

Бутырин С.А., Сомов Е.И., Макаров В.П.

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СЦЕПЛЕНИЯ
СВОБОДНОЛЕТАЮЩЕГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА
С ПАССИВНЫМ КОСМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ**

Введение

Исследование механического захвата пассивного спутника космическим роботом-манипулятором (КРМ) связано с весьма непростыми проблемами управления пространственной системой твердых тел с переменной конфигурацией и скачкообразным изменением состава при её движении в условиях космического полёта. В статье намеренно рассматривается упрощённая плоская задача с целью выяснения основных закономерностей при развёртывании звеньев манипулятора и его сцеплении с пассивным космическим объектом (ПКО), а также обоснования параметров в законах управления. Исполнительными органами системы управления движением свободнолетающего космического робота [1] являются двигательная установка (ДУ) на основе восьми реактивных двигателей, силовой гироскопический кластер (СГК) на основе четырёх гиродинов и редукторные приводы по степеням подвижности манипулятора.

1. Постановка задачи

Движение КРМ и ПКО происходит в плоскости $O_1x_1y_1$ инерциальной системы координат (ИСК) $O_1x_1y_1z_1$ (рис. 1). Механическая система представляется в виде единой кинематической цепи, для её описания используются уравнения Аппеля [2], [3], которые имеют алгоритмические преимущества при составлении моделей механических систем в виде открытых цепей взаимосвязанных твёрдых тел, что было давно замечено [4] и реализовано в компьютерной среде для проектирования манипуляционных роботов [5]. Кинематическая цепь содержит звенья, моделирующие корпус КРМ, манипулятор и ПКО. Введём вектор обобщённых координат $\mathbf{q} = \{q_i\}$, $i = 1 \div 9$, первые две из которых представляют вектор положения корпуса робота в ИСК $\mathbf{r} = \{r_x, r_y\}$, $q_1 = r_x$, $q_2 = r_y$ (точка O на рис. 1), а координата $q_3 = \phi$ определяет его угловое положение. Манипулятор закреплён на корпусе в точке O_m , положения его звеньев длиной l_i , $i = 1 \div 3$ определяются углами – обобщёнными координатами $q_4 = \phi_1$, $q_5 = \phi_2$ и $q_6 = \phi_3$ (рис. 1).

«буя» в схвате), которые составляют вектор состояния $\mathbf{q}^d = \{q_1^d, q_2^d, q_3^d\} \equiv \{q_7, q_8, q_9\}$ сцепления в схвате.

Исследуется задача сцепления при следующей последовательности операций КРМ:

- (i) на полуинтервале времени $t \in [t_i^m, t_f^m] \equiv [0, 200)$ с манипулятор с вектором состояния $\mathbf{q}^m = \{q_4, q_5, q_6\}$ приводится из конфигурации $\mathbf{q}_i^m = \{\pi, -\pi, 0\}$ в заданное положение $\mathbf{q}_f^m = \{\pi/4, -\pi/4, -\pi/4\}$, а положение КРМ стабилизируется ($\omega \equiv \dot{\phi} = 0$) с помощью ДУ и СГК, причём в их законах управления учитывается изменение как положения центра масс КРМ в ССК Охуз, так и момента инерции КРМ относительно его поперечной оси;
- (ii) при $t = t_f^m = 200$ с управление ДУ прекращается и выполняется сцепление точки В схвата манипулятора (рис. 1) с точкой А ПКО, который до захвата перемещался в ИСК с вектором скорости $\mathbf{v}_t = 5 \cdot \{-\sin(\pi/8), \cos(\pi/8)\}$ мм/с (в системе координат схвата вектор $\mathbf{v}_t = \{-4.33, 2.5\}$ мм/с) и угловой скоростью $\omega_t = -0,06$ град/с;
- (iii) $\forall t \in (200, 300]$ с при удерживании «буя» в схвате манипулятора выполняется угловая стабилизация созданной связки КРМ и ПКО в ИСК с помощью момента M^g СГК.

