

УДК 514.18

Леонід КУЦЕНКО

leokuts@i.ua

ORCID: 0000-0003-1554-8848

Леонід ЗАПОЛЬСЬКИЙ

z_l_1@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4357-2933

м. Харків

Присвячується

Міжнародному дню польоту людини в космос

(Резолюція A/RES/65/271 ООН від 7.04.2011)

МЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ІНЕРЦІЙНОГО РОЗКРИТТЯ ЧОТИРИЛАНКОВОГО МАЯТНИКА У НЕВАГОМОСТІ

Визначено механічні параметри розкриття елемента каркасу орбітального об'єкта як процесу коливання багатоланкового маятника в умовах невагомості. Коливання виникають завдяки впливу імпульсу піротехнічного реактивного двигуна на кінцеву точку ланки маятника. Опис інерційного розкриття маятника виконано за допомогою рівняння Лагранжа другого роду. Одержані результати доцільно використовувати при проектуванні розкриття великогабаритних конструкцій в умовах невагомості, наприклад, каркасів для сонячних дзеркал.

Ключові слова: багатоланковий маятник, стержнева конструкція, розкриття у космосі, дзеркало у космосі, рівняння Лагранжа другого роду.

Постановка проблеми

Один з перспективних напрямків розвитку позаземних конструкцій пов'язаний зі створенням дзеркал для освітлення районів Землі вночі відбитим з орбіти сонячним світлом [1-3]. Освітлення населених пунктів вночі з космосу дозволить вивільнити електричні потужності, застосовуваних для освітлення вулиць і приміщень і використання для інших потреб без додаткового будівництва нових електростанцій. Для рентабельного використання космічних конструкцій необхідно створювати компактні площі дзеркал порядку декількох гектарів. Наприклад, для освітлення відбитими сонячними променями у нічний час одного міста необхідне дзеркало площею понад 12 квадратних кілометрів. Зрозуміло, що великогабаритні конструкції повинні транспортуватися на орбіту у складеному вигляді, а потім розкриватися, набуваючи запланованої конструктором форми. Керування розкриттям великогабаритних конструкцій у просторі є складною науково-технічною задачею механіки, яка не має аналогів у наземній техніці. Створення великогабаритних конструкцій, що трансфо-

рмуються у космосі, пов'язано з рішенням ряду проблем техніки і механіки, обумовлених унікальністю об'єктів. Як правило, подібні конструкції мають вигляд комбінації стержнів (ферми), що трансформуються, з натягнутим на них спеціальним «дзеркальним» полотном, яке, власне, і формує відбивальну поверхню.

У 1788 році Лагранж одержав універсальний підхід для опису руху будь-якої механічної системи у вигляді рівнянь руху, відомих як рівняння Лагранжа другого роду. У роботі [4] досліджено можливість застосування рівнянь Лагранжа другого роду за умови невагомості (тобто у разі відсутності сили тяжіння), і, як наслідок, «нульової» потенціальної енергії механічної системи. Тому цікавим буде питання реалізації такого підходу на практиці при розрахунках технології розкриття космічних конструкцій у вигляді багатоланкового маятника.

Таким чином, доцільними будуть дослідження способу розкриття у невагомості великогабаритних конструкцій, основу яких складатимуть стержні, поєднані подібно багатоланковому маятнику. На орбіту комплект стержнів доставляється у складеному вигляді (касети), після чого слід вико-

нати операцію розкриття стержнів для надання їм робочої форми. Пропонується здійснювати зазначену операцію за допомогою інерційного способу, застосовуючи до розрахунку стержневих конструкцій Лагранжеву динаміку багатоланкових маятників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для обґрунтування вибору конструктивних параметрів елементів системи розкриття й підтвердження надійності цього процесу потрібне проведення детального математичного моделювання з використанням ефективної математичної моделі. Для побудови рівнянь руху і розв'язків можуть бути використані різні методи, деякі з них представлені в роботі [5]. Але в цих схемах застосовуються елементи з пружинами, тому вони мають обмеження на розміри ланок розкриття. В роботі [6] розглянуто застосування методу окремих тіл для моделювання багатоеlementних рухомих конструкцій космічних апаратів. Робота [7] присвячена методу розрахунку великогабаритних конструкцій, що розкриваються, 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. Інші варіанти систем розкриття наведені у огляді літератури [9]. Але там відсутня інформація про інерційний спосіб розкриття багатоланкових маятників і перевага віддається тросовим системам розкриття.

При розрахунках систем розкриття конструкцій типу багатоланкового маятника виникають питання вибору рушія, який би мав забезпечити необхідне кінцеве розташування його ланок. На практиці більш вживаними є каркасні тросові системи розкриття. У роботі [10] пропонується підхід до опису динаміки

сонячних батарей в процесі їхнього розкриття з урахуванням пружних властивостей елементів. Описуються математичні моделі механізмів розкриття та тросової синхронізації. Цій проблемі присвячена і робота [11], де описуються математичні моделі механізмів розкриття, тросової синхронізації, гальмування й фіксації панелей. Визначаються інтегральні динамічні характеристики й характеристики навантаження елементів сонячної батареї. Але в зазначених роботах не використовується інерційний спосіб розкриття великогабаритних сонячних батарей, і перевага віддається тросовій синхронізації. У роботі [12] наведено математичну модель процесу розкриття багатоланкової каркасної конструкції сонячної батареї із тросовою системою синхронізації. На рис. 1 представлена схема розкриття, де за допомогою електродвигунів та тросів здійснюється синхронізація зміни величин кутів між суміжними ланками.

