

СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ МИКРОУСКОРЕНИЙ МАГНИТНЫМ СПОСОБОМ

2007 Н. Д. Семкин, В. Л. Балакин, К. Е. Воронов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривается система, использующая магнитный способ компенсации микроускорений и не требующая изменения конструкции космического аппарата (КА). Приведены результаты моделирования движения относительно центра масс для различных типов КА.

1. Анализ источников микроускорений и методы их уменьшения

Микроускорения вызываются действием на КА возмущающих сил, которые определяются внешними гравитационными и другими возмущениями, обусловленными космической средой, и внутренними возмущениями, связанными с функционированием систем КА.

Микроускорения, вызываемые внешними возмущениями, зависят главным образом от параметров орбиты и в меньшей степени от конструкции КА. Поэтому, задавая определенные параметры орбиты, можно уменьшить влияние внешних возмущений и, следовательно, уровень данных микроускорений.

Внутренние источники возмущений определяются конструкцией КА, и поэтому уменьшение уровня соответствующих микроускорений может быть обеспечено за счет специальных конструктивных решений при проектировании и КА.

Возможно и применение различных систем компенсации с малыми ориентирующими моментами.

В настоящее время для проведения технологических экспериментов используются КА «Фотон» и «Бион», преимуществом которых является низкий уровень микроускорений, что обеспечивается специальной конструкцией. Однако используемая конструкция не исключает влияния аэродинамического и гравитационного моментов, что было выявлено в ходе обработки данных измерений аппаратуры «Мираж», осуществлявшей мониторинг магнитного поля Земли на борту КА «Фотон-12» [1, 2]. В результате проведенно-

го эксперимента было установлено, что КА вращался с постоянно увеличивающейся угловой скоростью. К концу полета вращательное движение КА было близко к регулярной прецессии Эйлера с угловой скоростью порядка 1 град/с [2], что привело к появлению недопустимо высокого уровня центростремительного ускорения.

В статье рассматривается система, которая использует магнитный способ компенсации вращательных микроускорений и не требует установки сколько-нибудь значительного по массе и энергопотреблению дополнительного оборудования, а также изменения конструкции КА.

2. Моделирование движения КА при внешних воздействиях

Будем рассматривать движение КА как твердого тела по геоцентрической эллиптической орбите. В уравнениях движения КА относительно центра масс будем учитывать гравитационный и аэродинамический моменты.

Гравитационный момент определяется выражением

$$M_g = \frac{3m}{R^3} \mathbf{r} \times J \mathbf{e}_r,$$

где m - гравитационный параметр; R - расстояние между центрами масс КА и Земли; \mathbf{e}_r - орт радиус-вектора r ; J - матрица моментов инерции:

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

Аэродинамический момент определяется формулой

$$\dot{M}_a = c r |V| (\dot{V} \times \dot{P}) / 2,$$

где c - коэффициент силы лобового сопротивления; r - плотность атмосферы; V - скорость КА; P - первый момент геометрической фигуры, являющейся проекцией внешней оболочки КА на плоскость, перпендикулярную набегающему потоку.

Плотность атмосферы представим в виде [3]:

$$\rho = k_1 k_2 k_3 k_4 \rho_n,$$

$$\rho_n = \exp(a_1 - a_2 \sqrt{h - a_3}),$$

где r_n - ночной вертикальный профиль плотности атмосферы; коэффициент k_1 учитывает изменение плотности в зависимости от солнечного излучения (в расчетах принят индекс активности Солнца $F_{10,7} = 100 \cdot 10^{22} \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$); коэффициент k_2 учитывает суточный эффект в распределении плотности; k_3 - поправка на полугодовой эффект; коэффициент k_4 учитывает корреляцию изменений плотности атмосферы и геомагнитных возмущений; a_1, a_2, a_3 - некоторые коэффициенты; h - высота полета КА.

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

$$\left. \begin{aligned} J_1 \dot{w}_1 + (J_2 - J_3) w_2 w_3 &= M_1 \\ J_2 \dot{w}_2 + (J_3 - J_1) w_3 w_1 &= M_2 \\ J_3 \dot{w}_3 + (J_1 - J_2) w_1 w_2 &= M_3 \end{aligned} \right\},$$

где J_i - главные центральные моменты инерции КА; M_i, w_i - проекции внешнего момента и угловой скорости на оси связанной системы координат.

Внешний момент имеет управляющую составляющую $M_{упр}$, создаваемую исполнительными органами, и возмущающую составляющую $M_{возм}$:

$$M_i = M_{упр} + M_{возм}$$

Представим КА в виде эллипсоида вращения с большой полуосью длиной 3 м и малой полуосью длиной 1 м, в виде сферы с радиусом 2 м и в виде цилиндра длиной 3 м и радиусом 1 м. Соответственно моменты инерции аппарата равны для эллипсоида и цилиндра: $J_1 = 2400 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_2 = 10800 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_3 = 10800 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; для сферы: $J_1 = J_2 = 200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_3 = 400 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Для учета влияния аэродинамического момента зададим смещение Δ центра давления от центра масс. При расчетах для эллипсоида, сферы и цилиндра соответственно принималось: $\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$, $\Delta_2 = 0,15 \text{ м}$ и $\Delta_3 = 0 \text{ м}$. Начальное взаимное положение связанной и орбитальной систем координат задается углом крена $j_2 = 30^\circ$. Параметры орбиты: эксцентриситет $e = 0,0126$, большая полуось орбиты $a = 6688 \text{ км}$, наклонение $I = 62,8^\circ$.

