

Дорошин А.В., Ерёменко А.В.

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОСТОЯННЫМ ВЕКТОРОМ ТЯГИ
С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ
ПОДВИЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Введение

Задачи использования внутренних подвижных масс и агрегатов для управления динамикой космических аппаратов (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 внутри базового тела-носителя дополнительного подвижного твердого тела, закрепленного, например, в кардановом подвесе. При отклонении подвижного оборудования (ПО) 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 закрепленного в главном теле аппарата.

Механическая и математическая модели

В целях записи математической модели и дальнейшего исследования динамики КА вводятся следующие системы координат (рис.1):

- $C_{KA}X_{KA}Y_{KA}Z_{KA}$ – система координат, начало которой совпадает с центром масс составного КА и оси которой остаются параллельными главным центральным осям инерции корпуса (несущего тела);
- $C_A X_A Y_A Z_A$ – система координат, начало которой совпадает с центром масс несущего тела, а оси являются главными центральными осями инерции несущего тела;
- $O_K X_K Y_K Z_K$ – система координат, начало которой совпадает с неподвижной точкой карданова подвеса, оси которой остаются параллельными осям главными центральными осями инерции несущего тела;
- $C_t X_t Y_t Z_t$ – система координат, начало которой совпадает с центром масс подвижного устройства, а оси являются главными центральными осями инерции подвижного оборудования.

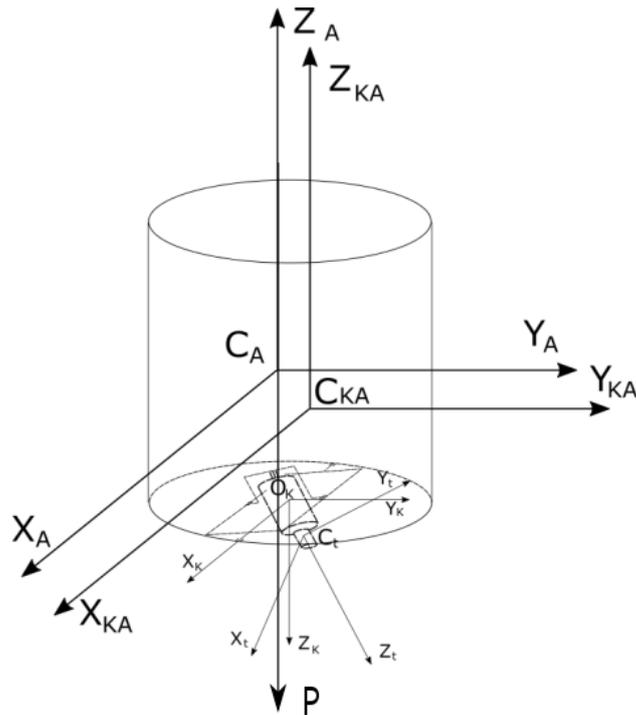


Рис. 1. Структура КА с внутренними степенями свободы: 1 – корпус КА (несущее тело), тело 2 – подвижное устройство в кардановом подвесе, P – вектор силы тяги

Рассмотрим движение составного КА в системе координат $C_{KA}X_{KA}Y_{KA}Z_{KA}$, которую будем именовать основной. Для нахождения динамических уравнений, описывающих угловое движение корпуса КА, запишем теорему об изменении кинетического момента:

$$\left(\frac{d\tilde{\mathbf{K}}_1}{dt} + \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{K}_1 \right) + \mathbf{A}_1 \left(\frac{d\tilde{\mathbf{K}}_2}{dt} + \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{K}_2 \right) = \mathbf{M}_c^e, \quad (1)$$

где \mathbf{K}_1 – кинетический момент корпуса КА, $\boldsymbol{\omega}_1$ – вектор угловой скорости корпуса КА, \mathbf{K}_2 – кинетический момент подвижного устройства, $\boldsymbol{\omega}_2$ – вектор угловой скорости подвижного устройства, \mathbf{M}_c^e – вектор моментов внешних возмущающих сил.