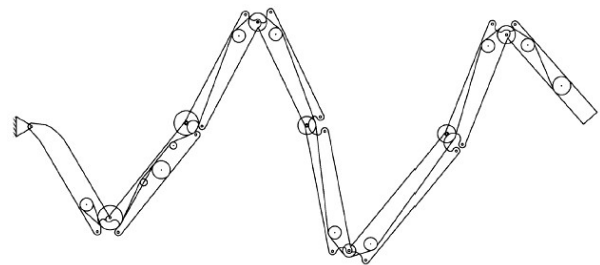


Рис. 1. Схема розкриття конструкції з тросовою системою синхронізації (запозичене з роботи [12])

При цьому на основі аналізу кінематичної схеми системи розкриття необхідно обрати розміри радіусів роликів і передатного відношення двох типів шестерних механізмів, що забезпечують послідовність фіксації ланок. Для дослідження процесу розкриття використане рівняння Лагранжа другого роду.

Нами обрано тросову систему розкриття у якості прототипу способу розкриття багатоланкової стержневої конструкції. Виконаний огляд літературних джерел показав, що 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 багатоланкової конструкції розрахованої геометричної форми, що є самостійною задачею.

Постановка завдання

Дослідити геометричну модель процесу розкриття у невагомості багатоланкової конструкції з інерційною системою розкриття, за умови, що конструкція ототожнюється з багатоланковим маятником на уявній площині. Це дозволить реалізувати розкриття конструкції з використанням лише одного піротехнічного реактивного двигуна на кінцевому вузлі маятника. Для цього необхідно скласти та розв'язати систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду для опису коливань в невагомості чотириланкового (як приклад) маятника; розробити схему ініціювання коливань шляхом впливу імпульсом на кінцеву ланку маятника, а також визначити механічні параметри розкриття для розрахунку елемента конструкції.

Виклад основного матеріалу

Дана стаття є продовженням результатів, одержаних в роботах [13, 14], до яких будемо далі звертатися. Зафіксуємо в умовах невагомості уявну площину з декартовими координатами Ox і розглянемо на ній ідеалізовану математичну модель багатоланкового маятника. Вважатимемо, що n – ланковий маятник, складається з n невагомих нерозтяжних стержнів довжин L_i ($i=1..n$), і шарнірно сполучених між собою прикінцевими вузловими точками, на яких закріплено вантажі (для спрощення кулі) з масами m_i ($i=1..n$). Рух шарнірів повинен забезпечувати переміщення вантажів лише у межах обраної площини. Для спрощення вважатимемо, що тертя у вузлах відсутнє, а точка кріплення нерухома у системі координат площини завдяки тому, що вона приєднана до космічного апарату, маса якого

на порядки більша маси вантажів у вузлах. Нехай початок першої ланки маятника збігається з початком координат. У якості напрямку відліку оберемо вісь Oy . Узагальненими координатами вважатимемо кути $u_i(t)$ ($i=1..n$), утворені відповідними ланками напрямком осі Oy на площині Ідео ініціювання у невагомості коливань багатоланкового маятника пояснимо на прикладі його чотириланкового варіанта (рис. 2).

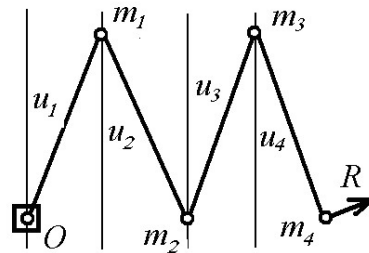


Рис. 2. Чотириланковий варіант маятника

Багатоланкову каркасну конструкцію на орбіту доставляють у складеному вигляді (наочно це нагадує побутовий метр у складеному стані). Тобто початкове положення множини ланок маятника має «складений» вигляд, і вектор значень початкових кутів відхилень завжди матиме координати $\theta = \{\pi/2, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2\}$. Ініціювання коливань маятника здійснюємо шляхом вибору координат вектора початкових швидкостей, наданих одному з кутів відхилень. Наприклад, $\theta' = \{0, 0, 0, u_4'(0)\}$ означає, що тільки кулі № 4 масою m_4 надано імпульс величиною $m_4 u_4'(0)$ (або куту розкриття $u_4(0)$ надано початкову швидкість $u_4'(0)$). Вектор напрямку R надання швидкості розташований перпендикулярно четвертій ланці L_4 маятника у прикінцевій точці (рис. 1). Визначає швидкість зміни кута розкриття $u_4(0)$ четвертої ланки. Тобто зазначене ініціювання коливань можна задати вектором $\theta' = \{0, 0, 0, u_4'(0)\}$. Обране ініціювання є моделюванням дії імпульсного реактивного піротехнічного двигуна. З врахуванням наданої реактивним двигуном швидкості $u_4'(0)$ маятникова система далі має розкриватися за інерцією. Це пояснює термін «інерційна система розкриття». Слід звернути увагу на те, що у складеному

ному стані початкове положення порівняно масивного реактивного двигуна знаходиться в зоні кріплення маятника до космічного апарату. Це спрощує компоновку виробу для транспортування, а також дозволяє компенсувати вплив імпульсу на систему завдяки розташуванню симетрично апарату такого ж багатоланкового маятника.