На рисунках 1-3 приведены зависимости составляющих угловой скорости вращения КА в результате действия гравитационного и аэродинамического моментов на протяжении первых восьми суток полета. По оси абсцисс показано число витков.

Из представленных графиков видно, что КА вращается с постоянно увеличивающейся скоростью. Следует отметить, что скорость вращения не достигает того уровня, который был зарегистрирован на практике [4], что можно объяснить упрощенным описанием формы КА.

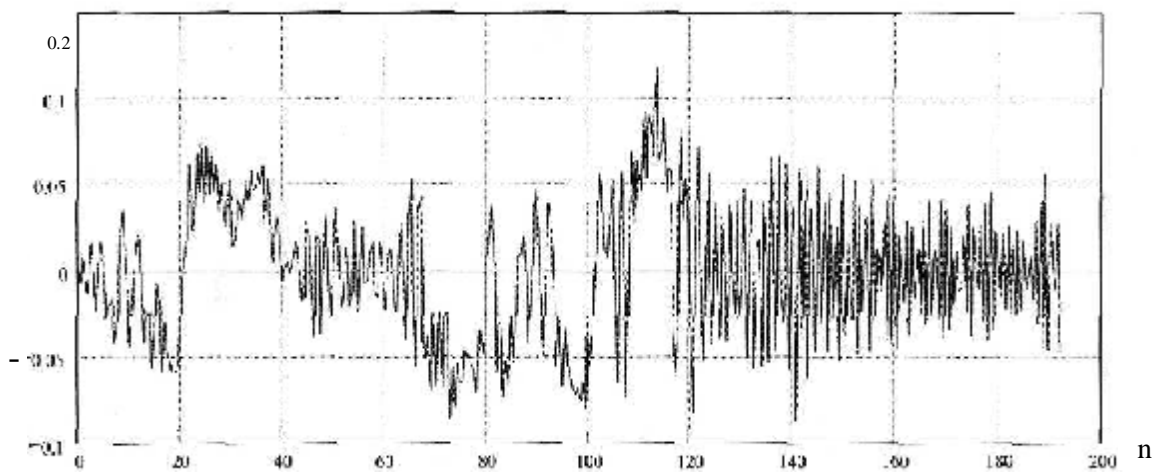
3. Система компенсации

Предлагается подход, основанный на взаимодействии исполнительных органов системы компенсации с магнитным полем Земли [5]. Исполнительными органами системы являются токонесущие контуры, расположенные на внешней поверхности КА (рис. 4). При подаче тока в контуры создаются управляющие моменты, которые гасят угловые ускорения и тем самым демпфируют угловую скорость вращения.

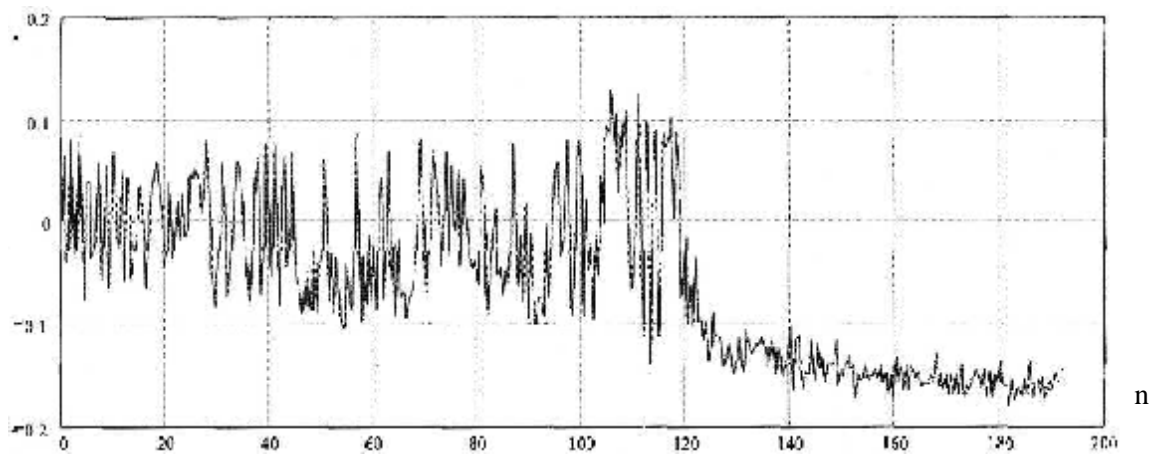
Управляющий магнитный момент, действующий на контур в магнитном поле, равен [5]:

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

ω_1 , рад/с



ω_2 , рад/с



ω_3 , рад/с

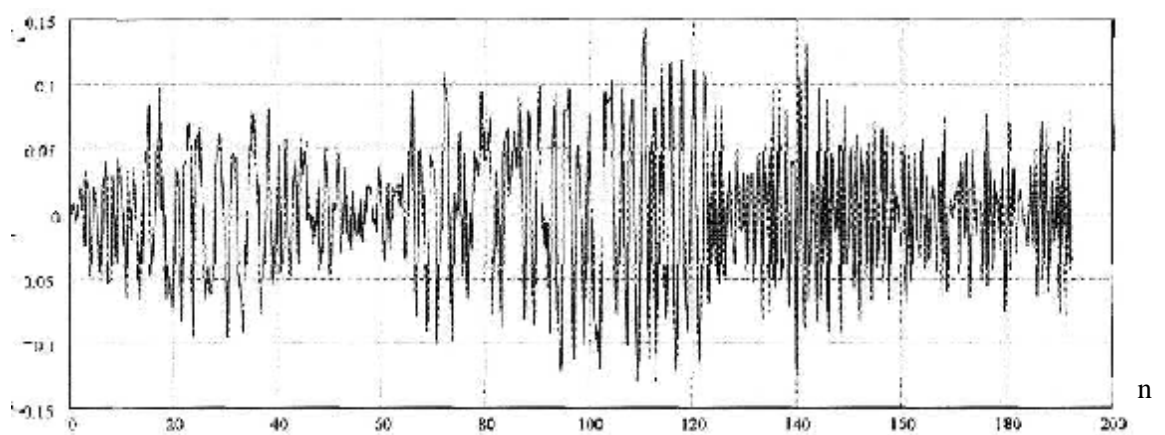
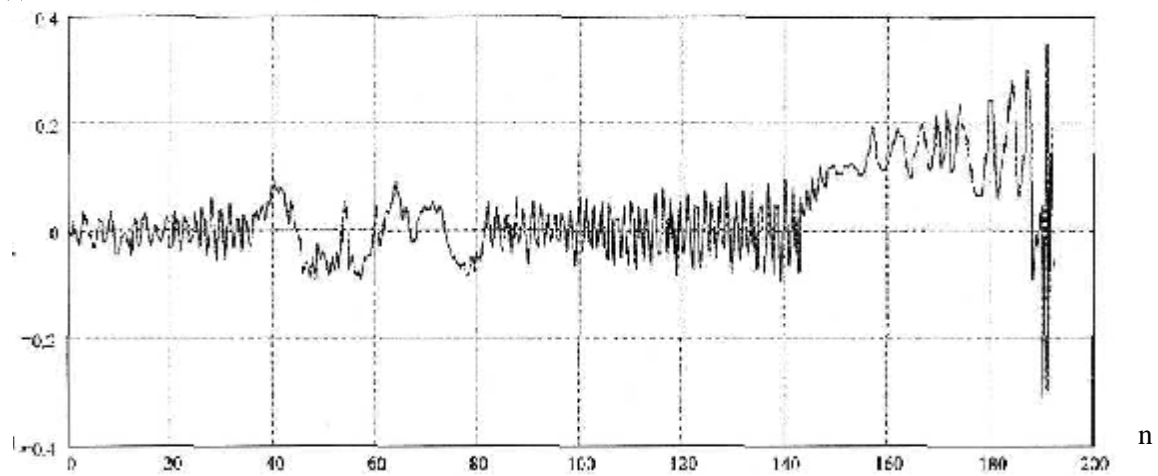
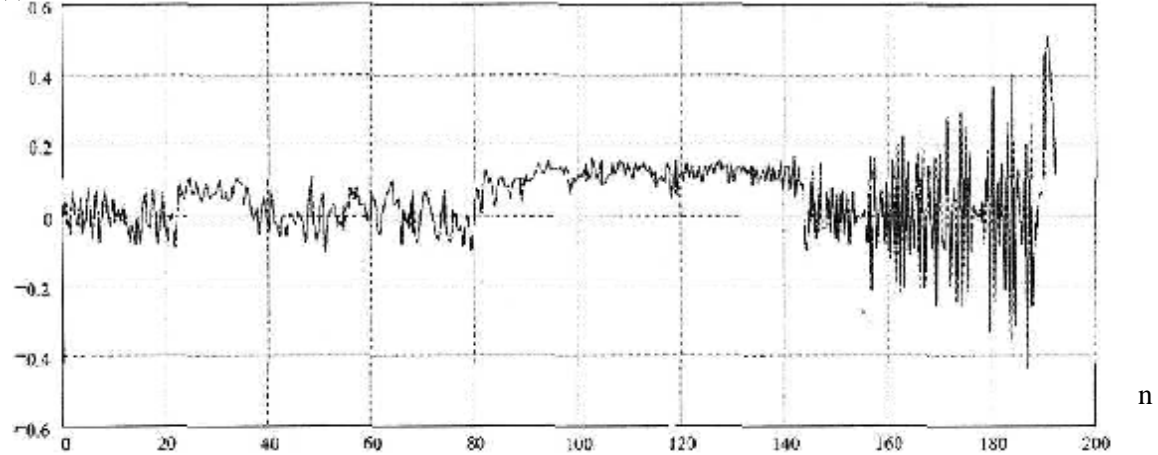


