

УДК 629.786.2:621.396.677:534.1

Моделирование динамики движения двухзвенного механизма посадочной платформы десантного модуля

Герасимчук В.В.

*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия*

e-mail: gerasimchuk@laspace.ru

Статья поступила 23.08.2019

Аннотация

Приведены результаты решения прямой задачи кинематики для трапа посадочной платформы десантного модуля космического аппарата путем его представления в виде двухзвенного механизма с вращательными соединениями. Движение звеньев механизма описывается на основе матричного представления Денавита-Хартенберга совместно с методом Лагранжа-Эйлера. Качественное и количественное согласование результатов численного моделирования системы нелинейных дифференциальных уравнений динамики многозвенного механизма в сравнении с моделированием программным комплексом EULER свидетельствует об адекватности разработанных динамических моделей.

Ключевые слова: прямая задача кинематики, многозвенный механизм, космический аппарат.

Введение

Действующая Федеральная космическая программа России предусматривает фундаментальные планетные космические исследования с запуском космических аппаратов, осуществляющих доставку десантными модулями посадочных платформ с планетоходами для изучения поверхности и структуры космических объектов. Сход планетохода с десантного модуля на поверхность планеты планируется осуществлять по раскладывающемуся трапу (рис.1). Возникает актуальная научно-техническая задача выбора рационального конструкторского решения для обеспечения упорядоченного и надёжного раскрытия трапов двухзвенного механизма с целью минимизации нагрузок при ударе о поверхность грунта планеты звеньев трапа посадочной платформы десантного модуля межпланетной космической станции.

В настоящее время при рассмотрении динамики движения многозвенных механизмов широкое распространение получили следующие методы составления уравнения динамики механизмов [1]:

- 1) Кинетостатический метод на основе обобщённых уравнений Д'Аламбера (на принципе возможных перемещений) [2];
- 2) Метод [3], основанный на уравнениях Лагранжа II-го рода (форма Лагранжа-Эйлера);
- 3) На основе уравнений Гиббса-Аппеля [4];
- 4) Метод, основанный на принципе наименьшего принуждения Гаусса (считается одним эффективнейших численных методов);

5) В форме Ньютона-Эйлера (малоприспособленная для анализа) [5].

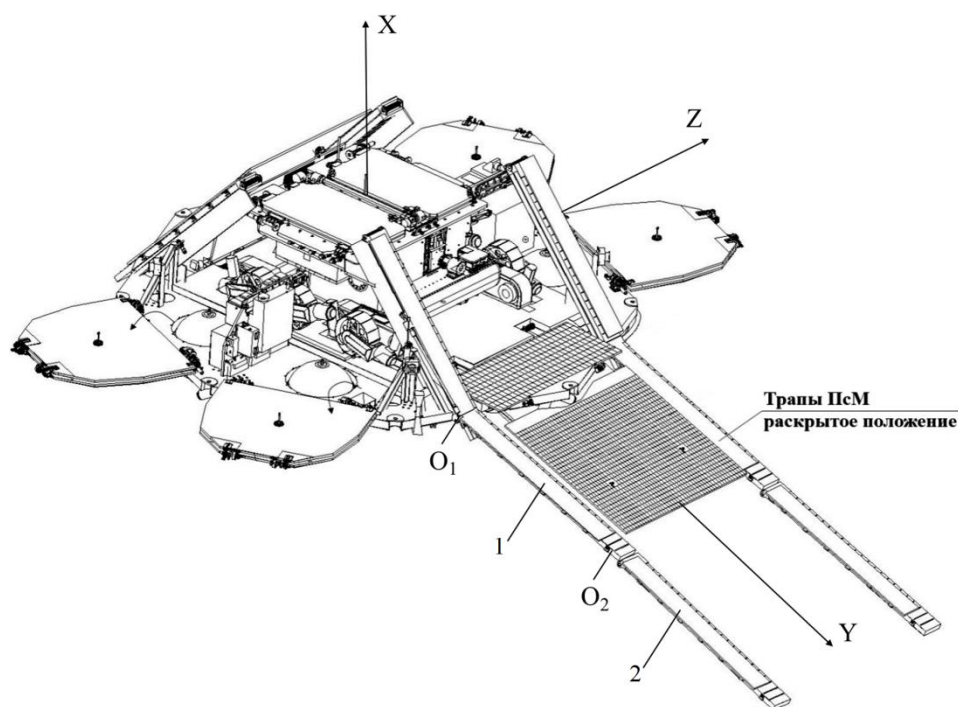


Рисунок 1. Общий вид посадочной платформы с раскрытыми трапами

Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки (по критериям эффективности реализации численного метода и сложности анализа) в зависимости от выбора концептуальной модели многосвязного механизма и формирования его кинематической модели [6].