2. Математические модели и законы управления

В применяемой схеме моделирования механической системы в виде открытой цепи с векторами состояния $\mathbf{q} = \{q_s\}$ и обобщённых сил $\mathbf{Q} = \{Q_s\}$ уравнения Аппеля имеют вид $\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q}$, где матрица $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ и нелинейная векторная функция $\mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ вычисляются по рекуррентным аналитическим соотношениям. Алгоритмы управления ДУ с периодом T_u^e и СГК с периодом T_u представлены в [1]. Здесь они используются применительно к плоскому поступательно-вращательному движению КРМ.

При развёртывании звеньев манипулятора генерируются программные векторы $\mathbf{q}_p^m(t) \quad \forall t \in [t_i^m, t_f^m]$ в виде полиномов четвёртой степени с заданными краевыми условиями, что позволяет получить их производные $\dot{\mathbf{q}}_p^m(t), \ddot{\mathbf{q}}_p^m(t)$ по явным аналитическим соотношениям и вычислить обобщённые силы в шарнирах манипулятора

$$\mathbf{Q}^m = \tilde{\mathbf{A}}^*(\mathbf{q}^m)(\ddot{\mathbf{q}}_p^m + \mathbf{u}) + \mathbf{B}(\mathbf{q}^m, \dot{\mathbf{q}}_p^m). \quad (1)$$

Здесь при $\delta\mathbf{q} = \mathbf{q}^m - \mathbf{q}_p^m$ и $\delta\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}^m - \dot{\mathbf{q}}_p^m$ вектор стабилизирующего управления принимается в простейшем виде $\mathbf{u} = -(k_1\delta\mathbf{q} + k_2\delta\dot{\mathbf{q}})$ с коэффициентами k_1 и k_2 , матрица $\tilde{\mathbf{A}}^*(\mathbf{q}^m) = \tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q}^m) + \text{diag}(i_s^2 J_s^d)$, где i_s и J_s^d – передаточные числа редукторов и моменты инерции электродвигателей в соответствующих шарнирах. При $t = t_f^m = 200$ с редукторные приводы манипулятора блокируются ($\dot{\mathbf{q}}^m \equiv \mathbf{0}$) и кинематическая цепь манипулятора становится твёрдым телом, закреплённым на корпусе КРМ.

По условиям задачи при $t = t_f^m = 200$ с происходит также косой неупругий удар точки А «буя» ПКО и схвата манипулятора под углом $+15^\circ$ относительно отрицательного направления продольной оси третьего звена манипулятора, что описывается вектором состояния $\mathbf{q}^d = \{q_1^d, q_2^d, q_3^d\} = \{\delta x, \delta y, \delta \phi\}$ сцепления в схвате. Соответствующие обобщённые силы принимаются в виде двух сил и крутящего момента сухого трения:

$$Q_1^d \equiv P_{\delta x}^f = -P_{\delta x}^{fm} \text{sign}(\delta \dot{x}), \quad Q_2^d \equiv P_{\delta y}^f = -P_{\delta y}^{fm} \text{sign}(\delta \dot{y}), \quad Q_3^d \equiv M_{\delta \phi}^f = -M_{\delta \phi}^{fm} \text{sign}(\delta \dot{\phi}), \quad (2)$$

где $P_{\delta x}^{fm} = P_{\delta y}^{fm}$ и $M_{\delta \phi}^{fm}$ имеют заданные постоянные значения. Для исключения вычислительного "дребезга" при компьютерной имитации соответствующая обобщённая сила обнуляется, когда скорость \dot{q}_i^d по модулю становится меньше порогового значения.