Рис. 1. КА в виде эллипсоида вращения

ω_1 , рад/с



ω_2 , рад/с



ω_3 , рад/с

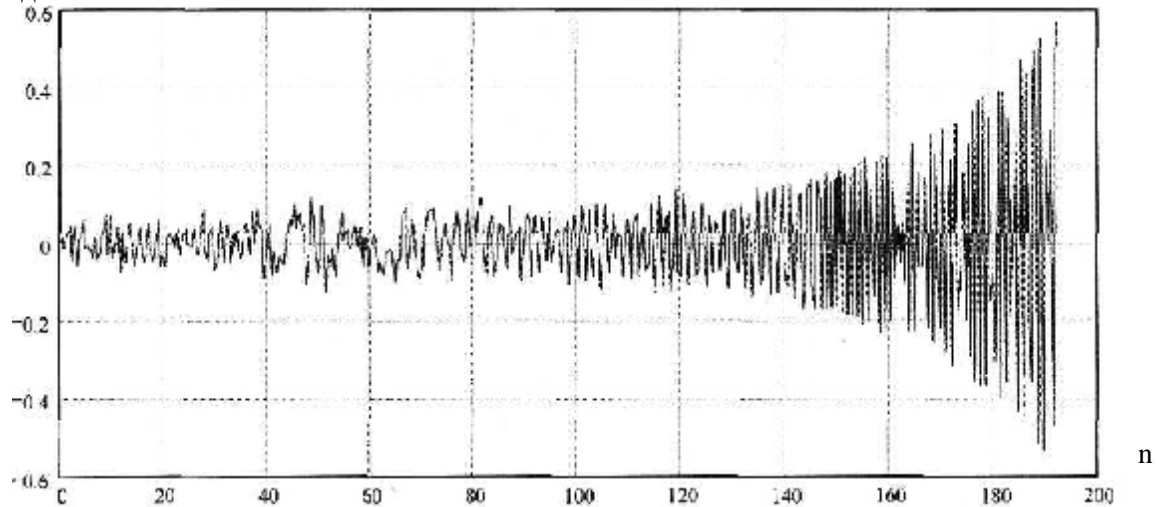


Рис. 2. КА в виде сферы

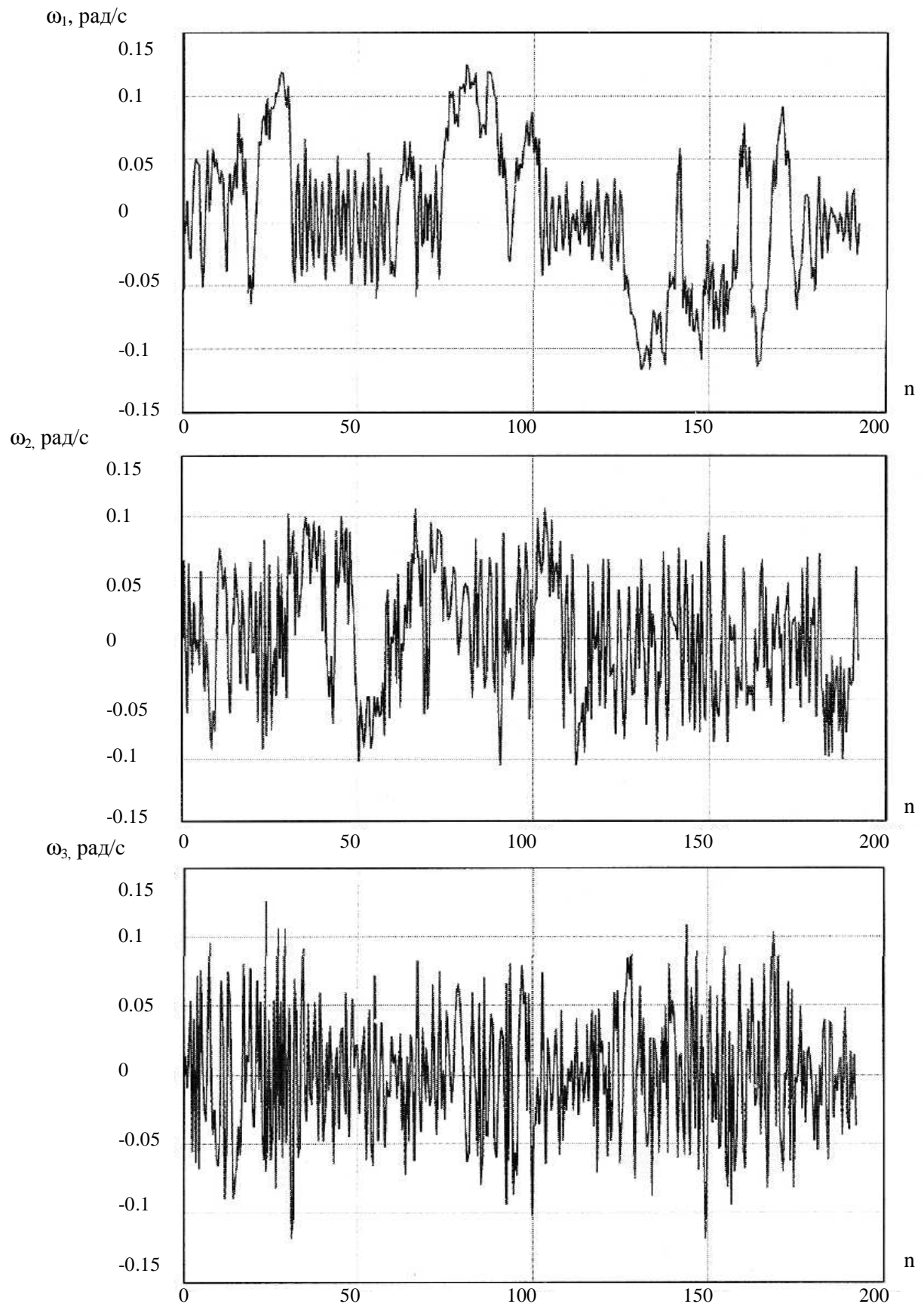


Рис. 3. КА в виде цилиндра

где $\dot{\mathbf{B}}$ - вектор индукции магнитного поля Земли; $\dot{\mathbf{L}} = IS\dot{\mathbf{n}}$ - вектор дипольного магнитного момента; S - площадь контура; I - ток, протекающий по контуру; $\dot{\mathbf{n}}$ - нормаль контура, направление которой связано с направлением тока правилом правого винта.

Примем, что управляющий момент формируется по пропорциональному закону

$$\dot{\mathbf{M}}_{упр} = -\kappa \dot{\mathbf{W}}, \quad (2)$$

где κ - коэффициент пропорциональности.

Тогда решение уравнения (1) будет иметь вид:

$$\frac{\mathbf{r}}{L} = \kappa \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{B}}}{B^2}. \quad (3)$$

Вектор $\dot{\mathbf{B}}$ измеряется с помощью трехкомпонентного феррозондового датчика. Вектор угловой скорости КА можно определить, измеряя величину магнитного поля [2].