Пусть подвижное оборудование совершает относительное движение в одной плоскости, а начальные значения угловых скоростей КА равны нулю. В этом случае изменение положения подвижного оборудования будет обеспечивать плоское движение КА. Уравнение (1) в осях, связанных с несущим телом, в исследуемом плоском случае движения примут вид:

$$a_1 \dot{q} + b_1 \ddot{\beta} + c_1 \dot{\beta} = M_q, \quad (2)$$

где q – компонент угловой скорости корпуса КА, β – угол отклонения подвижного оборудования, a_1, b_1, c_1 – функциональные коэффициенты, зависящие от инерционно-

массовых характеристик механической системы, M_q – проекция момента сил, действующих на КА.

Выберем закон управления углом отклонения подвижного оборудования в следующем виде:

$$\beta = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_1, & 0 \\ c(t-t_1), & t_1 \leq t \leq t_2, & c(t-t_1) \\ ct_r, & t_2 \leq t \leq t_3, & ct_r \\ t_r c - 2c(t-t_3)t_r / t_p, & t_3 \leq t \leq t_4, & t_r c - 2c(t-t_3)t_r / t_p, \\ -ct_r, & t_4 \leq t \leq t_5, & -ct_r \\ -c(t_r + t - t_5), & t_5 \leq t \leq t_6, & -c(t_r + t - t_5) \\ 0, & t \leq t_6, & 0 \end{cases} \quad (3)$$

где t_i – участки переключения закона управления углом относительного положения ПУ, c – коэффициент усиления (относительная угловая скорость ПО), t_r – время действия реактивной силы, t_p – время пассивного движения составного КА.

Исходя из вида закона управления (3), можно упростить уравнение (2), т.к. вторая производная угла отклонения подвижного оборудования будет равна нулю:

$$a_1 \dot{q} + c_1 \dot{\beta} = M_q. \quad (4)$$

Момент силы тяги при отклонении подвижного оборудования будет равен:

$$M_q = PC, \quad (5)$$

где P – реактивная сила тяги, C – радиус-вектор центра масс тела-носителя в системе координат, связанной с центром масс всей механической системы, зависящий от угла отклонения подвижного устройства.

Кинематическое уравнение в рассматриваемом случае имеет вид:

$$q = \dot{B}, \quad (6)$$

где B – угол отклонения тела-носителя относительно неподвижной системы координат.

Результаты численного моделирования

При проведении численного моделирования принимались следующие начальные условия и параметры составного 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 всей механической системы: $B=0$ [рад]; начальные значения углов отклонения

подвижного устройства $\beta=0$ [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).