Динамику движения трапа десантного модуля представим в виде двухзвенного механизма с вращательными соединениями (рис.2), формулируя её как прямую задачу кинематики [7] двухзвенного трапа, состоящую в определении вектора обобщённых ускорений (интегрирование которых позволит получить значение обобщённых координат и скоростей) по заданным силам и моментам [8].

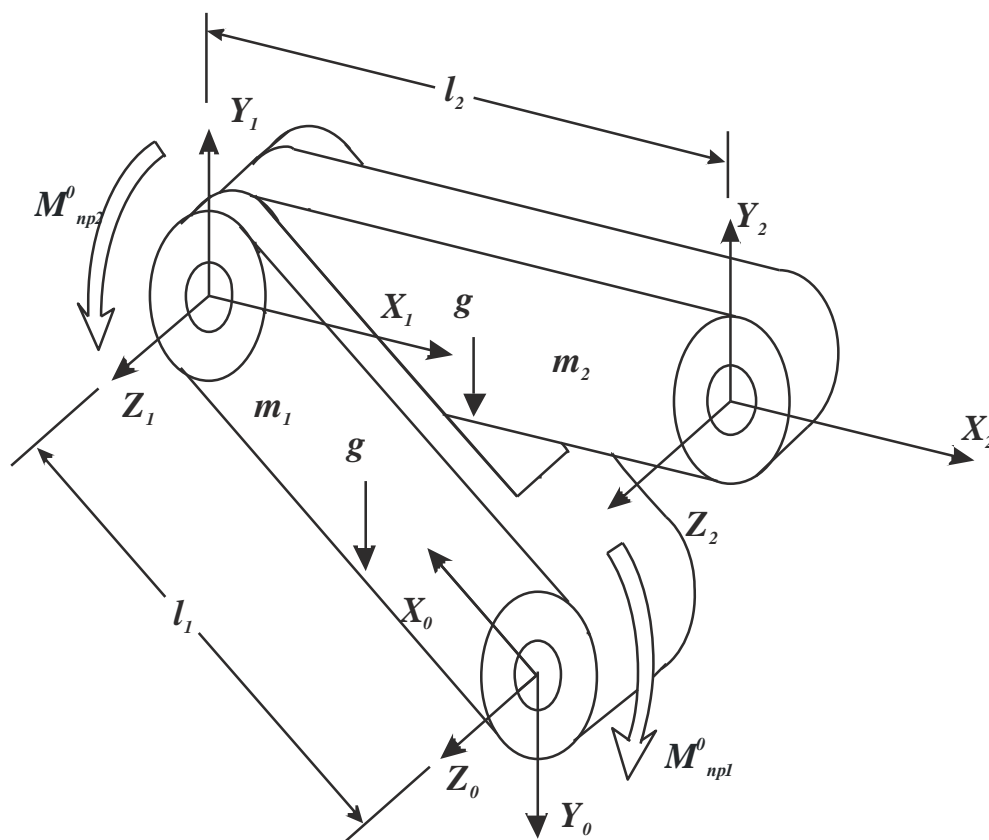


Рисунок 2. Кинематическая схема двухзвенного трапа

Полное описание движения механизмов в таком случае удобно получить на основе матричного представления Денавита-Хартенберга совместно с методом Лагранжа-Эйлера [9]. Координаты произвольной точки \bar{r} относительно i -ой системы координат преобразовывают в координаты этой же точки относительно $(i-1)$ -й системы координат с помощью матрицы преобразования однородных координат ${}^i A_{i-1}$ для использования уравнений Лагранжа-Эйлера [10]

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Здесь L - функция Лагранжа ($L=K-P$), K – полная кинетическая энергия механизма, P - полная потенциальная энергия механизма, q_i – обобщенные координаты механизма, \dot{q}_i - первая производная по времени обобщенных координат, τ_i - обобщенные силы (или моменты), создаваемые в i -м сочленении для реализации

заданного движения i -ого звена. Так как углы поворотов в сочленениях непосредственно доступны измерению датчиками, то они и образуют естественную систему обобщенных координат [11]. Обобщенные координаты в этом случае совпадают с присоединенными переменными механизма $q_i=Q_i$. Оси сочленений параллельны оси Z , перпендикулярной плоскости рисунка. Присоединенными углами являются углы Q_1, Q_2 звенья имеют массы m_1 и m_2 , начальные моменты закрутки в i -ом сочленении M_{np1}^0, M_{np3}^0 [12].