Вектор угловой скорости можно записать

$$\dot{\mathbf{W}} = \dot{\mathbf{W}}_{\parallel} + \dot{\mathbf{W}}_{\perp}, \quad (4)$$

где $\dot{\mathbf{W}}_{\parallel}$, $\dot{\mathbf{W}}_{\perp}$ - соответственно составляющие $\dot{\mathbf{W}}$ вдоль вектора $\dot{\mathbf{B}}$ и перпендикулярны ему.

Производную $\dot{\mathbf{B}}$ разложим на составляющие $\dot{\mathbf{B}}^0$ за счет относительного движения системы координат $OX_1X_2X_3$, связанной с КА, и векторы $\dot{\mathbf{B}}$ и $\dot{\mathbf{B}}_m$ за счет изменения модуля $\dot{\mathbf{B}}$ во времени (рис. 5). Тогда $\dot{\mathbf{W}}_{\perp}$ можно представить в функции $\dot{\mathbf{B}}$ [4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \dot{\mathbf{W}}_{\perp} &= \frac{\dot{\mathbf{B}}^0}{B} \cdot \frac{\dot{\mathbf{B}}^0 \times \mathbf{r}}{|\dot{\mathbf{B}}^0 \times \mathbf{r}|} = \frac{\dot{\mathbf{B}}^0 \times \mathbf{r}}{B^2} = \\ &= \frac{(\dot{\mathbf{B}} - \dot{\mathbf{B}}_m) \times \mathbf{r}}{B^2} = \frac{\dot{\mathbf{B}} \times \mathbf{r}}{B^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) следует, что по измерениям магнитного поля можно найти и, следовательно, демпфировать только составляющую $\dot{\mathbf{W}}_{\perp}$, поскольку $\dot{\mathbf{W}}_{\parallel} \dot{\mathbf{B}} = 0$. Здесь проявляется известный недостаток магнитных систем управления, который следует из (1): нельзя создать магнитный момент вокруг оси, совпадающей с направлением вектора магнитного поля. Однако поскольку наклонение орбиты КА "Фотон" большое, то магнитное поле во время полета меняется по направлению, и поэтому можно компенсировать вращение относительно любой оси.

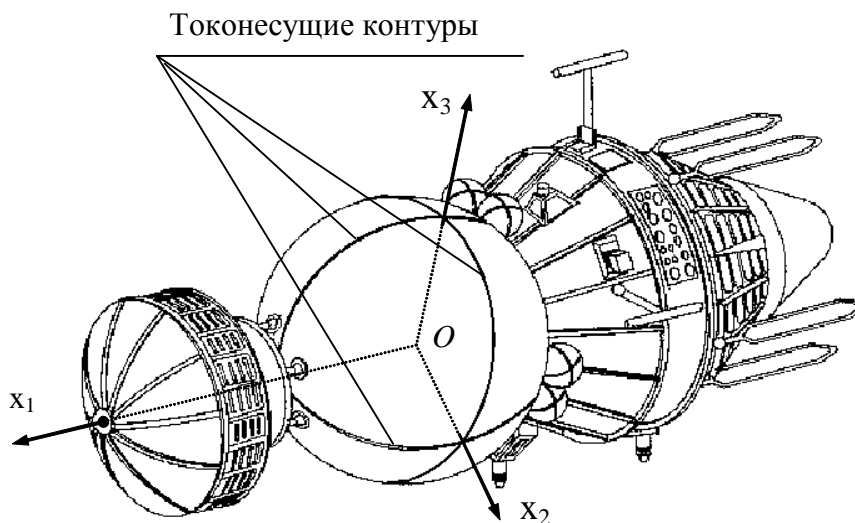


Рис. 4. Размещение контуров на КА «Фотон»

Используя (4) и (5), перепишем выражение (1) в виде

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{r}}{L} &= \kappa \frac{\left(\frac{\mathbf{r}}{\omega_{\parallel} + \frac{\mathbf{B} \times \mathbf{r}}{B^2}} \right) \times \mathbf{B}}{B^2} = \\ &= \kappa \frac{(\mathbf{B} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}}{B^2 \cdot B^2} = \frac{\kappa}{B^2} \cdot \left(\frac{\mathbf{r}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{B})}{B^2} - \frac{\mathbf{B} \times \mathbf{B}}{B} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, по данным, поступающим с феррозондовых датчиков, можно из (6) найти вектор дипольного момента, необходимый для уменьшения угловой скорости вращения, и, следовательно, необходимые для этого токи:

$$I_1 = \frac{L_1}{S}, \quad I_2 = \frac{L_2}{S}, \quad I_3 = \frac{L_3}{S}, \quad (7)$$

где I_1, I_2, I_3 – токи в контурах, охватывающих оси OX_1, OX_2, OX_3 связанной системы координат, соответственно. От знака в правой части равенства зависит направление тока в контуре по правилу правого винта.

Реальный закон изменения токов в контурах имеет вид:

$$I_i = \begin{cases} \frac{L_i}{S} \text{ при } \left| \frac{L_i}{S} \right| < I_{max} \\ I_{max} \frac{L_i}{|L_i|} \text{ при } \left| \frac{L_i}{S} \right| \geq I_{max}, \end{cases} \quad (8)$$

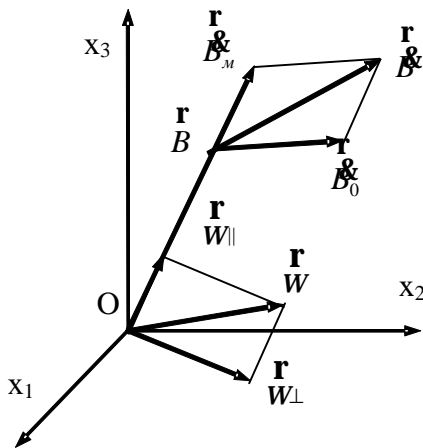


Рис. 5. Векторная диаграмма

где $i = x_1, y_1, z_1$; I_{max} – максимальное значение тока.