Для визначення у часі взаємного положення відносно цієї осі елементів багатоланкового маятника при коливаннях у невагомості за умови відсутності дисипативних сил використовуємо рівняння Лагранжа другого роду [15, 16]. Для прикладу розглянуто чотириланковий маятник. За допомогою узагальнених координат обчислюємо координати вузлів маятника:

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

і визначаємо лагранжіан, який ототожнюємо з кінетичною енергією маятника (обґрунтування в роботі [4]):

$$L = 0,5[m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + m_3(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + m_4(\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2)] \quad (2)$$

Після відповідних перетворень одержимо систему рівнянь Лагранжа другого роду з чотирьох диференціальних 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 Лагранжа другого слід враховувати такі параметри (тут і далі всі значення параметрів в умовних величинах):

- вектор довжин ланок маятника:
 $\mathbf{L} = \{L_1, L_2, L_3, L_4\}$;
- вектор значень мас куль:
 $\mathbf{m} = \{m_1, m_2, m_3, m_4\}$.

При розв'язанні системи рівнянь слід враховувати початкові умови:

– вектор значень початкових кутів відхилення: $\boldsymbol{\theta} = \{u_1(0), u_2(0), u_3(0), u_4(0)\}$.

– вектор значень початкових швидкостей, наданих кутам відхилення:

$$\boldsymbol{\theta}' = \{u_1'(0), u_2'(0), u_3'(0), u_4'(0)\}.$$

З врахуванням відповідних початкових умов систему рівнянь Лагранжа другого роду розв'язано наближено методом Рунге-Кутти в середовищі математичного пакету *maple*, і одержані розв'язки позначено символами $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$ і $U_4(t)$. В обраний на площині системі координат Oxy з використанням одержаних розв'язків визначаємо координати вузлових точок в момент часу t . Для цього використовуємо вирази (3) для обчислення координат вузлів маятника за допомогою узагальнених координат, замінивши там малі літери u на великі U .

За допомогою складеної *maple* програми крім переміщення вузлових точок можна визначити швидкості, що дозволить будувати відповідні фазові траєкторії переміщення. А також прискорення вузлових точок, що дає можливість аналізувати сили впливу на вузлові точки конструкції.

Для тестового прикладу розв'язання системи рівнянь Лагранжа другого роду обрано такі параметри (все в умовних величинах):

– довжини ланок маятника:

$$\mathbf{L} = \{2, 2, 2, 2\};$$

– значення мас куль:

$$\mathbf{m} = \{0.01, 0.01, 0.01, 9.85\}.$$

– значення початкових кутів відхилення: $\boldsymbol{\theta} = \{\pi/2, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2\}$.

– значення початкових швидкостей кутів відхилення: $\boldsymbol{\theta}' = \{0, 0, 0, 1\}$.

Маса четвертої кулі є більшою з причини розташування в ній реактивного піротехнічного двигуна (типу піропатрона).

Після виконання програми одержимо послідовність N кадрів анімаційних зображень залежно від часу розкриття конструкції. Одночасно видаються наближені значення поточних величин кутів $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ і $u_4(t)$ для обраного моменту часу t . В роботах [13, 14] наведено зображення фаз ланок маятника в процесі розкриття. При

аналізі анімаційних зображень коливань на прикінцевій фазі «розпрямлення» конструкції був помічений ефект поперечних коливань (тремор) вузлів маятника. Анімацію цього ефекту наведено в роботі [14]. Для зменшення дії моменту обертання навколо точки кріплення маятника пропонується си-

метрично відносно нерухомого вузла кріплення маятника приєднати ще один аналогічний багатоланковий маятник, який має коливатися у протифазі даному. Його коливання матимуть вигляд дзеркально відображених попереднім. На рис. 3 зображено деякі фази сумісних коливань маятників.

