

ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА НА УРОВЕНЬ МИКРОУСКОРЕНИЙ НА БОРТУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КА И СПОСОБ ЕГО УМЕНЬШЕНИЯ

Бобин Д.Г., Литвинов В.В.

В настоящее время для проведения технологических экспериментов в космических условиях применяются КА «Фотон» и «Бион», преимуществом которых является низкий уровень микрогравитации на борту, что обеспечивается специальной конструкцией. Однако эта конструкция не исключает влияния аэродинамического и гравитационного моментов. В этой статье рассмотрим вклад этих составляющих в общий уровень микроускорений.

Гравитационный момент можно определить из следующего выражения /1/:

$$M_{\Gamma} = \frac{3\mu}{r^3} \bar{e}_r \times J \bar{e}_r,$$

где μ - гравитационный параметр Земли, $\mu = fM_3$ (f - гравитационная постоянная, M_3 - масса Земли); e_r - орт радиус-вектора r ; J - матрица моментов инерции

$$J = \begin{vmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{vmatrix}.$$

Для главного вектора и момента действующих аэродинамических сил справедливы формулы /2/:

$$\bar{F}_a = -\rho S |\bar{V}| \bar{V}, \quad \bar{M}_a = -\rho |\bar{V}| (\bar{D}_0 \times \bar{V}),$$

где ρ и \bar{V} плотность и скорость набегающего потока; S и D_0 - площадь и первый момент геометрической фигуры, которая является проекцией оболочки спутника на плоскость, перпендикулярную \bar{V} .

Первый момент \bar{D}_0 вычисляется как произведение

$$\bar{D}_0 = S \bar{r}_{ц.д.},$$

где $\bar{r}_{ц.д.}$ - радиус-вектор центра давления.

Обычно центр давления не совпадает с центром масс, образуется плечо силы \bar{F} и появляется закручивающий аэродинамический момент. Про моделируем его воздействие. Для этого нам потребуются формулы для высоты спутника h , расстояния центра масс спутника от центра Земли R и компонент его скорости относительно поверхности Земли в орбитальной системе координат V_i . Они записываются следующим образом /2/:

$$R = a(1 - e \cdot \cos E), h = R - R_3, V_1 = \sqrt{\frac{\mu(1 - e^2)}{a}} \frac{1}{1 - e \cdot \cos E} - \omega R \cos i,$$

$$V_2 = \omega R \sin i \cos u, V_3 = \sqrt{\frac{\mu}{a}} \frac{e \cdot \sin E}{1 - e \cdot \cos E}.$$

Здесь a , i и e – большая полуось, наклонение и эксцентриситет орбиты, R_3 и ω – радиус Земли и угловая скорость собственного вращения, μ – гравитационный параметр Земли, E – эксцентрическая аномалия, которая удовлетворяет выражению

$$E - e \cdot \sin E = \frac{2\pi}{T}(t - t_n),$$

(T – период обращения КА; t и t_n – текущее время и один из моментов прохождения перигея), a и u – аргумент широты:

$$u = w + v,$$

где v – истинная аномалия, w – аргумент перигея. Истинную аномалию можно легко найти, зная эксцентриситет и эксцентрическую аномалию:

$$\sin v = \frac{\sin E}{1 - e \cdot \cos E} \sqrt{1 - e^2}, \quad \cos v = \frac{\cos E - e}{1 - e \cdot \cos E}.$$

Для нахождения параметров вращательного движения КА также необходимо добавить динамическое уравнение Эйлера:

$$\dot{\vec{K}} + \vec{\omega} \times \vec{K} = \vec{M},$$

где \vec{K} – вектор кинематического момента спутника, M – внешний момент, в нашем случае состоящий из аэродинамического M_a , гравитационного M_g и управляющего M_y моментов.

Последней составляющей является система кинематических уравнений /3/:

$$\dot{a}_{1i} = \omega_3 a_{2i} - \omega_2 a_{3i}, \quad \dot{a}_{2i} = \omega_1 a_{3i} - \omega_3 a_{1i}, \quad \dot{a}_{3i} = \omega_2 a_{1i} - \omega_1 a_{2i}.$$

В этой системе a_{ij} – элемент матрицы перехода от орбитальной $Ox_1x_2x_3$ к связанной $Ox_1x_2x_3$ системе координат, ω_i – компоненты вектора угловой скорости вращения в связанной системе координат.

На основании этих формул проведем исследование поведения КА. Параметры орбиты для КА «Фотон-12» $i=62.8^\circ$, $a=6688140$ м, $e=0,01256$, $w=30^\circ$. КА представим в виде эллипсоида вращения с полуосями $b_1=6$ м, $b_2=2$ м, $b_3=2$ м и моментами инерции $I_1=2400$ кг·м², $I_2=10800$ кг·м², $I_3=10000$ кг·м². Параметры атмосферы возьмем из /4/. Радиус-вектор центра давления для расчетов примем $\vec{r}_{цд} = [0.02 \quad 0.02 \quad 0]$. Результат моделирования поведения КА в течение первых 5 суток под действием гравитационного и аэродинамического моментов представлен на рис. 1.