Для получения законов управления воспользуемся выражением (3), упростив его. Согласно (3) требуемый магнитный момент L зависит от величины B^2 , которая меняется во время полета. С увеличением угла наклона орбиты увеличивается и диапазон изменения B^2 . Например, по данным измерений на КА «Фотон-12», величина B изменялась от 20 до 60 мкТл. Присутствие в (3) члена B^2 соответствует использованию переменного коэффициента усиления, который обеспечивает постоянство магнитного момента. Исключение этого члена из (3) с помощью замены $\tilde{k} = k / B_{cp}^2$ позволяет существенно упростить блок формирования сигнала управления.

Кроме того, можно получить большое разнообразие законов управления, если использовать в (3) различные комбинации релейных функций от $\dot{w}, \dot{L}, \dot{B}$. Запишем выражение (3) в проекциях на оси координат:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \tilde{k} (w_2 b_3 - w_3 b_2) \\ L_2 &= \tilde{k} (w_3 b_1 - w_1 b_3) \\ L_3 &= \tilde{k} (w_1 b_2 - w_2 b_1) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где b_i, w_i – компоненты векторов магнитной индукции и угловой скорости КА в системе координат $OX_1 X_2 X_3$.

Закон (9) формирует оптимальный по направлению вектор магнитного момента. При его использовании управляющий момент строго противоположен направлению составляющей \dot{w}_{\perp} , перпендикулярной вектору \dot{b} . Такое положение вектора момента обеспечивает максимальную скорость разгрузки кинетического момента при заданной величине L . Любое упрощение, вводимое в закон (9), приводит к изменению направления вектора \dot{L} . Это приводит к неполному использованию имеющихся возможностей и снижению эффективности разгрузки, поскольку часть энергии будет уходить на демпфирование составляющей w_{\parallel} . А как уже отмечалось выше,

основным недостатком магнитных систем является невозможность согласно (1) создания момента вокруг оси, параллельной вектору \dot{B} .

На рисунке 6 представлена блок-схема системы управления (СУ) с непрерывным функционированием и линейным законом (9) на выходе.

Электрические сигналы с феррозондовых датчиков (ФД) поступают на блок преобразования (БП). На его выходе появляются сигналы, несущие информацию о компонентах магнитной индукции и затем поступающие на дифференциаторы. Информация о компонентах векторов магнитной индукции и их производных по времени поступает на блок формирования сигналов управления (БФСУ), где вычисляются компоненты угловой скорости КА, производится перемножение проекций w_i и B_j и суммирование результатов. На выходе БФСУ имеется сигнал расогласования: $d_i = w_j B_k - w_k B_j$. Блок усилителей мощности (БУМ) усиливает сигнал БФСУ и своими управляющими сигналами возбужда-

ет МИО (магнитные исполнительные органы).

Такая система обладает наибольшей эффективностью, но достаточно сложна в исполнении.

На практике создать такую СУ не представляется возможным, поскольку магнитный момент, вычисленный согласно (2), может оказаться слишком большим, и МИО не смогут его создать. Поэтому на выходе БФСУ необходимо ввести ограничитель сигнала (рис. 7), имеющий функцию:

$$d_i = \begin{cases} d_i \text{ при} & d_i \leq d_{max} \\ d_{max} \text{ sign}(d_i) \text{ при} & d_i > d_{max} \end{cases} \quad (10)$$

Другим вариантом является СУ с непрерывным функционированием и релейным законом на выходе, блок-схема которой представлена на рисунке 8.

Отличие этой СУ от предыдущей состоит в том, что МИО включаются только в случае достижения управляющим сигналом БФСУ некоторого порогового значения d^* .