Соотношения для матрицы преобразования координат ${}^{i-1}A_i$ ($i=1,2$) тогда [13]

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & lC_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & lS_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^0A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & lC_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & lS_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^0A_2 = {}^0A_1 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l(C_{12} + C_1) \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l(S_{12} + S_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Здесь $C_i = \cos Q_i$; $S_i = \sin Q_i$; $C_{ij} = \cos(Q_i + Q_j)$; $S_{ij} = \sin(Q_i + Q_j)$.

Для вращательного сочленения

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица Денавит-Хартенберга сложного преобразования для смежных звеньев с номерами i и $i-1$:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos Q_i & -\cos \alpha_i \sin Q_i & \sin \alpha_i \sin Q_i & a_i \cos Q_i \\ \sin Q_i & \cos \alpha_i \cos Q_i & -\sin \alpha_i \cos Q_i & a_i \sin Q_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Представленные здесь четыре геометрические параметра, соответствующие каждому звену, позволяют полностью описать движение:

Q_i – присоединённый угол – угол, на который надо повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью x_i ;

d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $i-1$ –й системы координат, отсчитываемое вдоль оси z_{i-1} ;

a_i – линейное смещение – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси x_i , т.е. кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i ;

α_i – угловое смещение – угол, на который надо повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала сонаправленной с осью z_i .

Для вращательного сочленения параметры d_i , a_i и α_i являются постоянными характеристиками сочленения, а Q_i переменной величиной.

В нашей кинематической схеме параметры звеньев будут иметь следующие значения $d_1 = d_2 = 0$, $a_1 = a_2 = l$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$.

Уравнения движения в векторно-матричной форме [14] будут иметь вид:

$$D(Q)\ddot{Q} + h(Q, \dot{Q}) + C(Q) = u(t)$$

Здесь

$\dot{Q}(t)$ – вектор угловых скоростей;

$\ddot{Q}(t)$ – вектор ускорения;

$C(Q)$ – вектор гравитационных сил;

$$C(Q) = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T,$$

$$c_i = \sum_{j=i}^n (-m_i \mathbf{g} \mathbf{U}_{ji}^j \bar{\mathbf{r}}_j), \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

Коэффициенты c_i учитывают силу тяжести, действующую на каждое звено.

$$c_1 = -(m_1 \mathbf{g} \mathbf{U}_{11}^1 \bar{\mathbf{r}}_1 + m_2 \mathbf{g} \mathbf{U}_{21}^2 \bar{\mathbf{r}}_2) = 1/2 m_1 g l_1 C_1 + 1/2 m_2 g l_2 C_{12} + m_2 g l_1 C_1$$

$$c_2 = -m_1 \mathbf{g} \mathbf{U}_{12}^2 \bar{\mathbf{r}}_2 = -m_2 (1/2 g l_1 C_{12} - g l_2 C_{12})$$

$\mathbf{h}(Q, \dot{Q})$ – вектор кориолисовых и центробежных сил;

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m; \quad i, k, m = 1, 2, \dots, n;$$

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{Tr}(\mathbf{U}_{jkm} \mathbf{J}_j \mathbf{U}_{ji}^T); \quad i, k, m = 1, 2, \dots, n;$$

Коэффициенты h_{ikm} связывают действующие в сочленениях силы и моменты со скоростями изменения присоединенных переменных. Т.е. коэффициент h_{ikm} определяет связь момента в i -ом сочленении по результатам движения в k -м и m -м сочленениях, со скоростями изменения k -й и m -й присоединённых переменных.

$$h_1 = -\frac{1}{2} m_2 S_2 l_2^2 \dot{Q}_2^2 - m_2 S_2 l_2^2 \dot{Q}_1 \dot{Q}_2$$

$$h_2 = \frac{1}{2} m_2 S_2 l_2^2 \dot{Q}_1^2$$

$\mathbf{D}(Q)$ – матрица инерции.