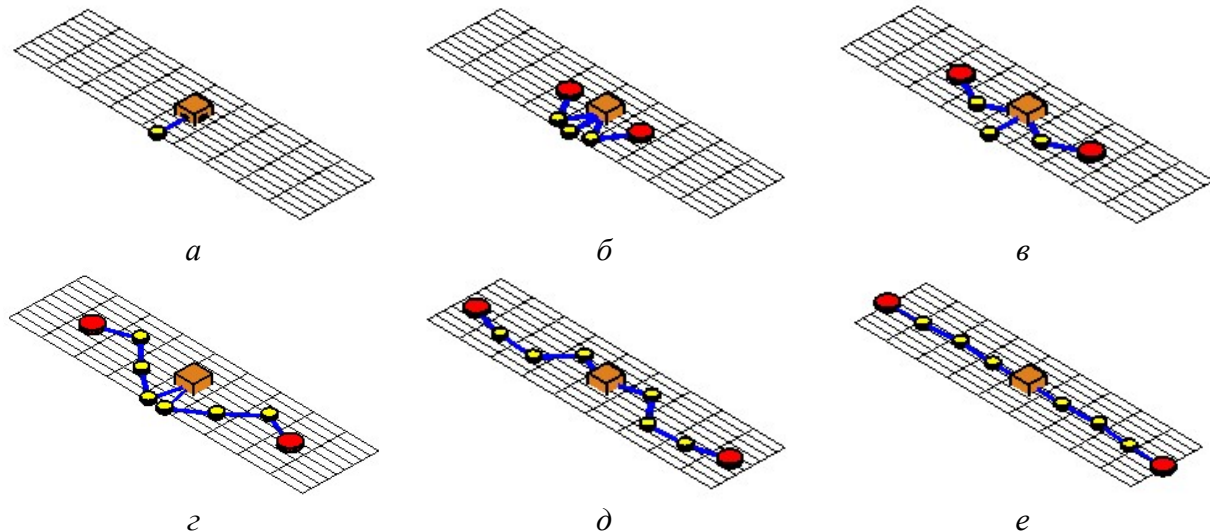


Рис. 3. Зображення маятників в процесі «симетричних» коливань залежно від часу t :
 $a - t = 0$; $b - t = 1$; $в - t = 1,77$; $г - t = 2,7$; $д - t = 3,5$; $e - t = 4,02$

Далі розглянуто спосіб розташування трьох маятників зі спільним вузлом кріплення (тріади), кути між якими 120 градусів. На рис. 4, *a-e* зображено деякі фази розкриття тріади залежно від часу t . За допомогою розкритих тріад в умовах невагомості у межах площини можна складати великогабаритні конструкції, які мають стільникову структуру. В роботі [13] зображено стільникову структуру на площині, побудовану за допомогою тріад, виділених різними кольорами. Ці результати доцільно використовувати при проектуванні розкриття в умовах невагомості конструкцій каркасів для сонячних дзеркал. Якщо продовжити процес розкриття тріади після 4,02 сек, то можна спостерігати «згортання» маятника до нової тріади. На рис. 5 зображено деякі фази «згортання» чотириланкового маятника до тріади залежно від часу t . На ресурсі [14] наведено приклади відповідних анімацій.

Отже, перевага інерційного способу розкриття багатоланкової конструкції у

невагомості полягає у тому, що нема потреби синхронізувати між собою засоби керування величинами кутів у вузлах багатоланкової конструкції.

Для обчислення механічних характеристик процесу розкриття побудуємо графіки залежностей у часі зміни величин кутів, зміни швидкостей розкриття кутів, а також зміни прискорень розкриття кутів. На рис. 6-8 наведено зазначені графіки на часовому відрізку $t \in 0..8,04$. З метою деталізації поводження графіків у околі часу $t = 4,02$ (в момент повного розкриття) були побудовані графіки зазначених величин на часовому відрізку $t \in 3,9..4,1$ (рис. 9-11). Знайдені залежності зміни прискорень розкриття кутів дозволили побудувати графіки зміни сил, які діють на вузлові елементи маятника (де розташовані маси). На рис 8 і 11 побудовано графіки $F_i = m_i a_i(t)$ (де $i=0..4$).

На рис. 12 зображено фазові траєкторії для функцій узагальнених координат.

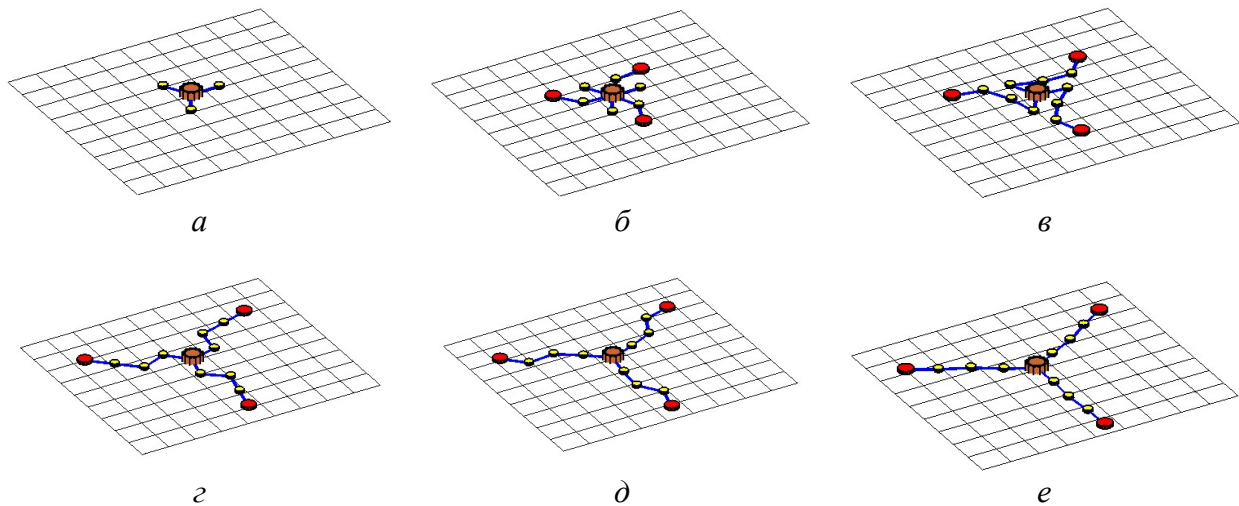


Рис. 4. Фази розкриття триади залежно від часу t :
 $a - t = 0$; $b - t = 1,85$; $c - t = 2,58$; $d - t = 3,54$; $e - t = 3,78$; $f - t = 4,02$

