з причини громіздкості тут не наведено). З врахуванням відповідних початкових умов систему рівнянь Лагранжа другого роду розв'язано методом Рунге-Кутти, і одержані наближені розв'язки позначено символами $X(t)$, $Y(t)$, $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$ і $U_4(t)$. В обраний на площині системі координат $O\bar{x}\bar{y}$ з використанням розв'язків визначаємо координати вузлових точок в момент часу t . Для цього обираємо вирази (1), замінивши там малі літери на великі: x на X , y на Y , u на U .

Враховуючи обчислені координати вузлів стержневої конструкції як функції в часі, побудуємо кадри комп'ютерної анімації процесу розкриття. В результаті спостереження за процесом розкриття обираємо момент часу $t=t_0$ зупинки розкриття та визначаємо параметри стоп-коду $U_{\text{STOP}}=\{x(t_0), y(t_0), u_1(t_0), u_2(t_0), u_3(t_0), u_4(t_0)\}$.

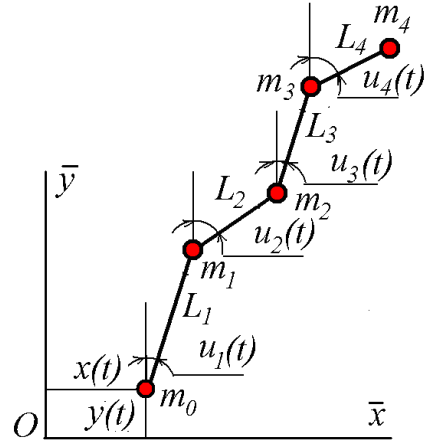


Рис. 1. Схема конструкції з рухомою точкою відліку

Вважаємо, що в момент початку руху положення множини ланок конструкції збігається з віссю Oy . Тому вектор значень початкового положення рухомої точки відліку та початкових кутів відхилень завжди матиме координати $\mathbf{U}=\{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$. Для тестового прикладу оберемо довжини ланок стержневої конструкції $\mathbf{L}=\{2, 2, 2, 2\}$, а значення мас вантажів вузлів (циліндричних шарнірів): $\mathbf{m}=\{1, 1, 1, 1, 1\}$. Оберемо вектор значень початкових значень швидкостей з координатами $\mathbf{U}'=\{0, 0, 5, 0, 0, -5\}$.

На рис. 2 наведено початкове положення конструкції та траєкторії руху її вузлів. Вважається, що рух точок відбувається у різних (близьких) паралельних площинах. Рухому точку відліку позначено кольором.

Звернемо увагу на те, що «симетричність» траєкторій руху вузлів забезпечили різні знаки у величинах зарядів першого і четвертого вузлів. Тобто напрямки дії зарядів в цих вузлах мають бути спрямовані взаємно обернено.

В умовах невагомості з використанням моделі розкриття чотириланкової стержневої конструкції з рухомою точкою відліку пропонується утворювати еventуальні геометричні моделі елементів орбітальних інфраструктур. Для цього розглянути конструкцію слід обрати у якості модуля, і за допомогою якого здійснювати побудови.

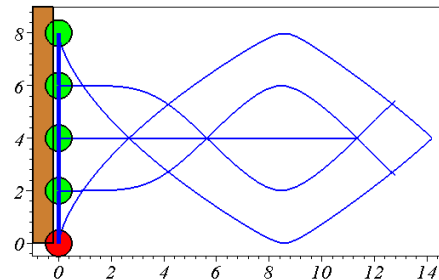


Рис. 2. Траєкторії руху вузлових точок

В якості прикладу на рис. 3 наведено кадри комп'ютерної анімації, зупинені в зазначені моменти часу. В цьому випадку модулі розташовані у просторі у вигляді шестикутника (рис. 3а).

Складена програма дозволяє визначити: траєкторії переміщення всіх вузлових точок; еventуальне взаємне розташування елементів чотириланкових стержневих конструкцій в певний момент часу процесу розкриття; графіки зміни у часі величин кутів як функцій узагальнених координат, а також перших та других похідних цих функцій; фазові траєкторії функцій узагальнених координат, що дозволить визначити діапазон зміни значень кутів і швидкостей розкриття, а також графіки прискорень зміни кутів розкриття та силових характеристик зміни величин кутів як функцій узагальнених координат, що дозволяє характеризувати сили в шарнірах між ланками в момент зупинки конструкції.