3. Результаты компьютерной имитации

Точка O_m (рис. 1) крепления манипулятора в корпусе робота определена вектором $\mathbf{p}_m = \{1; 0,5\}$ м, значения моментов инерции двигателей и передаточных чисел редукторов приняты в виде $J_s^d = 10^{-3}$ кг м² и $i_s = 200$. Длины звеньев манипулятора: $l_1 = 2$ м, $l_2 = 1,5$ м, $l_3 = 0,5$ м; их массы: $m_1 = 50$ кг, $m_2 = 35$ кг, $m_3 = 15$ кг; собственные моменты инерции: $J_{z_1}^c = 25$ кг м², $J_{z_2}^c = 10$ кг м², $J_{z_3}^c = 0,5$ кг м². Масса манипулятора $m_m = \Sigma m_i = 100$ кг. Инерционные характеристики корпуса робота: масса $m_r = 900$ кг, собственный момент инерции $J_{rz}^c = 910$ кг м². Общая масса КРМ $m = m_r + m_m = 1000$ кг. Инерционные характеристики ПКО: масса $m_t = 6500$ кг, собственный момент инерции $J_{tz}^c = 9450$ кг м². Точка А задана вектором $\mathbf{r}^a = \{0,0\}$ м в плоскости $x_t O_t y_t$ системы координат, связанной с ПКО.

Максимальные значения сил и момента сухого трения при сцеплении схвата с точкой А «буя» ПКО: $P_{\delta x}^{fm} = P_{\delta y}^{fm} = 20$ Н и $M_{\delta \phi}^{fm} = 10$ Н м. Используемые периоды управления ДУ и СГК: $T_u^e = 2$ с и $T_u = 0,25$ с.

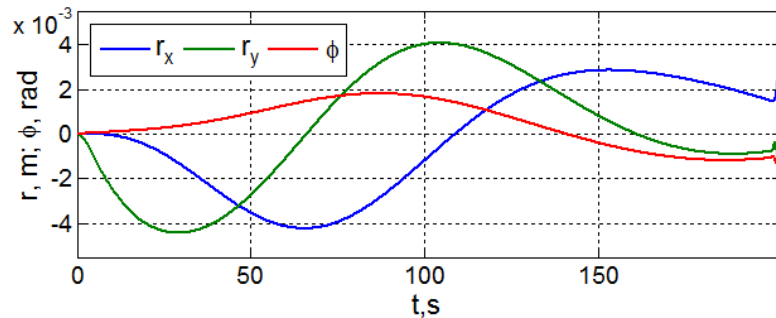


Рис. 2. Стабилизация положения корпуса КРМ при развёртывании манипулятора

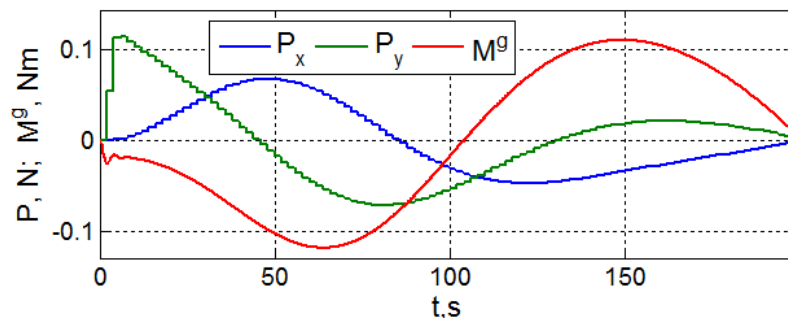


Рис. 3. Силы тяги ДУ и момент СГК при стабилизации положения корпуса КРМ

На рис. 2 приведены изменения координат положения r_x , r_y точки О (рис. 1) и угла ϕ поворота корпуса КРМ относительно этой точки при развёртывании манипулятора на полуинтервале времени $t \in [t_i^m, t_f^m) \equiv [0, 200)$ с. В этом процессе проявляются инерционные силы и моменты, обусловленные плавным, но неравномерным перемещением звеньев манипулятора, изменением как положения центра масс С КРМ, так и значения его момента инерции относительно поперечной оси.

Вариации сил P_x, P_y тяги ДУ и управляющего момента M^g СГК при стабилизации положения КРМ с его изменяемой конфигурацией представлены на рис. 3.

В момент времени $t = t_f^m = 200$ с происходит ударный контакт точки А «буя» и точки В схвата, (рис. 1, правый край рис. 2). Динамические процессы при ударном сцеплении КРМ с ПКО длительностью $\approx 0,35$ с по координатам проскальзывания ($\delta x, \delta y$)

и прокручивания ($\delta\phi$) «буя» в схвате представлены на рис. 4, а изменения сил $P_{\delta x}^f, P_{\delta y}^f$ и момента $M_{\delta\phi}^f$ сухого трения по этим координатам приведены на рис. 5.

