

Динамика составного космического аппарата с подвижным устройством, прикрепленным с помощью гибких стержней

А.В. Дорошин¹, А.В. Ерёмченко¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе моделируется движение составного космического аппарата переменной конфигурации, связанной с наличием в его составе подвижного твёрдого тела, прикреплённого к телу-носителю посредством системы гибких стержней, обеспечивающих заданное относительное угловое положение. Изменение относительного положения подвижного тела приводит к геометрическому смещению центра масс системы, что позволяет создавать соответствующий момент сил (его плечо) от постоянной тяги реактивного двигателя, неподвижно закреплённого в теле-носителе. Указанное подвижное тело может представлять собой телескоп оптической системы зондирования, антенну, либо другой рабочий элемент космического аппарата. Таким образом, подвижное тело является не только функциональным агрегатом, но также используется в качестве актуатора системы управления угловым движением космического аппарата.

1. Введение

Задачи использования внутренних подвижных масс и агрегатов для управления динамикой космического аппарата (КА) остаются актуальными и привлекают интерес исследователей в области управления движением [1-5].

В развитие работы [2] в настоящей статье изучается движение КА изменяемой конфигурации, связанной с наличием в составе КА подвижного твёрдого тела, закреплённого посредством системы гибких стержней (рис.1). При отклонении подвижного оборудования относительно тела-носителя будет геометрически смещаться центр масс механической системы, что можно использовать для создания момента сил (его плеча) от постоянной реактивной тяги двигателя, неподвижно закреплённого в главном теле аппарата.

2. Механическая и математическая модели

Рассмотрим механическую модель составного космического аппарата состоящего и тела-носителя и подвижного устройства, прикреплённого к телу-носителю с помощью гибких стержней (рис.1): 1 – корпус КА (несущее тело), 2 – подвижное устройство, 3 – устройство реактивной тяги, 4 – гибкие стержни.

Будем использовать следующие системы координат:

- СXYZ – система координат, начало которой расположено в центре масс всей механической системы, а оси параллельны главным центральным осям инерции тела-корпуса КА;
- С₁X₁Y₁Z₁ – система координат, начало которой расположено в центре масс корпуса КА, а оси являются главными центральными осями инерции корпуса КА;
- С₂X₂Y₂Z₂ –система координат, связанная с главными центральными осями подвижного тела;
- С'X'Y'Z' – неподвижная (инерциальная) система координат.

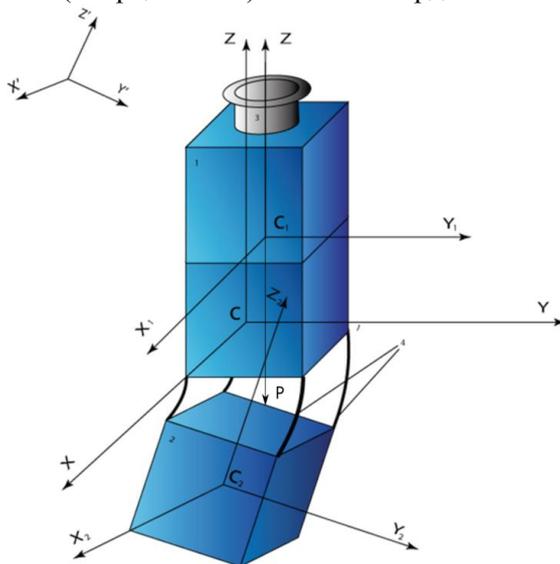


Рисунок 1. Составной космический аппарат.

Рассмотрим следующий алгоритм угловой переориентации КА при нулевом начальной величине угловой скорости:

1. Определение плоскости, в которой необходимо обеспечить изменение углового положения составного КА относительно неподвижной системы координат;
2. Определение угла поворота, на который нужно повернуть составной КА в выбранной плоскости, относительно неподвижной системы координат;
3. Определение величины и направления угла отклонения подвижного тела относительно корпуса, длительность действия реактивной тяги, время пассивного движения КА;
4. Отклонение подвижного оборудования на найденный угол для создания плеча для реактивной силы, включение и работа реактивной тяги с найденной продолжительностью во времени;
5. Отключение реактивной тяги и переход к пассивному движению КА и выполнение разворота подвижного оборудования относительно несущего тела в противоположную сторону;
6. Включение реактивной тяги в течении определённого времени действия, отклонение подвижного оборудования в первоначальное положение.

Математическая модель составного космического аппарата строится на основе теоремы об изменении кинетического момента [2]:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = \frac{d\tilde{\mathbf{K}}}{dt} + \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{K} = \mathbf{M}, \tag{1}$$

где \mathbf{K} – кинетический момент составного КА, $\boldsymbol{\omega}_1$ – угловая скорость корпуса КА, \mathbf{M} – момент внешних сил, действующих на КА.