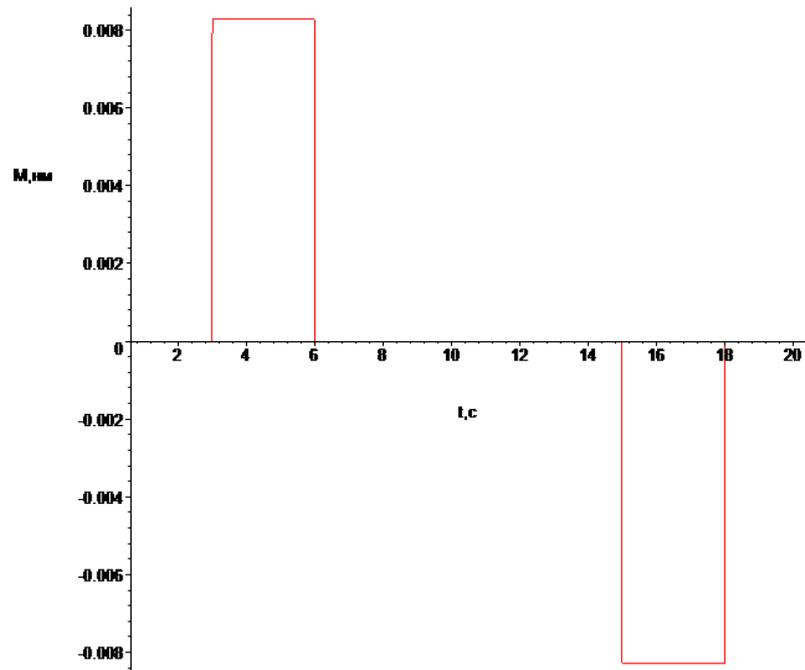


Рис. 2. Зависимость реактивного момента от времени

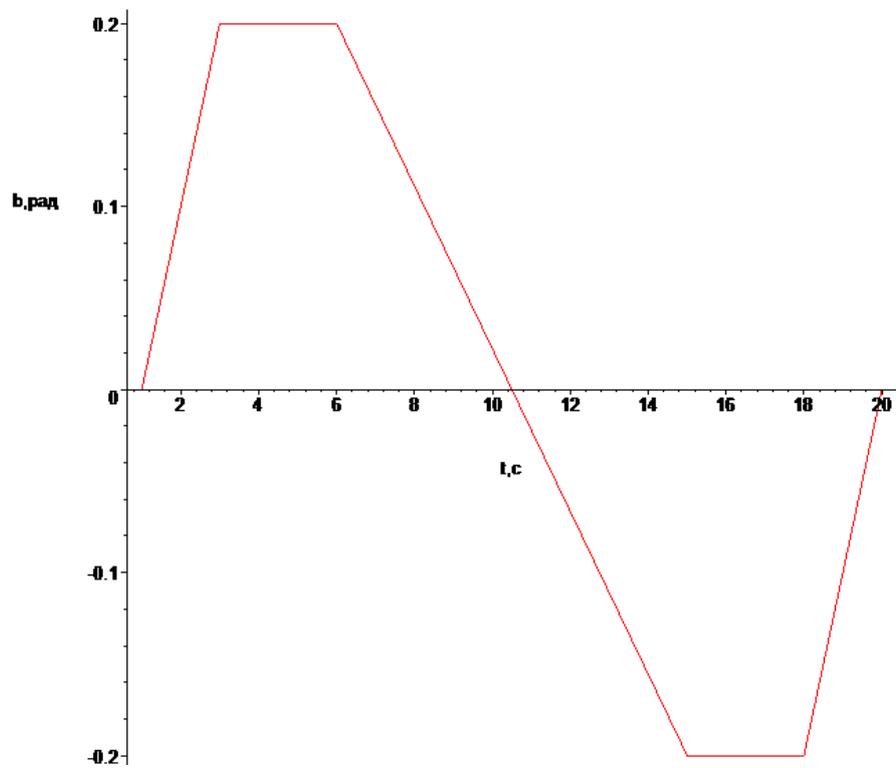


Рис. 3. Зависимость угла β подвижного оборудования от времени

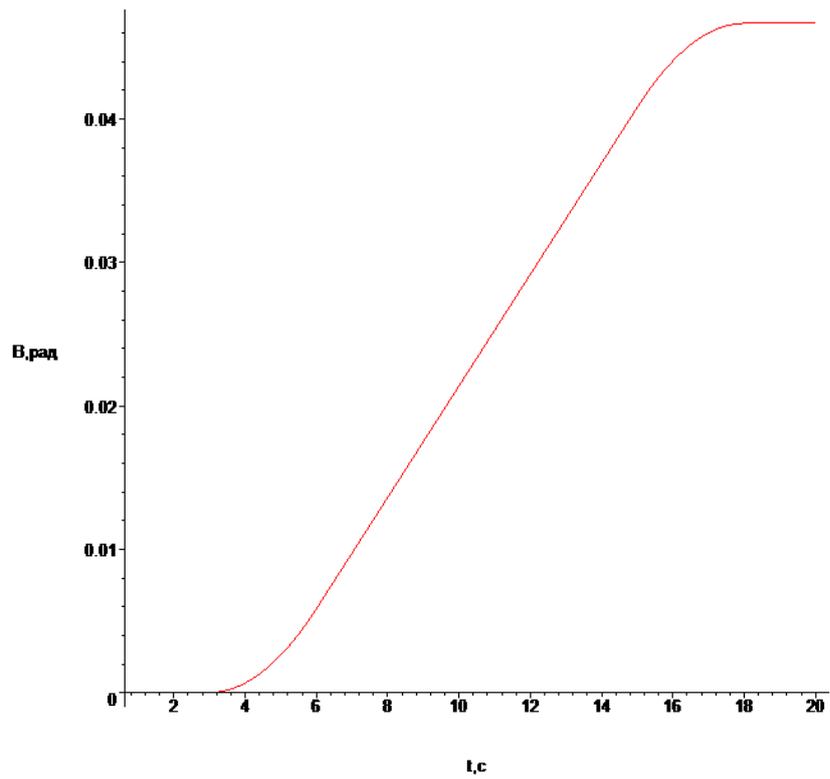


Рис. 4. Зависимость угла B корпуса КА от времени

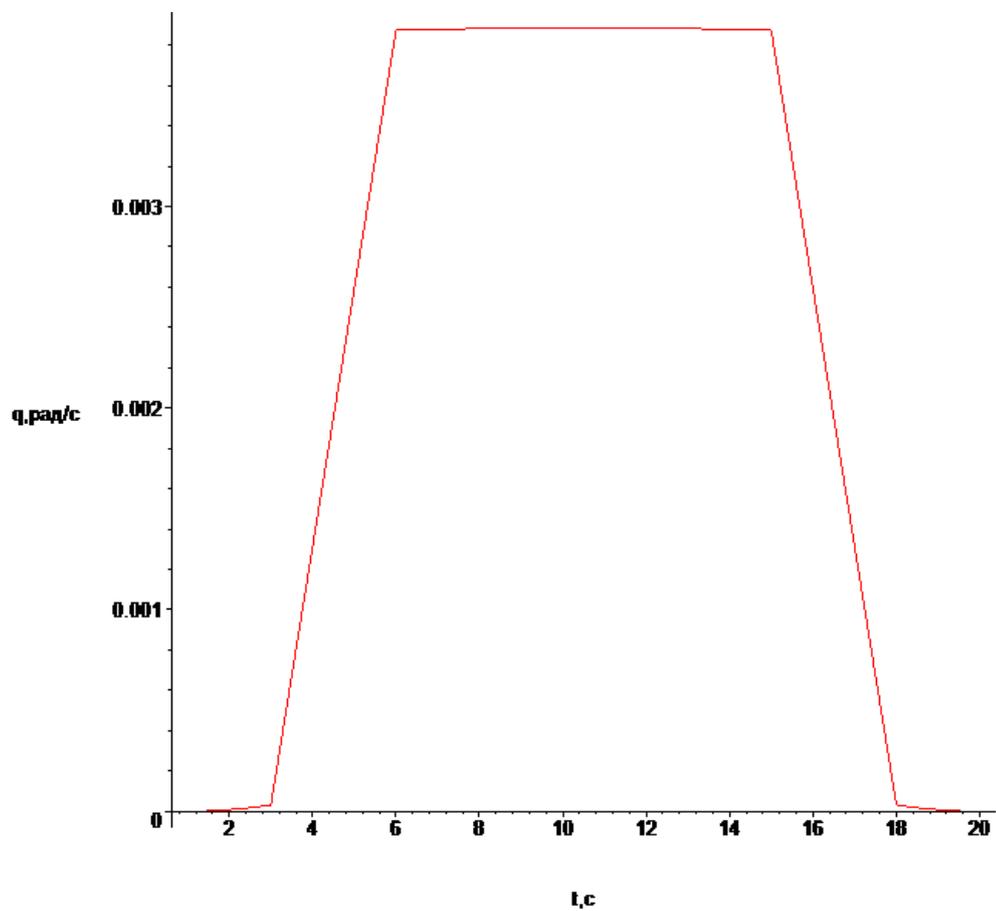


Рис. 5. Зависимость угловой скорости КА от времени

Заключение

Как видно из графика угла отклонения корпуса относительно неподвижной системы координат (рис. 4), выбранный закон управления может быть использован для поворота КА относительно выбранной оси на заданный угол при использовании кратковременной реактивной тяги 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.

Библиографический список

1. Anton V. Doroshin, Attitude Dynamics of Spacecraft with Control by Relocatable Internal Position of Mass Center (2017) Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Volume 2227, 2017, Pages 231-235. (IMECS 2017; Hong Kong)
2. Алексеев А.В., Дорошин А.В., Ерёмченко А.В., Крикунов М.М., Недовесов М.О. Динамика составного космического аппарата с подвижным устройством в трёхосном кардановом подвесе// Труды МАИ. 2018. № 98.
3. Jianqing Li, Changsheng Gao, Chaoyong Li , Wuxing Jing A survey on moving mass control technology // Aerospace Science and Technology 82–83 (2018) 594–606
4. Doroshin A.V., Initiations of chaotic regimes of attitude dynamics of multi-spin spacecraft and gyrostat-satellites basing on multiscroll strange chaotic attractors, SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys), London, United Kingdom (2015), IEEE, pp. 698 – 704.
5. Schiehlen W. Research trends in multibody system dynamics // Multibody System Dynamics, 2007, vol. 18, no. 1, pp. 3 - 13.