Элементы матрицы определяются выражением

$$D_{ij} = \sum_{j=\max(i,k)}^n \text{Tr}(\mathbf{U}_{jk} \mathbf{J}_j \mathbf{U}_{ji}^T), \quad i, k = 1, 2, \dots, n;$$

Коэффициенты d_i устанавливают связь действующих в сочленениях сил и моментов с ускорениями присоединённых переменных [15]. В частности, при $i=k$ коэффициент D_{ij} связывает момент τ_i , действующий в i -м сочленении, с ускорением i -й присоединенной переменной. Если $i \neq k$, то D_{ik} определяет момент (или силу), возникающие в i -м сочленении под действием ускорения в k -м сочленении [16].

$$D_{11} = Tr(\mathbf{U}_{11}\mathbf{J}_1\mathbf{U}_{11}^T) + Tr(\mathbf{U}_{22}\mathbf{J}_2\mathbf{U}_{21}^T) = 1/3m_1l_1^2 + 4/3m_2l_2^2 + m_2C_2l_2^2$$

$$D_{12} = D_{21} = Tr(\mathbf{U}_{22}\mathbf{J}_2\mathbf{U}_{21}^T) = 1/3m_2l_2^2$$

$\mathbf{u}(t)$ – вектор управляющего момента в сочленении [17].

$$\mathbf{U}_{11} = \frac{\partial {}^0\mathbf{A}_1}{\partial \theta_1} = \mathbf{Q}_1^0\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -S_1 & -C_1 & 0 & -lS_1 \\ C_1 & -S_1 & 0 & lC_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{U}_{21} = \frac{\partial {}^0\mathbf{A}_2}{\partial \theta_1} = \mathbf{Q}_1^0\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -l(S_{12} + S_1) \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & l(C_{12} + C_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_{22} = \frac{\partial {}^0\mathbf{A}_2}{\partial \theta_2} = {}^0\mathbf{A}_1\mathbf{Q}_1^1\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -lS_{12} \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & lC_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, коэффициенты c_i , D_{ik} и h_{ikm} являются функциями как присоединенных переменных, так и динамических параметров звеньев.

Из предположения о равенстве нулю всех центробежных моментов инерции [18] формула для матрицы псевдоинерции \mathbf{J}_i примет вид:

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} 1/3m_1l_1^2 & 0 & 0 & -1/2m_1l_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_1l_1^2 & 0 & 0 & 0 \quad m_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} 1/3m_2l_2^2 & 0 & 0 & -1/2m_2l_2^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_2l_2^2 & 0 & 0 & 0 \quad m_2 \end{bmatrix}$$

Тогда:

$$\ddot{\mathbf{Q}}(t) = -\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{Q})[h(\mathbf{Q}, \dot{\mathbf{Q}}) + C(\mathbf{Q})] + \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{Q})\mathbf{u}(t)$$

$$\ddot{Q}(t) = - \begin{bmatrix} D_{11} & \dots & D_{14} \\ \vdots & & \vdots \\ D_{14} & \dots & D_{44} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} h_1(Q, \dot{Q}) + C_1(Q) \\ \vdots \\ h_4(Q, \dot{Q}) + C_4(Q) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & \dots & D_{14} \\ \vdots & & \vdots \\ D_{14} & \dots & D_{44} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_4(t) \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{Q}_1 = \frac{\tau_1 - \left[\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 C_2 \right] \ddot{Q} - \left[-\frac{1}{2} m^2 l_2^2 S_2 \dot{Q}_2^2 - m_2 l_2^2 S_2 \dot{Q}_1 \dot{Q}_2 \right]}{\left[\frac{1}{3} m_1 l_1^2 + \frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_2 l_2^2 C_2 \right]} - \frac{\left[\frac{1}{2} m_1 g l_1 C_1 + \frac{1}{2} m_1 g l_1 C_1 \right]}{\left[\frac{1}{3} m_1 l_1^2 + \frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_2 l_2^2 C_2 \right]}; \\ \ddot{Q}_2 = \frac{\tau_2 - \left(\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 C_2 \right) \ddot{Q}_1 - \frac{1}{2} m_2 l_2^2 S_2 \dot{Q}_1 - \frac{1}{2} m_2 g l_2 C_{12}}{\frac{1}{3} m_2 l_2^2}. \end{array} \right.$$

Решение данной системы нелинейных уравнений осуществлялось численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка и с использованием программного комплекса EULER (рис.3), разработанного НПО «Автоматика» и предназначенного для математического моделирования динамики многокомпонентных механических систем [19].