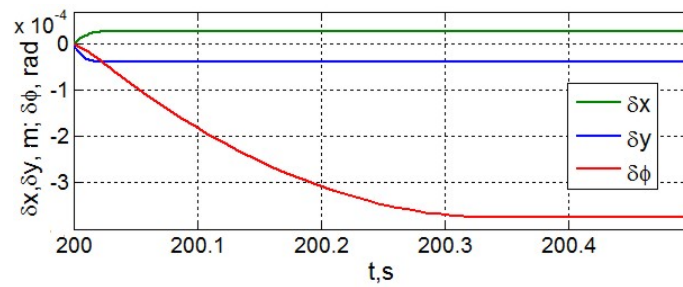


Рис. 4. Проскальзывание и прокручивание «буя» в схвате при сцеплении

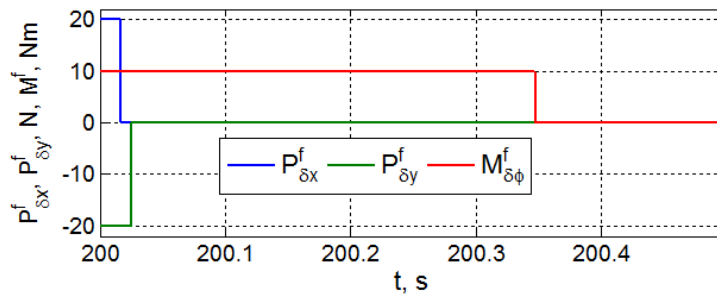


Рис. 5. Изменение сил и момента сухого трения в схвате при сцеплении

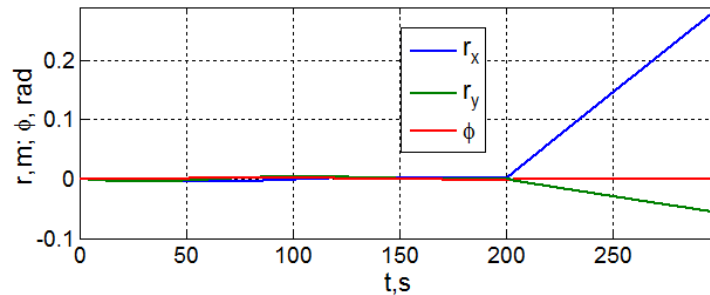


Рис. 6. Перемещения корпуса КРМ

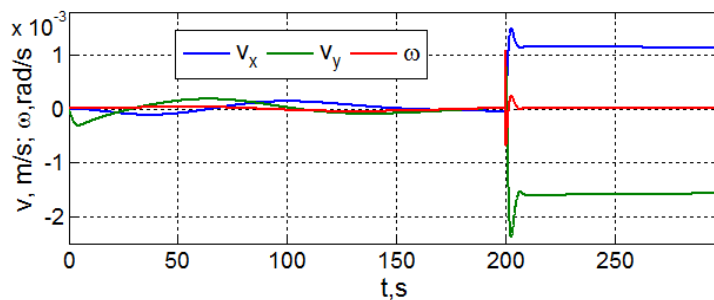


Рис. 7. Скорости перемещения корпуса КРМ

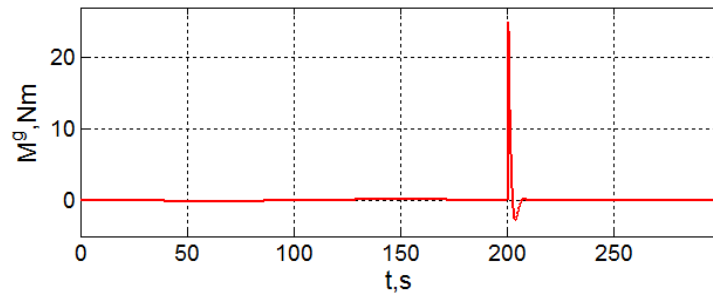


Рис. 8. Управляющий момент СГК

На рис. 6 – 8 приведены поступательно-вращательные перемещения корпуса КРМ, скорости этих перемещений и управляющий момент СГК на всём заданном интервале времени $t \in [0, 300]$ с.