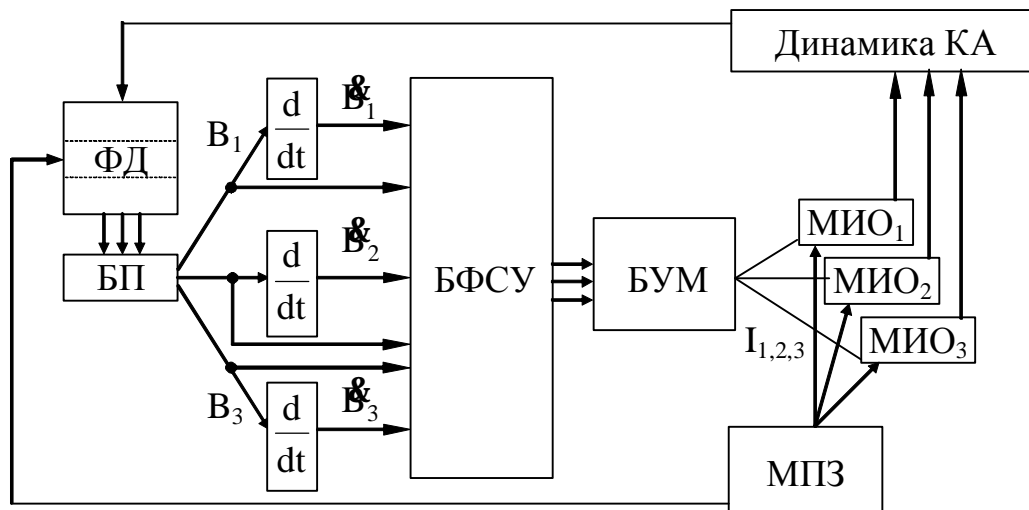


Рис. 6. Блок – схема СУ с непрерывным функционированием и линейным законом

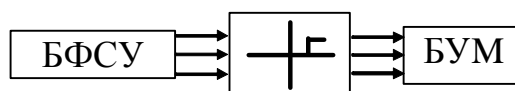


Рис. 7. Блок – схема ограничителя сигнала

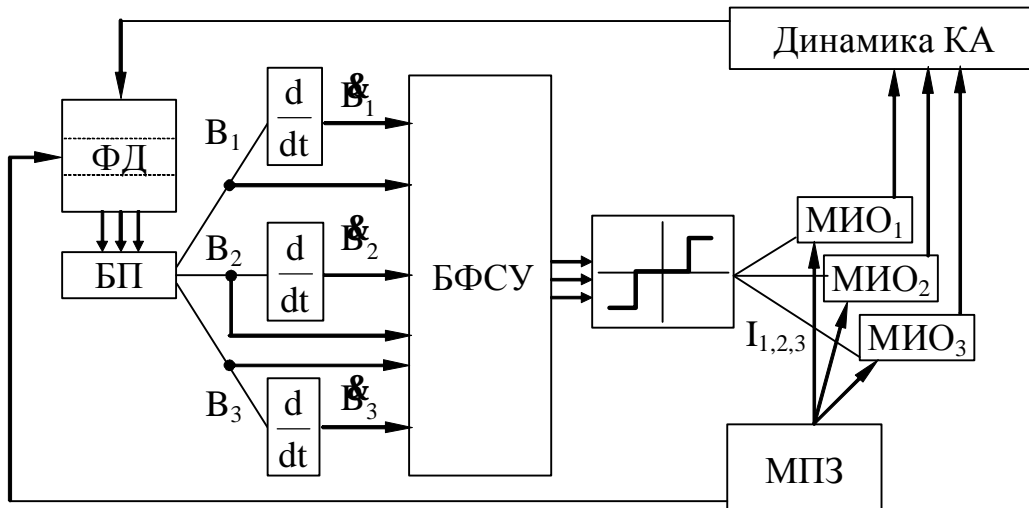


Рис. 8. Блок – схема СУ с непрерывным функционированием и релейным законом

Для этого сигнал пропускается через схему с характеристикой, изображенной на рис. 9,а, и при этом график магнитного момента будет иметь вид, показанный на рис. 9,б.

На рис. 9,б видно, что после снятия сигнала с МИО они продолжают создавать остаточный момент $k_r L_0$. Этот момент характерен для электромагнитных МИО. Частный случай $k_r=0$ характерен либо для катушечных МИО, либо для электромагнитных, к которым предъявляются требования минимизации остаточного магнитного момента.

Достоинством данной СУ является отсутствие БУМ, поскольку сигналы БФСУ используются только для включения-выключения МИО, а не для их питания. Это обеспечивает определенную экономию массы и энергопотребления системы компенсации. Однако она имеет худшие динамические показатели.

Следующим вариантом является СУ с непрерывным функционированием, блок-схема которой приведена на рис. 10.

Особенность этой СУ состоит в том, что формирование сигналов управления и функционирование МИО начинаются, если микроускорения превышают заданную величину. Поэтому в схему введены блок вычислений (БВ), определяющий уровень микроускорений на основании показаний ФД; релейный элемент, реагирующий на превышение величины ускорения некоторого заданного уровня, и элемент запрета, закрывающий доступ к информации о величине компонент V и \dot{V} в БФСУ, когда ускорение не достигает заданной величины. СУ может иметь как линейную, так и релейную зависимости моментов МИО от управляющего сигнала. Система компенсации имеет пониженное энергопот-

