

Бобин Д.Г., Семкин Н.Д.

## ВОЗМОЖНЫЙ ПОДХОД К СНИЖЕНИЮ УРОВНЯ МИКРОУСКОРЕНИЙ НА БОРТУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Перспективные космические эксперименты, включающие в себя получение новых материалов и лекарств; выращивание монокристаллов; исследование диффузных, электрофоретических процессов, в значительной степени зависят от параметров окружающей среды. Наибольшее влияние на технологические процессы оказывают микроускорения, действующие на борту космического аппарата (КА). Поэтому важной задачей является изучение причин их появления и возможностей уменьшения микроускорений.

В настоящее время технологические эксперименты проводятся на борту КА "Фотон", преимуществом которого является низкий уровень микрогравитации, что обеспечивается специальной конструкцией. Однако, в ходе обработки данных измерений аппаратуры "Мираж", осуществлявшей мониторинг магнитного поля Земли на борту КА «Фотон-12», было обнаружено, что КА вращался с постоянно увеличивающейся угловой скоростью. К концу срока существования движение аппарата было близко к регулярной прецессии Эйлера с угловой скоростью порядка 1 градус/с [1]. Это привело к появлению недопустимо высокого уровня центробежного ускорения.

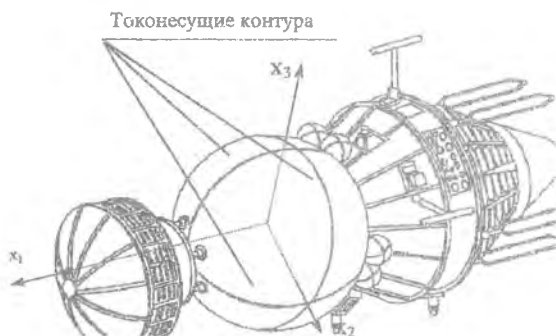


Рис. 1

В данной работе предлагается магнитная система компенсации вращательных микроускорений, основанная на взаимодействии исполнительных органов системы компенсации с магнитным полем Земли. Исполнительными органами являются токонесущие контура, расположенные на внешней поверхности аппарата (рис. 1). Подавая токи в контура, можно создавать управляющие моменты, которые будут гасить угловые ускорения и демпфировать угловую скорость вращения.

Поясним принципы работы системы. Вращательный магнитный момент (управляющий момент), действующий на контур в магнитном поле, равен [2]

$$\vec{M}_{\text{упр}} = \vec{L} \times \vec{B}, \quad (1)$$

где  $\vec{B}$  - вектор индукции магнитного поля Земли,  $\vec{L} = IS\vec{n}$  - дипольный магнитный момент,  $S$  - площадь контура;  $I$  - ток, протекающий по контуру;  $\vec{n}$  - нормаль контура, направление которой связано с направлением тока в контуре правилом правого винта.

Примем, что управляющий момент формируется по пропорциональному закону  $\vec{M}_{\text{упр}} = k\vec{\omega}$ , где  $k$  - коэффициент пропорциональности. С учетом этого решением уравнения (1) будет:

$$\vec{L} = k \frac{\vec{\omega} \times \vec{B}}{B^2}. \quad (2)$$

Вектор  $\vec{B}$  измеряется с помощью трехкомпонентного феррозондового датчика. Определить вектор угловой скорости аппарата также можно на основе измерения величины магнитного поля. Значение  $\vec{L}$  на основе этих данных находятся следующим образом [2]:

$$\vec{L} = \frac{k}{B^2} \left( \frac{\vec{B}(\vec{B} \cdot \vec{B})}{B^2} - \vec{B} \right). \quad (3)$$

Таким образом, зная данные, поступающие с феррозондовых датчиков, можно из (3) найти вектор дипольного момента, необходимый для уменьшения угловой скорости вращения, и, следовательно, найти необходимые для этого токи. При этом, поскольку токи невозможно увеличивать до бесконечности, их величину ограничим значением  $I_{\text{max}}$ . Следовательно, реальный закон изменения токов в контурах будет иметь вид:

$$I_i = \begin{cases} \frac{L_i}{S} & \text{при } \left| \frac{L_i}{S} \right| < I_{\text{max}}, \\ I_{\text{max}} \frac{L_i}{|L_i|} & \text{при } \left| \frac{L_i}{S} \right| \geq I_{\text{max}}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $i=x, y, z$ .

Рассмотрим результаты моделирования работы системы.