Рассматривалось движение системы, состоящей из двух звеньев, соответствующих раскрывающимся звеньям трапа. Корневое звено 1 трапа и концевое звено 2 моделировались, соответственно, звеньями Body 1 и Body 2 с объектами Solid 1 и Solid 2 (тело). Узлы поворота трапа задавались парами вращения (joint 1 и joint 2). Силовые воздействия на звенья 1 и 2 вводились в виде силовых элементов «момент по датчикам на одну точку». Параметры расчета и моделирования представлены в таблице 1. Функции приложенных моментов имеют вид, приведенный на рисунке 4 (линейный закон) [20].

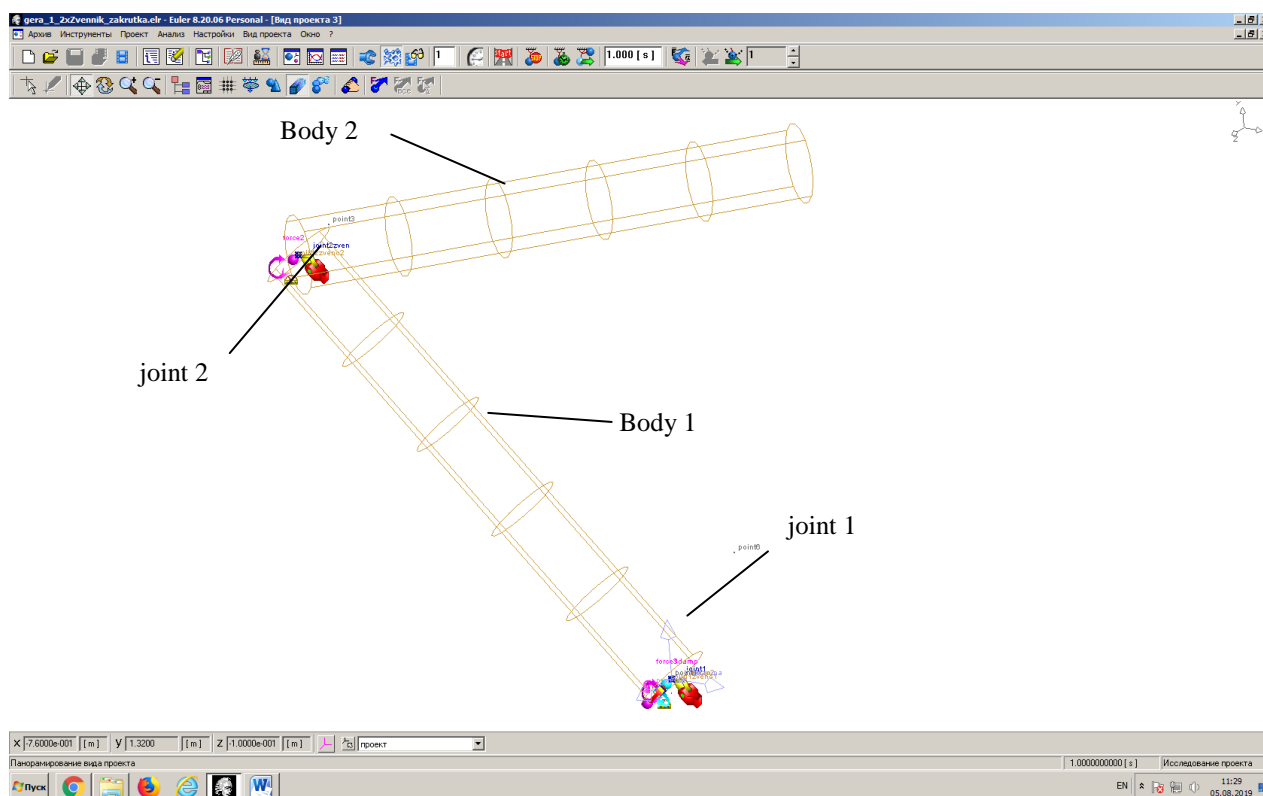


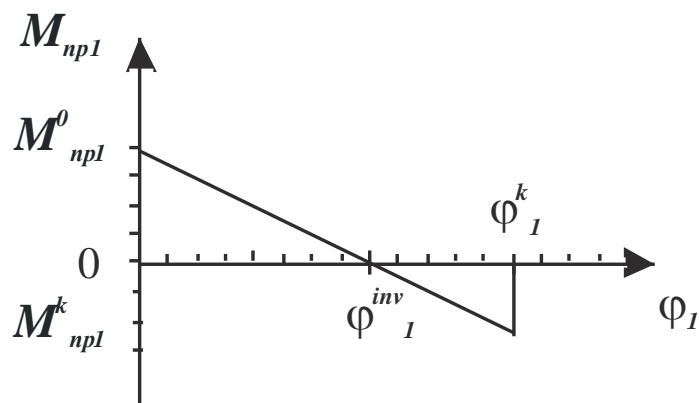
Рисунок 3. Визуализация динамической модели в программе EULER