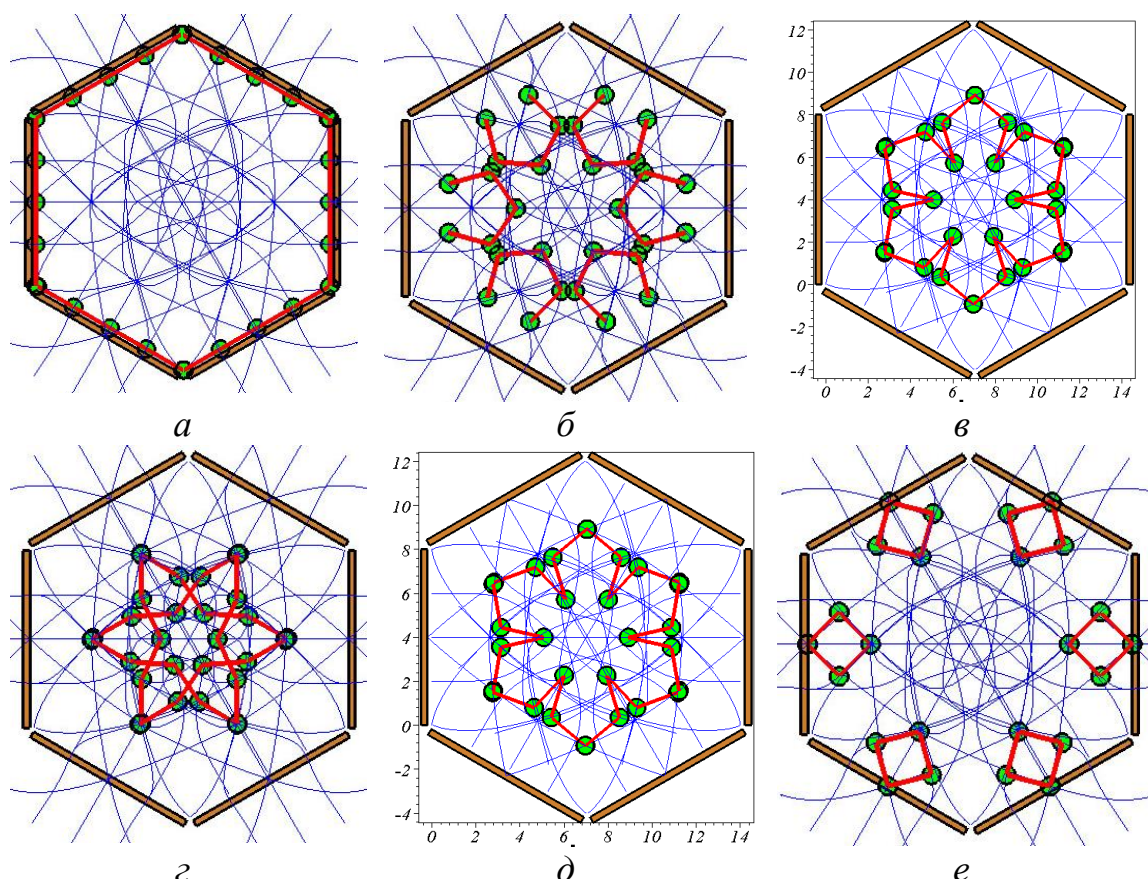


Рис. 3. Моделі орбітальних інфраструктур в моменти часу:
 а – $t=0$; б – $t=0.5$; в – $t=0.66$; г – $t=1.5$; д – $t=1.77$; е – $t=2.18$.

При цьому одночасне фіксування вузлів конструкції [1,2] має відбуватися у випадку, коли значення кутів набудуть величин:

при $t=0.5$ $u_1=2.21$; $u_2=0.913$; $u_3=-0.913$; $u_4=-2.21$;

при $t=0.66$ $u_1=2.67$; $u_2=1.41$; $u_3=-1.41$; $u_4=-2.67$;

при $t=1.5$ $u_1=3.15$; $u_2=3.61$; $u_3=-3.61$; $u_4=-3.15$;

при $t=1.77$ $u_1=3.31$; $u_2=4.49$; $u_3=-4.49$; $u_4=-3.31$;

при $t=2.18$ $u_1=3.92$; $u_2=5.51$; $u_3=-5.51$; $u_4=-3.92$;

На сайті [3] наведені приклади комп'ютерних анімацій процесу розкриття стержневих конструкцій у просторі.

Висновки. За допомогою лагранжевої механіки можна описати геометричну модель процесу розкриття чотириланкової конструкції з врахуванням не лише її основних параметрів, але й з врахуванням умови її не прив'язаності до космічного апарату.