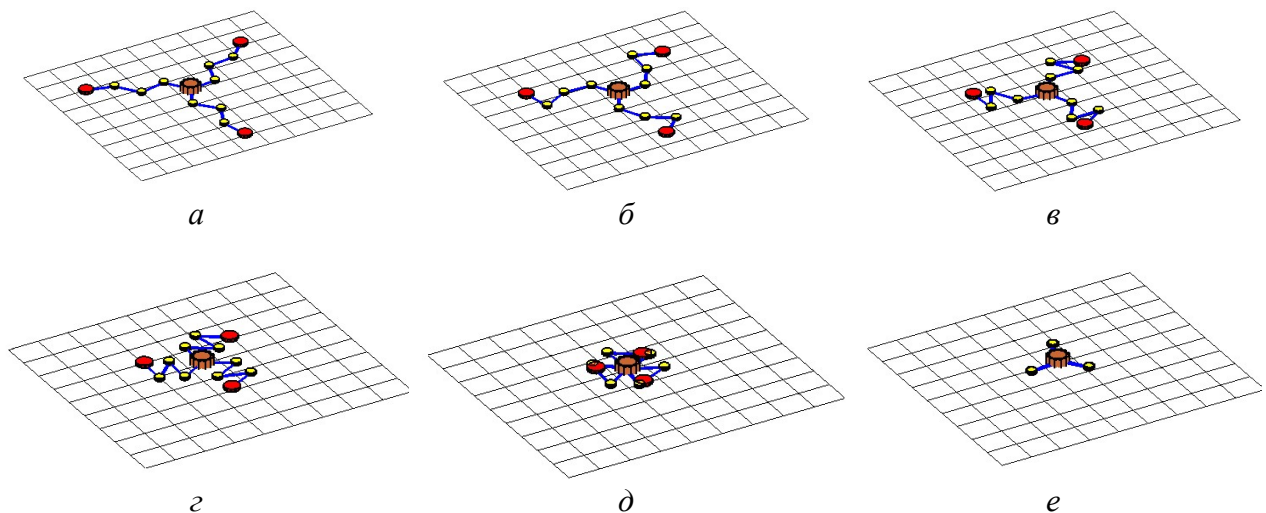


Рис. 5. Фази «згортання» чотириланкового маятника до триади залежно від часу t :
 $a - t = 4,5$; $b - t = 5,07$; $c - t = 5,71$; $d - t = 6,35$; $e - t = 7,16$; $f - t = 8,04$

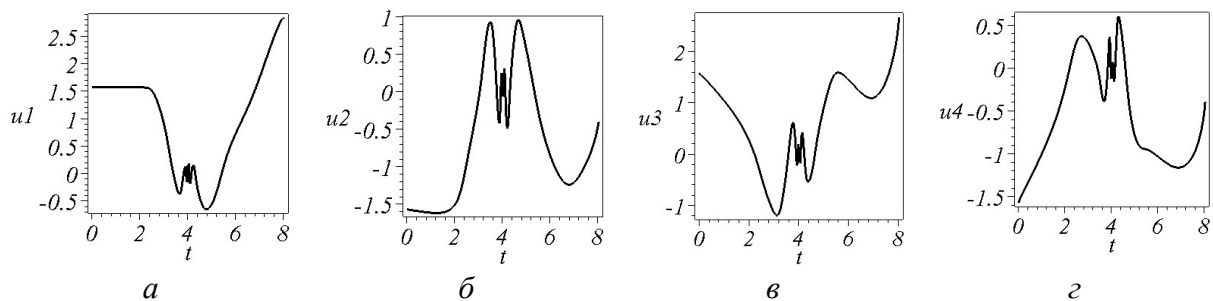


Рис. 6. Графіки залежностей у часі зміни величин кутів
 відповідних узагальнених координат при $t \in 0..8,04$:
 a – для u_1 ; b – для u_2 ; c – для u_3 ; d – для u_4

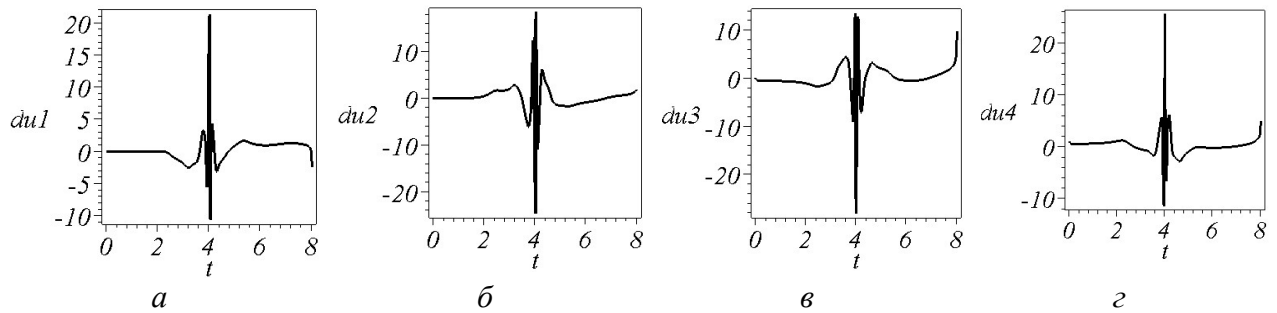


Рис. 7. Графіки залежностей у часі швидкості зміни величин кутів відповідних узагальнених координат при $t \in 0..8,04$:

a – для u_1 ; $б$ – для u_2 ; $в$ – для u_3 ; $г$ – для u_4

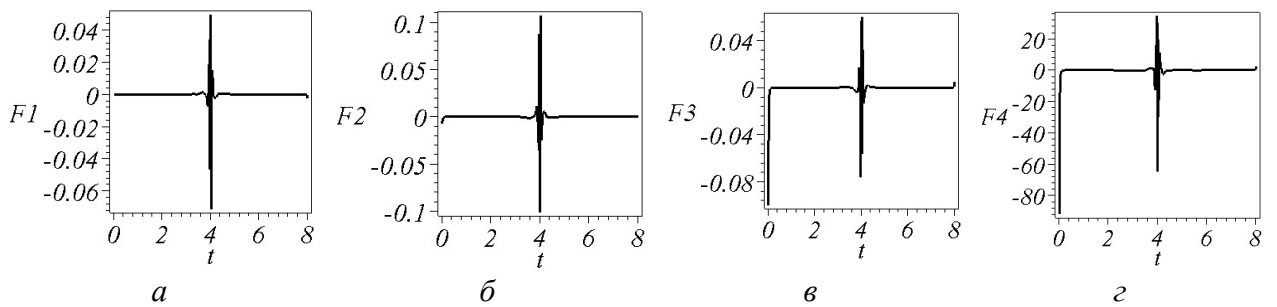


Рис. 8. Графіки залежностей у часі зміни величин сил, які діятимуть на відповідні вузлові точки при $t \in 0..8,04$:

a – для u_1 ; $б$ – для u_2 ; $в$ – для u_3 ; $г$ – для u_4

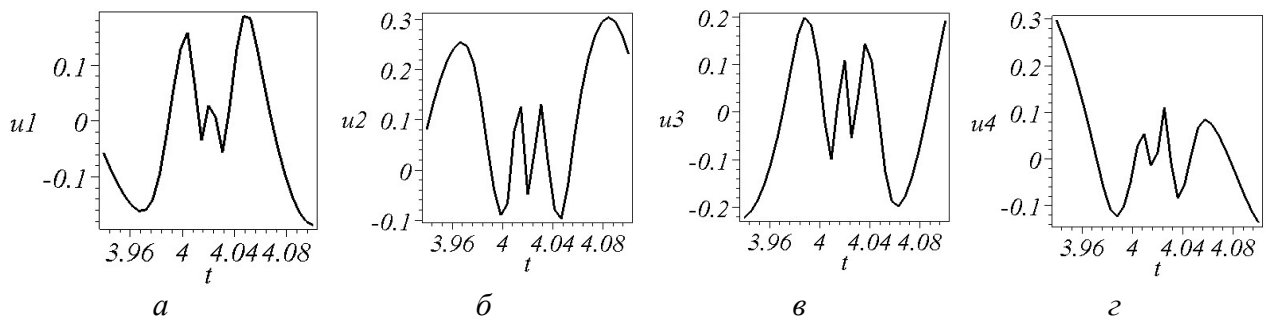


Рис. 9. Графіки залежностей у часі зміни величин кутів відповідних узагальнених координат при $t \in 3,9..4,1$:

a – для u_1 ; $б$ – для u_2 ; $в$ – для u_3 ; $г$ – для u_4

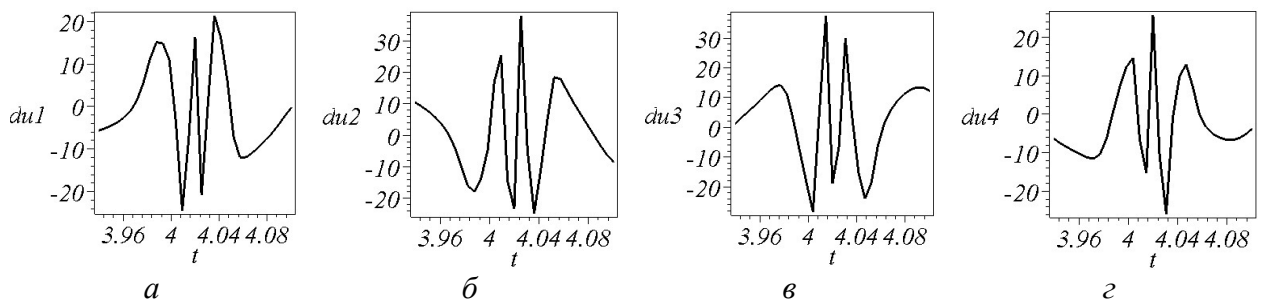


Рис. 10. Графіки залежностей у часі швидкості зміни величин кутів відповідних узагальнених координат $t \in 3,9..4,1$:

a – для u_1 ; $б$ – для u_2 ; $в$ – для u_3 ; $г$ – для u_4

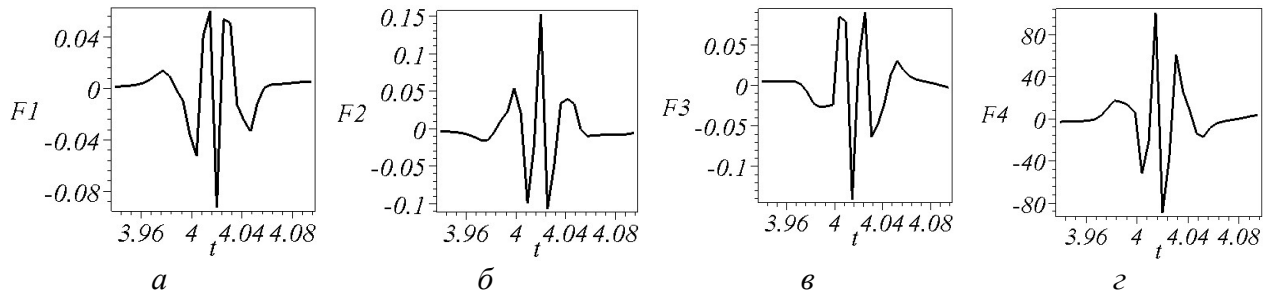


Рис. 11. Графіки залежностей у часі зміни величин сил, які діятимуть на відповідні вузлові точки $t \in 3,9..4,1$:
 а – для u_1 ; б – для u_2 ; в – для u_3 ; з – для u_4

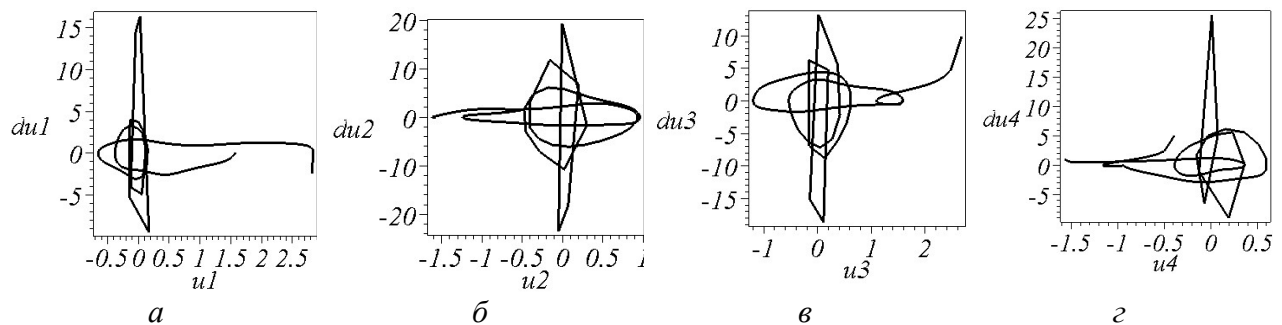


Рис. 12. Фазові траєкторії узагальнених координат чотириланкового маятника при $t \in 0..8,04$:
 а – для u_1 ; б – для u_2 ; в – для u_3 ; з – для u_4

На завершення зазначимо, що для розрахунку розкриття тріади використовувалися рівняння Лагранжа другого роду, які базуються на варіаційних принципах. Ці рівняння дозволили описати послідовні значення величин кутів між суміжними ланками для досягнення багатоланкового маятника розкритого стану. Тому можна стверджувати, що зміна значень величин кутів між суміжними ланками у певному розумінні буде оптимальною. Довільна інша послідовність зміни значень величин кутів приведе до збільшення часу розкриття багатоланкового маятника.

Висновки і перспективи досліджень

Висновки і перспективи досліджень. Показано, що для розкриття конструкції багатоланкового маятника доцільно застосувати вплив імпульсу піротехнічного реактивного двигуна на кінцевий вузловий

елемент маятника. Це дозволило реалізувати схему інерційного розкриття багатоланкового маятника за допомогою одного двигуна, що не потребує синхронізувати між собою засоби керування величинами кутів в окремих вузлах багатоланкової конструкції. Для спрацювання датчиків замків фіксації положення суміжних ланок маятника у розкритому стані доцільно використати поперечні коливання вузлів (тремор) на кінцевій фазі розкриття маятника. Параметри розкриття чотириланкового маятника можна визначити за допомогою побудованих графіків зміни у часі величин кутів, зміни швидкостей розкриття кутів, а також зміни прискорень розкриття кутів.