Кинетический момент механической системы является суммой кинетического момента корпуса КА и кинетического момента подвижного тела (ПТ):

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \mathbf{K}_2), \tag{2}$$

где \mathbf{K}_1 – кинетический момент корпуса КА, \mathbf{K}_2 – кинетический момент ПТ, σ_1 – матрица перехода в систему координат $C_1X_1Y_1Z_1$ из системы координат $C_2X_2Y_2Z_2$.
 Закон управления углом относительного положения ПТ выберем в следующем кусочно-непрерывном виде:

$$\beta_2 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq t \leq t_1 : \quad 0 \\ t_1 \leq t \leq t_2 : \quad c(t-t_1) \\ t_2 \leq t \leq t_3 : \quad ct_r \\ t_3 \leq t \leq t_4 : \quad t_r c - 2c(t-t_3)t_r / t_p \\ t_4 \leq t \leq t_5 : \quad -ct_r \\ t_5 \leq t \leq t_6 : \quad -c(t_r + t - t_5) \\ t \leq t_6 : \quad 0 \end{array} \right\}, \tag{3}$$

где t_i – моменты переключения закона управления углом относительного положения ПТ, c – коэффициент усиления, t_r – время действия реактивной силы, t_p – время пассивного движения составного КА.

Закон управления моментом реактивной тяги имеет вид:

$$P = \left\{ \begin{array}{l} 0 < t < t_2 : \quad 0 \\ t_2 < t < t_3 : \quad c_p \\ t_3 < t < t_4 : \quad 0 \\ t_4 < t < t_5 : \quad c_p \\ t > t_5 : \quad 0 \end{array} \right\} \tag{4}$$

где c_p – значение силы реактивной тяги.

3. Результаты численного моделирования

Для моделирования были приняты следующие начальные условия движения и параметры КА: $M_1=10$ [кг], $M_2=5$ [кг]; моменты инерции КА: $A_1=B_1=4$ [кг*м²], $C_1=2$ [кг*м²]; моменты инерции ПУ: $A_2=B_2=2$ [кг*м²], $C_2=1$ [кг*м²]; начальные значения угловых скоростей корпуса КА: $p=q=r=0$ [рад/с]; начальные значения угла поворота корпуса: $V=0$ [рад]; начальные значения углов отклонения ПТ: $\beta=0$ [рад]; сила тяги $P=1$ [Н]; $t_1=1$ [с], $t_r=2$ [с], $t_p=9$ [с], время интегрирования 10[с].

Результаты моделирования приведены на рисунках (2-7).

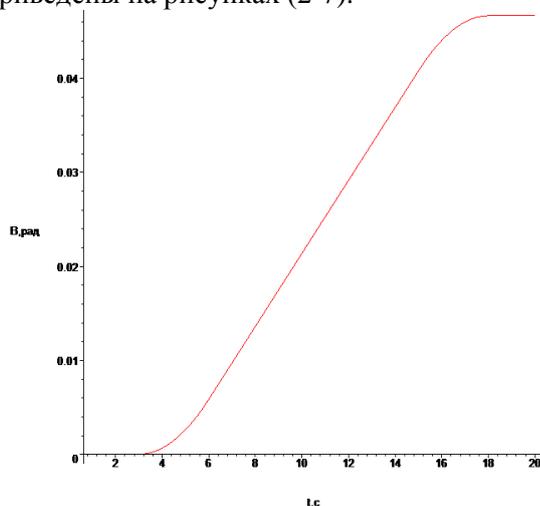


Рисунок 2. Зависимость угла поворота корпуса КА от времени.

Как видно из графика угла отклонения корпуса относительно неподвижной системы координат (рисунок 2), выбранный закон управления может быть использован для поворота КА относительно выбранной оси на заданный угол, используя кратковременную реактивную тягу в постоянном направлении относительно тела-корпуса. Значение угла поворота корпуса в инерциальном пространстве зависит от следующих параметров: сила реактивной тяги, длительность реактивной тяги, величина отклонения подвижного оборудования относительно несущего тела, время пассивного движения КА.

4. Литература

- [1] Doroshin, A.V. Attitude Dynamics of Spacecraft with Control by Relocatable Internal Position of Mass Center / A.V. Doroshin // Lecture Notes in Engineering and Computer Science. – 2017. – Vol. 2227. – P. 231-235.
- [2] Алексеев, А.В. Динамика составного космического аппарата с подвижным устройством в трёхосном кардановом подвесе / А.В. Алексеев, А.В. Дорошин, А.В. Ерёмченко, М.М. Крикунов, М.О. Недовесов // Труды МАИ. – 2018. – № 98.
- [3] Li, J. A survey on moving mass control technology / J. Li, Ch. Gao, Ch. Li, W. Jing // Aerospace Science and Technology. – 2018. – Vol. 82. – P. 594-606
- [4] Doroshin, A.V. Initiations of chaotic regimes of attitude dynamics of multi-spin spacecraft and gyrostatt-satellites basing on multiscroll strange chaotic attractors / A.V. Doroshin // SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys), London, United Kingdom, 2015. – P. 698-704.
- [5] Schiehlen, W. Research trends in multibody system dynamics / W. Schiehlen // Multibody System Dynamics. – 2007. – Vol. 18(1). – P. 3-13.

Благодарности

Работа поддержана Мионбнауки в рамках проектной части государственного задания (№9.1616.2017/ПЧ).

Dynamics of a composite spacecraft with a movable device attached with flexible rods

A. Doroshin¹, A. Eryomenko¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. This paper simulates the motion of a composite spacecraft with a variable configuration associated with the presence of an additional rigid body attached to the carrier body using flexible rods. The additional solid is a mobile device capable of performing various technical tasks. A mobile device can be represented as a communication antenna, optical system, or a working element of a remote sensing system. A mathematical model of the motion of a system is built on the basis of a theorem on the change in the kinetic moment.