Література

1. Куценко Л.М., Семків О.М., Запольський Л.Л. Геометричне моделювання переміщення в невагомості чотириланкового маятника з рухомою точкою кріплення. *Геометричне моделювання та інформаційні технології: наук. журн.* Миколаїв: МНУ імені В.О. Сухомлинського, 2017. Вип. 2(4). С. 41-51 (10).

2. Куценко Л.М., Запольський Л.Л. Геометричне моделювання переміщення в невагомості чотириланкового маятника з рухомою точкою кріплення. *Вісник Херсонського національного технічного університету : наук. журн.* Херсон: ХНТУ, 2018. Вип. 3(66). С. 153-158 (24).
3. Куценко Л.М., Пікрасов М.М., Запольський Л.Л. Ілюстрації до статті геометричне моделювання розгортання у невагомості багатоланкової конструкції з інерційним розкриттям. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9411>.

МОДЕЛЬ РАСКРЫТИЯ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОЙ СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ С ДВИЖУЩЕЙСЯ ТОЧКОЙ ОТСЧЕТА

Куценко Л.Н., Семкив О.Н., Запольский Л.Л.

Приведен способ построения геометрической модели процесса раскрытия стержневой конструкции в условиях невесомости. Особенность исследований заключается в том, что конструкция не крепится своей «начальной» точкой к массивному объекту в космосе. Аналогом точки крепления в нашем случае есть точка отсчета (термин авторов), которая перемещается в пространстве. Иницирование движения стержневой конструкции предусматривает следующее. В исходном положении четырехзвенная (как пример) стержневая конструкция располагается на поверхности космического аппарата, благодаря чему ее звенья образуют прямую линию. Стержневая конструкция приводится в движение благодаря одновременному срабатыванию пиропатронов, расположенных в узлах конструкции [1,2]. В результате стержневая конструкция должна отделиться от поверхности космического аппарата и, вращаясь, должна двигаться в пространстве в пределах условной плоскости.

Задача состоит в том, как вычислить величины зарядов пиропатронов, а также как определить направления действия этих пиропатронов, чтобы стержневая конструкция приобретала эвентуальные (возможные при определенных условиях) конфигурации. Логично возникающий вопрос «как поймать» удаляющуюся стержневую конструкцию, можно решить при помощи проведения аналогичных мероприятий, направив вторую стержневую конструкцию «навстречу» первой конструкции. Вариант такой схемы рассмотрен в данной работе. Полученные результаты позволяют смоделировать траектории движения каждого узла стержневой конструкции. Исследования базируются на главных положениях лагранжевой механики, с помощью которой удалось описать геометрическую модель процесса раскрытия четырехзвенной

конструкции с учетом ее основных параметров, а также условий не привязанности к космическому аппарату. В достоверности геометрического моделирования процесса раскрытия можно убедиться, просмотрев компьютерные анимации на сайте [3].

Ключевые слова: четырехзвенная стержневая конструкция, Лагранжева механика, обобщенные координаты, траектории движения узловых точек.

MODEL DISCLOSURES OF A FOUR-LINK ROD STRUCTURE WITH A MOVING REFERENCE POINT

Kutsenko L., Semkiv O., Zapolskiy L.

A method for constructing a geometric model of the process of disclosing a rod structure under zero gravity is given. A feature of research is that the structure is not fastened with its “initial” point to a massive object in space. An analogue of the attachment point in our case is the reference point (the term of the authors), which moves in space. The initiation of the movement of the rod structure provides for the following. In the initial position, the four-link (as an example) rod structure is located on the surface of the spacecraft, so that its links form a straight line. The rod structure is set in motion due to the simultaneous operation of the squibs located in the nodes of the structure [1,2]. As a result, the rod structure should be separated from the surface of the spacecraft and, rotating, should move in space within a conventional plane. The task is how to calculate the magnitude of the charges of the squibs, as well as how to determine the direction of action of these squibs so that the core structure acquires eventual (possible under certain conditions) configurations. The logical question “how to catch” the retractable bar structure can be solved by carrying out similar measures by sending the second bar structure “towards” the first structure. A variant of such a scheme is considered in this paper.

The results obtained allow us to simulate the motion paths of each node of the bar structure. The studies are based on the main provisions of Lagrangian mechanics, with the help of which it was possible to describe a geometric model of the process of opening a four-link structure taking into account its main parameters, as well as the conditions of non-attachment to the spacecraft.

The reliability of geometric modeling of the disclosure process can be seen by viewing computer animations on the site [3].

Key words: four-link bar structure, Lagrangian mechanics, generalized coordinates, trajectories of movement of nodal points.