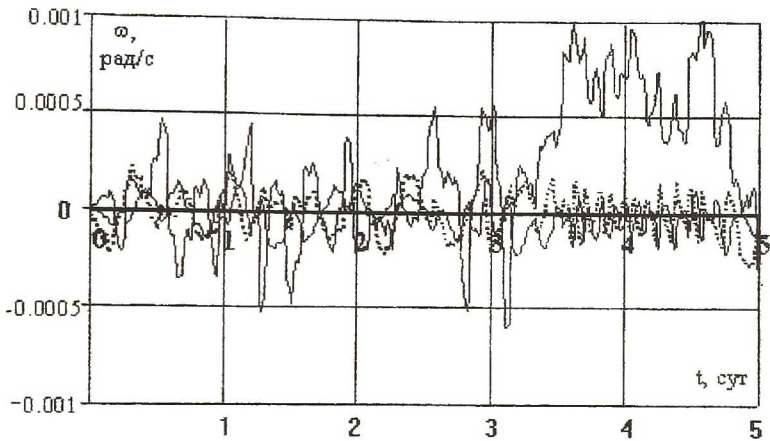


Рисунок 1

Из этого рисунка легко видеть, что величина угловой скорости достаточно большая, что влечет за собой недопустимо большой уровень микроускорений на борту КА. Результаты расчетов подтверждаются исследованиями, проводимыми на КА «Фотон-12», в ходе которых обнаружилось, что аппарат вращался с постоянно увеличивающейся угловой скоростью. К концу срока существования на орбите она достигла величины 1 градус/с [5].

Для решения этой проблемы предлагается использовать устройство, основанное на взаимодействии исполнительных органов системы компенсации с магнитным полем Земли. Исполнительными органами являются токонесущие контура, расположенные на внешней поверхности аппарата. Подавая токи в контура, можно создавать управляющие моменты, которые будут гасить угловые ускорения и демпфировать угловую скорость вращения.

Но токи в контурах создают собственное магнитное поле, которое также может негативно влиять на ход технологических процессов. Для удержания угловой скорости в необходимых пределах могут потребоваться токи до 3 А, а они уже создают возле обшивки поле того же порядка, что и поле Земли. Для его экранирования предлагается под проводники сделать пластину из материала с высокой магнитной проницаемостью. Пластина толщиной в доли миллиметра дает снижение поля в несколько раз.

Еще одна функция этой пластины – это увеличение магнитного момента токового контура. При использовании ферромагнитного кольца общий момент системы увеличивается.

$$M = M_{\kappa} + M_{\text{ф.к}},$$

$$M = \mu_0 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H_{\text{вн}} (I_0 + I_1 \cdot \mu),$$

где μ - магнитная проницаемость ферромагнитного материала, R - диаметр контура.

Необходимо вычислить I_1 . Его можно найти, зная поток Φ и индуктивность L нашей т.н. ферромагнитной катушки:

$$I_1 = \frac{\Phi}{L}$$

Поток Φ вычисляется по формуле:

$$\Phi = \mu_0 \frac{H_z(R_2) + H_z(R_1)}{2} \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2)$$

Индуктивность нашей ферромагнитной катушки вычисляется по формуле:

$$L = d \cdot \mu_0 \cdot R \left(\ln 8 \frac{R}{r_{\text{пр}}} - 1.75 \right),$$

где $r_{\text{пр}}$ - радиус сечения проводника, d - высота ферромагнитного кольца, R_1 и R_2 - его внутренний и внешний радиусы, R - радиус токонесящего контура.

Исходя из расчетов, пластина из материала, имеющего $\mu=15000$, толщиной в 1 мм позволяет увеличить момент в 1.2 раза

Список использованных источников

1. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1975. - 248 с.
2. Отчет о НИР «Разработка теоретических и экспериментальных методов определения на борту КА микро- и виброускорений». Москва. Институт проблем механики РАН, 1996.
3. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела.- М.: Наука, 1973. - 320 с.
4. Модель верхней атмосферы для баллистических расчетов. ГОСТ 22721-77. М.: Изд-во стандартов, 1978.
5. В.И. Абрашкин, В.Л. Балакин, И.В. Белоконов, К.Е. Воронов, В.В. Иванов, А.С. Зайцев, А.Е. Казакова, В.В. Сазонов, Н.Д. Семкин. Определение вращательного движения спутника «Фотон-12» по данным бортовых измерений магнитного поля Земли. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2000 г., №60.

УДК 533.77

РАСЧЁТ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЕМКОСТЕЙ УСКОРЯЮЩЕГО ТРАКТА УСКОРИТЕЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Пняков А.В.

Для расчёта искажений выходного напряжения усилителя высоковольтной пачки импульсов необходимо определить его эквивалентную