Таблица 1

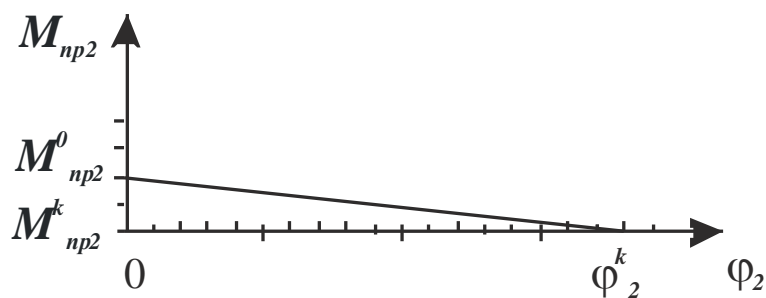
Значения параметров кинематической модели

Параметр	Обозначения	Значение
Длина звена 1 (корневого)	l_1 , м	1,4
Длина звена 2 (концевого)	l_2 , м	1,304
Масса звена 1 (корневого)	m_1 , кг	4,3
Масса звена 2 (концевого)	m_2 , кг	3,35
Сила тяжести на планете	g , м/с ²	3,72
Угол раскрытия звена 1	φ_1 , град	131/151
Угол раскрытия звена 2	φ_2 , град	180
Момент в 1-ом сочленении (начальный)	M_{np1}^0 , Н·м	23,24,25,26,27,

		28
Угол поворота 1-ого звена при котором происходит «инверсия» знака момента	φ^{inv}_2 , град	80
Момент во 2-ом сочленении (начальный)	M^0_{np2} , Н·м	9



а)



б)

Рисунок 4 Силовая характеристика в корневом (а) и концевом (б)

вращательных звеньях:

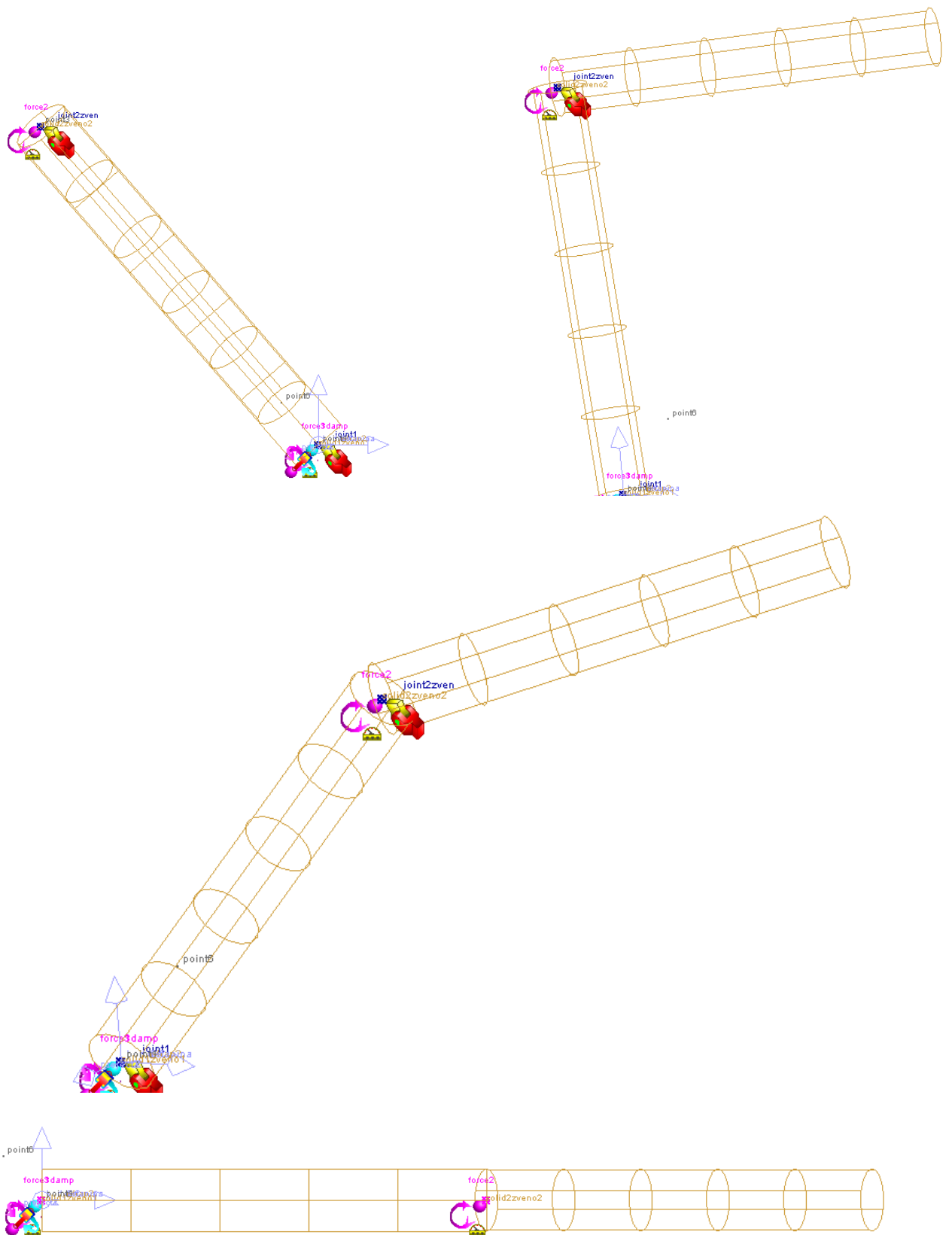


Рисунок 5. Визуализация этапов раскрытия трапа

Результаты моделирования раскрытия модели трапа

вариант	M_{np1}^0 , Н·м	φ_1 , град	M_{np2}^0 , Н·м	φ_2 , град	Численное моделирование методом Рунге-Кутты		Решение в программном комплексе EULER		
					Время спрямления	Время раскрытия	Время спрямления	Время раскрытия	Конечная угловая скорость, с ⁻¹
1	23	151	9	80	2,48	2,9	2,9	3,05	3,4
2	24				2,37	2,7	2,75	2,8	3,15
3	25				2,08	2,6	2,45	2,6	3,0
4	26				1,97	2,45	2,3	2,4	2,85
5	27				1,82	2,3	2,1	2,3	2,6
6	28				1,73	2,12	2,0	2,2	2,5
7	29				1,66	1,9	1,95	2,1	2,2
1	21	131	9	80	2,3	2,57	2,7	2,8	2,8
2	22				2,15	2,35	2,5	2,6	2,6
3	23				2,1	2,29	2,2	2,4	2,4
4	24				1,95	2,04	2,05	2,25	2,25
5	25				1,75	1,95	2,0	2,17	2,1
6	26				1,66	1,87	1,95	2,05	1,9
7	27				1,49	1,58	1,76	1,85	1,8

Результаты численного моделирования в сравнении с решением в программном комплексе EULER (см. табл.2) отличаются до 15%, что объясняется прежде всего тем, что выбор концептуальной модели механизма и формирования его кинематической модели проектирования является самостоятельной задачей. Кроме того, нелинейность порождает характерные особенности, такие как неоднородность динамических, упругих и скоростных свойств механизма и переменность параметров в нелинейных уравнениях. Данная особенность в некоторых положениях ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ – механизм вытянут в линию, либо φ кратно π – звенья сложены), способна приводить к потере управляемости.

Заключение

Представленные результаты численного моделирования системы нелинейных дифференциальных уравнений динамики двухзвенного трапа посадочной платформы десантного модуля и с использованием программного комплекса EULER достаточно хорошо согласуются качественно и количественно, что может позволить их применять для исследования динами трапов посадочной платформы в качестве инструмента определения рационального конструкторского решения на стадии эскизного проектирования.