Движение твердого тела вокруг центра масс под действием моментов внешних сил описывается динамическими уравнениями Эйлера [3]:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \dot{\omega}_1 + (J_2 - J_3) \omega_2 \omega_3 &= M_1 \\ J_2 \dot{\omega}_2 + (J_3 - J_1) \omega_3 \omega_1 &= M_2 \\ J_3 \dot{\omega}_3 + (J_1 - J_2) \omega_1 \omega_2 &= M_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из возмущающих моментов будем учитывать только гравитационный и аэродинамический. Гравитационный момент можно определить выражением [2]:

$$M_i = \frac{3\mu}{r^3} \bar{e}_i \times J \bar{e}_i, \quad (6)$$

где  $\mu$  - гравитационный параметр Земли;  $\mu = \Gamma M_3$  ( $\Gamma$  - гравитационная постоянная,  $M_3$  - масса

Земли);  $\bar{e}_i$  - орт радиус-вектора  $r$ ;  $J$  - матрица моментов инерции  $J = \begin{vmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{vmatrix}$

Точный расчет аэродинамического момента очень сложен и требует громоздких вычислений. Поэтому, чтобы его учесть, сделаем следующее допущение: предположим, что в момент перехода через перигей КА получает приращение угловой скорости  $\Delta\omega$ . Величину  $\Delta\omega$  найдем на основе графиков, приведенных в [1]. Она составит примерно 0,02 град/с вокруг продольной оси КА. Время одного витка находим из того же рисунка - 94 мин. Следует заметить, что такой прирост угловой скорости происходит только в начале полета, а последние несколько суток характер движения практически вообще не меняется, и поэтому при таком упрощении положительные результаты моделирования будут с запасом гарантировать работоспособность системы.

Для расчетов использовались следующие параметры аппарата: диаметр контуров 2 м, моменты инерции КА:  $J_1=3000$  м/кг<sup>2</sup>,  $J_2=J_3=6000$  м/кг<sup>2</sup>. Высота орбиты меняется на витке от 280 до 350 км. Расчеты проводились для системы, исполнительные органы которой содержат один виток.

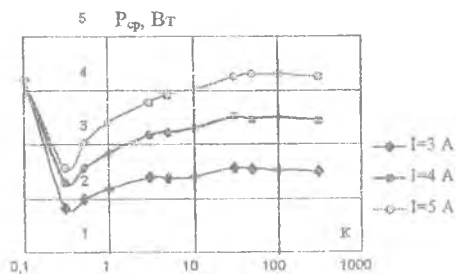


Рис 2

Практическая способность системы выполнять свои функции при заданных внешних условиях зависит от коэффициента  $k$  и максимально возможного тока  $I_{\max}$ . С уменьшением величины  $I_{\max}$  ухудшается способность системы удерживать угловую скорость  $\omega$  в заданных

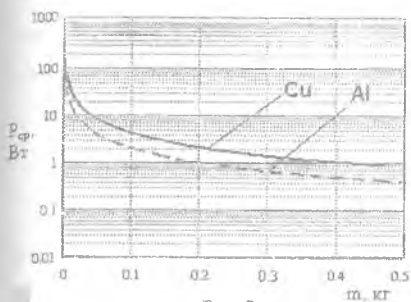


Рис. 3.

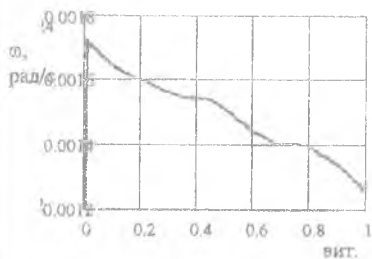


Рис. 4

пределах. Такая же ситуация складывается при изменении коэффициента пропорциональности  $k$  в (3). На рис. 2 приведены графики зависимости средней мощности, рассеиваемой в исполнительных органах, для различных  $k$  и  $I_{\max}$  (сопротивление контура принималось равным 0.1 Ом).

Ток, менее 3А, уже не в состоянии удерживать угловую скорость вращения в заданных пределах. Большие токи сложнее создавать, и потребление этого тока системой при их использовании существенно увеличивается, повышается величина генерируемого магнитного поля, что является дополнительным возмущающим фактором при проведении экспериментов, увеличиваются электромагнитные помехи.

На рис. 3 приведен график, связывающий мощность, рассеиваемую исполнительными органами, с их массой в зависимости от толщины проводника для двух материалов – алюминия и меди.

Закон управления (3) можно упростить, подставив в него вместо "k" коэффициент:

$$\tilde{k} = \frac{K}{B_{cp}^2} \quad (7)$$

где  $B_{cp}$  – среднее значение индукции магнитного поля Земли за время работы на орбите.

В этом случае закон управления уже не будет являться оптимальным и примет вид

$$\vec{L}_1 = \tilde{k}(\vec{\omega} \times \vec{B}). \quad (8)$$

Однако, поскольку управляющие моменты имеют очень малые значения, то управление по такому закону будет весьма близко к оптимальному. Расчет на одном витке показал уве-

личение в среднем потребления тока лишь на 5,4%. При этом переходные процессы практически не меняются (на рис.4 для случая торможения аппарата, имеющего угловые скорости 0,001 рад/с вокруг каждой из осей, сплошной линией представлен процесс торможения для закона (2), а точками – для закона (8)).

К достоинствам предлагаемой системы следует отнести малые массу и потребление тока, апробированный математический аппарат. Кроме того, при использовании данной системы нет необходимости в изменении конструкции КА.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М., "Машиностроение", 1975.
3. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. - М.: Наука, 1973.