Наконец, рис. 9 представляет на плоскости $x_1O_1y_1$ ИСК траектории перемещения точки А («буй», красный цвет) и точки В (схват, синий цвет) $\forall t \in [0, 200)$ с; точку S (зелёный цвет), которая возникает при совпадении точек А и В в момент времени $t = 200$ с, и траекторию перемещения этой точки $\forall t \in (200, 300]$ с.

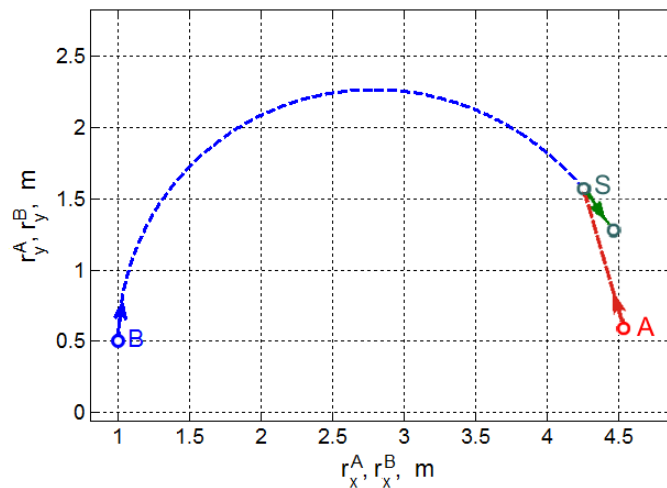


Рис. 9. Траектории перемещения точек А, В и S в плоскости $x_1O_1y_1$ ИСК

Заключение

Исследована плоская задача развёртывания трёхзвенного манипулятора в составе космического робота и механического захвата пассивного спутника.

Кратко представлены методы моделирования космического робота-манипулятора как управляемой механической системы в виде открытой цепи взаимосвязанных твёрдых тел с применением уравнений Аппеля, методы управления движением такого робота и результаты исследования нелинейной динамики его механического сцепления с пассивным космическим объектом.

Полученные результаты позволили выявить основные закономерности при развёртывании звеньев манипулятора и его сцеплении с пассивным спутником, а также обосновать стратегию применения исполнительных органов и основные параметры в контурах траекторного и углового управления движением робота.

В частности, установлена рациональность отключения двигательной установки на интервале времени длительностью до 30 секунд, когда выполняются собственно механический захват пассивного космического аппарата и успокоение углового движения жёсткой механической связки двух космических объектов. Это объясняется возникновением большого значения вектора, определяющего расположение центра масс механической связки объектов относительно точки O – начала связанной системы координат космического робота, в которой прикладывается суммарный вектор тяги его двигательной установки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-08-01708.

Библиографический список

1. Сомов Е.И. Наведение и управление пространственным движением космического робота при сближении и подготовке к механическому захвату пассивного спутника [Текст] / Е.И. Сомов, С.А. Бутырин, С.Е. Сомов, Т.Е. Сомова // Материалы конференции "Управление в аэрокосмических системах". Санкт-Петербург. 2018. С. 230-239.
2. Лурье А.И. Аналитическая механика [Текст] / А.И. Лурье. М.: Наука, Физматлит, 1961. 824 с.
3. Голубев Ю.Ф. Функция Аппеля в динамике систем твердых тел [Текст] / Ю.Ф. Голубев // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 58. 16 с.
4. Бутырин С.А., Елисеев С.В. Синтез управления многомерными механическими системами [Текст] / С.А. Бутырин, С.В. Елисеев // Управляемые механические системы. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1978. С. 65-76.
5. Елисеев С.В. Функциональные модули пакета прикладных программ для задач проектирования манипуляционных роботов [Текст] / С.В. Елисеев, С.А. Бутырин, А.А. Засядко // Пакеты прикладных программ. Методы и разработки. Новосибирск: Наука, 1981. С. 206-216.