Апробация разработанной модели и результатов моделирования проводилась в сравнении с результатами проектирования трансформируемых конструкций посадочной платформы космического аппарата «ЭКЗОМАРС» [21]. Количественное расхождение в пределах 5% вызвано смещением центров масс звеньев от срединного положения звена в сторону осей вращения. Качественное согласование

сравниваемых значений времени раскрытия звеньев свидетельствует об адекватности разработанной модели и её пригодности для применения при проектировании и определении облика и основных кинематических характеристик механизма трапа посадочной платформы десантного модуля межпланетной космической станции.

Библиографический список

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. – М.: Машиностроение, 2007. - 256 с.
2. Fu K.S. Learning Control Systems and Intelligent Control Systems: An Intersection of Artificial Intelligence and Automatic Control // IEEE Transactions on Automatic Control, 1971, vol. 16, issue 1, pp. 70 – 72. DOI: 10.1109/TAC.1971.1099633
3. Lagrange J.L. Analytical mechanics, Boston Studies in the Philosophy of Science, 2001, Springer, 640 p.
4. Jubien A., Gautier M., Janot A. Dynamic identification of the Kuka LWR robot using motor torques and joint torque sensors data // 19th IFAC World Congress, At Cape Town, 2014, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01079
5. Низаметдинов Ф.Р., Сорокин Ф.Д. Особенности применения вектора Эйлера для описания больших поворотов при моделировании элементов конструкций летательных аппаратов на примере стержневого конечного элемента // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=98753>
6. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. - М.: Мир, 1989. – 624 с.

7. Kane T., Dynamics, New York, Holt, Rinehart and Wiston, 1968, 310 p.
8. Choset H.M. et al. Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation, Cambridge, MIT press, 2005, 603 p.
9. Usoro P.B., Nadira R., Mahil S.S. A Finite Element Lagrange Approach to Modeling Light Weight Flexible Manipulators // ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1986, vol. 108, no. 3, pp. 198 – 205.
10. Герасимчук В.В. Построение динамической модели конструкции пространственного многозвенного механизма // Двойные технологии. 2019. № 2 (87). С. 44 - 48.
11. Леонтьев В.А., Смирнов А.С., Смольников Б.А. Динамический анализ двухзвенного манипулятора с неколлинеарными шарнирами // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 1(18). С. 56 - 60.
12. Jan Swevers, Walter Verdonck, Joris De Schutter. Dynamic model identification for industrial robots // IEEE Control Systems, 2007, vol. 27, issue 5, pp. 58 – 71. DOI: [10.1109/MCS.2007.904659](https://doi.org/10.1109/MCS.2007.904659)
13. Landau L.D., Lifshitz E.M. Mechanics. Course of Theoretical Physics. Vol. 1. Oxford and Boston, Butterworth-Heinemann, 1976, 224 p.
14. Ефанов В.В., Герасимчук В.В., Кузнецов Д.А., Митькин А.С., Телепнев П.П., Цыплаков А.Е. Моделирование механических возмущений привода остроуправленной антенны межпланетных станций // Полёт. 2017. № 8. С. 19 - 25.

15. Герасимчук В.В., Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П. К вопросу о повышении диссипативных характеристик конструкции космического аппарата // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 3. С. 103 - 110.
16. Вернигора Л.В., Казмерчук П.В. Оптимизация траекторий КА с малой тягой методом линеаризации // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105759>
17. Архангелов А.Г., Рулёв С.В., Ермаков В.Ю., Герасимчук В.В. Программа управления магнитожидкостной системой виброзащиты. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616337, 2018.
18. Maxime Gautier, Alexandre Janot, and Pierre-Olivier Vandanjon. A new closed-loop output error method for parameter identification of robot dynamics // IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, vol. 21(2), pp. 428 - 444.
19. Бойков В.Г., Юдаков А.А. Моделирование динамики твердых и упругих тел в программном комплексе EULER // Информационные технологии и вычислительные системы. 2011. № 1. С. 42 - 52.
20. Бойко С.О. Методология поднастройки положений элементов конструкции космического аппарата // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85702>
21. Горовцов В.В., Жиряков А.В., Телепнев П.П., Петров Ю.А., Берников А.С. Исследование динамики и решение задачи проектирования трансформируемых конструкций посадочного модуля КА «ЭКЗОМАРС» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 75 - 80.