У подальших дослідженнях планується провести аналіз аналогічних механічних характеристик процесу розкриття для складніших орбітальних конструкцій. Наприклад, наведених у роботах [17, 18].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lovegrove, K. Concentrating Solar Power Technology. Principles, Developments and Applications [Text] / K. Lovegrove, W. Stein. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. – 708 p.
2. Краффт, А.Э. Будущее космической индустрии: Пер. с англ. [Текст] / А.Э. Краффт. – М.: Машиностроение, 1979. – 200 с.
3. Barathwaj, G. Wireless power transmission of space based solar power [Text] / G. Barathwaj, K. Srinag // 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. – IPCBEE, vol.6. – IACSIT Press, Singapore, 2011. – P. v2-227 – v231.
4. Szuminski, W. Dynamics of multiple pendula without gravity. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.cmsim.eu/papers_pdf/january_2014_papers/7_CMSIM_Journal_2014_Szuminski_1_57-67.pdf
5. Крылов, А.В. Моделирование раскрытия солнечных батарей различных конфигураций [Текст] / А.В. Крылов, С.А. Чурилин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2011, № 1. – С. 106-111.
6. Юдинцев, В.В. Моделирование процессов раскрытия многоэлементных конструкций космических аппаратов [Текст] / В.В. Юдинцев // Полет. – 2012, № 5. – С. 28-33.
7. Щесняк, С. Проектирование и расчет крупногабаритных раскрывающихся конструкций с помощью программных комплексов MSC.Software [Текст] / С. Щесняк, А. Романов // CADmaster. – 2009, № 2-3. – С. 28-36.
8. Бойков, В.Г. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER [Текст] / В.Г. Бойков // САПР и графика. – № 9. – 2000. – С. 17-20.
9. Зимин, В.Н. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций [Текст] / 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. – № 10. – 2014. – С. 179-191.
10. Борзих, С.В. Моделирование процесса раскрытия крупногабаритных солнечных батарей [Текст] / С.В. Борзых, Д.В. Бакулин, Ю.Н. Щиблев // Известия РАН. Математическое моделирование. – 2004. – № 6. – С. 88-92.
11. Бакулин, Д.В. Моделирование процесса раскрытия солнечных батарей [Текст] / Д.В. Бакулин, С.В. Борзых, Н.С. Ососов, Ю.Н. Щиблев // Матем. моделирование. – 2004. – том 16, номер 6. – С. 88-92.
12. Бушуев, А.Ю. Математическое моделирование процесса раскрытия солнечной батареи большой площади [Текст] / А.Ю. Бушуев, Б.А. Фарафонов // Математическое моделирование и численные методы. – 2014. – № 2. – С. 101-114.
13. Kutsenko, L. Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness [Text] / L. Kutsenko, O. Shoman, O. Semkiv, L. Zapolsky, I. Adashevskaya and others // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 6/7 (90), 2017. – P. 42-50.
14. Куценко, Л.М. Ілюстрації до геометричного моделювання інерційного розкриття багатоланкового стержневої конструкції у невагомості [Електронний ресурс] / Л. М. Куценко. – Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>
15. Gmitterko, A. N-link Inverted Pendulum Modeling [Text] / A. Gmitterko, M. Grossman // Recent Advances in Mechatronics. – 2010, Part 3. – P. 151-156.
16. Martinez-Alfaro H. Obtaining the dynamic equations, their simulation, and animation for N pendulums using Maple. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www2.esm.vt.edu/~anayfeh/conf10/Abstracts/martinez-alfaro.pdf>
17. Kutsenko, L. Geometrical modeling of the process of weaving a cloth in weightlessness using the inertial unfolding of dual pendulum [Text] / L. Kutsenko, O. Semkiv, L. Zapolskiy, O. Shoman, A. Kalinovskiy, and others // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 1/7 (91), 2018. – P. 37-46.
18. Куценко, Л.М. Ілюстрації до геометричного моделювання плетіння сіткополотна в невагомості за допомогою інерційного розкриття подвійного стержневої конструкції [Електронний ресурс] / Л.М. Куценко. – Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5143>

Leonid KUTSENKO, Leonid ZAPOLSKIY
Kharkiv

**MECHANICAL PARAMETERS OF THE INERTIAL OPENING
OF A FOUR-LINK PENDULUM IN WEIGHTLESSNESS**

Mechanical parameters of the opening of the frame element of the orbital object as a process of oscillation of a multi-tiered pendulum under conditions of weightlessness are determined. The oscillations are due to the influence of the momentum of the pyrotechnic jet engine on the end point of the pendulum link. The description of the inertial opening of the pendulum is performed using the Lagrange equation of the second kind. The obtained results are expedient for use in designing the unfolding of structures in conditions of weightlessness, for example, skeletons for solar mirrors.

Keywords: multi-link pendulum, rod construction, opening in space, mirror in space, Lagrange equation of the second kind.

Леонід КУЦЕНКО, Леонід ЗАПОЛЬСКИЙ
Харьков

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНЕРЦИОННОГО РАСКРЫТИЯ
ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО МАЯТНИКА В НЕВЕСОМОСТИ**

Определены механические параметры раскрытия элемента каркаса орбитального объекта как процесса колебания многозвенного маятника в условиях невесомости. Колебания возникают благодаря влиянию импульса пиротехнического реактивного двигателя на конечную точку звена маятника. Описание инерционного раскрытия маятника выполнено с помощью уравнения Лагранжа второго рода. Полученные результаты целесообразно использовать при проектировании раскрытия конструкций в условиях невесомости, например, каркасов для солнечных зеркал.

Ключевые слова: многозвенный маятник, стержневая конструкция, раскрытие в космосе, зеркало в космосе, уравнение Лагранжа второго рода.

Стаття надійшла до редколегії 29.03.2018