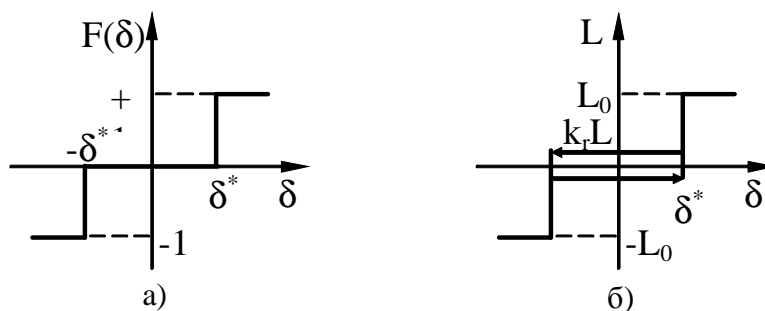


Рис. 9. Схема пропускания сигнала

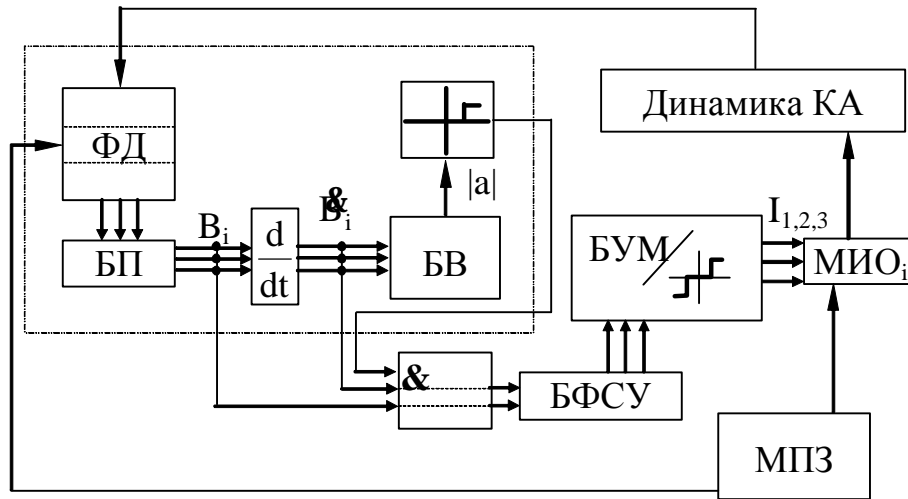


Рис. 10. Блок – схема с линейным функционированием

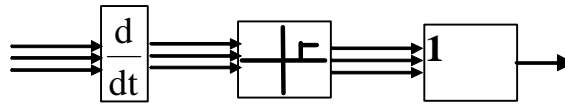


Рис. 11. Блок – схема логического суммирования сигналов

ребление, поскольку СУ можно организовать так, что при микроускорениях, не превышающих заданного порогового значения, к сети остается подключенной только та часть схемы, которая обведена на рис. 10 штрихпунктирной линией.

Для повышения надежности и обеспечения большей простоты схемы из нее можно исключить блок вычислений, формируя сигнал разрешения работы МИО на основании данных о величине \dot{B}_i для каждого из каналов (пороговое значение \dot{B}_i для каждого из каналов может быть разным) и добавив в схему блок логического суммирования сигналов разрешения (рис. 11).

Качество управления в первом и втором вариантах СУ такое же, как и в первом и втором вариантах СУ с непрерывным функционированием.

Еще более простой является СУ с логическим законом и непрерывным формированием сигналов управления. Поясним это.

Построение СУ, основанных на законе (2), требует выполнения операции перемножения проекций векторов \dot{w} и \dot{B} . Сделать это без привлечения цифровых вычислителей довольно сложно. Но этой операции мож-

но избежать, если в (2) использовать релейные функции от w_i . В этом случае величины w_i принимают значения $0, \pm 1$, и формирование законов (9) сводится к алгебраическому суммированию проекций B_i . Закон управления в этом случае может быть записан в виде

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \tilde{k} (F_2(w_2) b_3 - F_3(w_3) b_2) \\ L_2 &= \tilde{k} (F_3(w_3) b_1 - F_1(w_1) b_3) \\ L_3 &= \tilde{k} (F_1(w_1) b_2 - F_2(w_2) b_1) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Функции F_i ($i = 1, 2, 3$) являются релейными функциями (рис 9,а).

Блок-схема данной СУ показана на рис. 12. БФСУ выполняет лишь простейшую операцию алгебраического суммирования сигналов отдельных каналов магнитометра, что приводит к простой схемной реализации и повышению надежности. Однако система имеет худшее качество управления по сравнению с предыдущими СУ, использующими линейные законы.

Если на борту установлены датчики угловых скоростей (ДУС), то в СУ можно использовать их информацию. В этом случае можно отказаться от блока вычислений, что еще больше упростит схему (рис. 13).

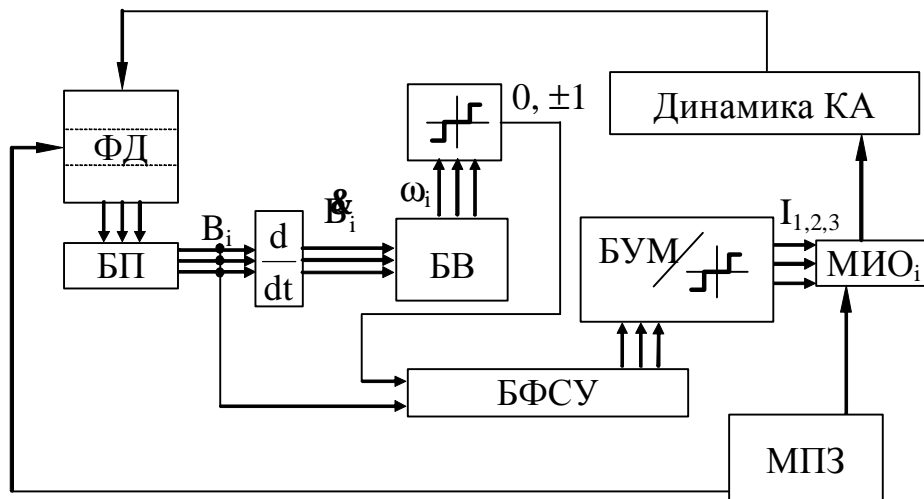


Рис. 12. Блок – схема суммирования каналов магнитометра

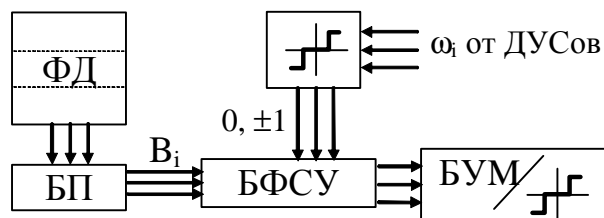


Рис. 13. Блок – схема упрощенной системы

СУ с логическим законом может быть также организована в виде системы с прерывным формированием сигналов управления (рис. 14). Из всех рассмотренных вариантов СУ данная система с релейным выходом обладает максимальной надежностью и наилучшими массовыми показателями, но имеет наихудшую эффективность управления [5].

Приведем результаты моделирования работы систем управления разных схем с параметрами, указанными в таблицах 1 и 2.

Сопротивление проводников принималось равным 0,044 Ом (алюминиевые проводники диаметром 2,2 мм, образующие контур радиусом 1 м).

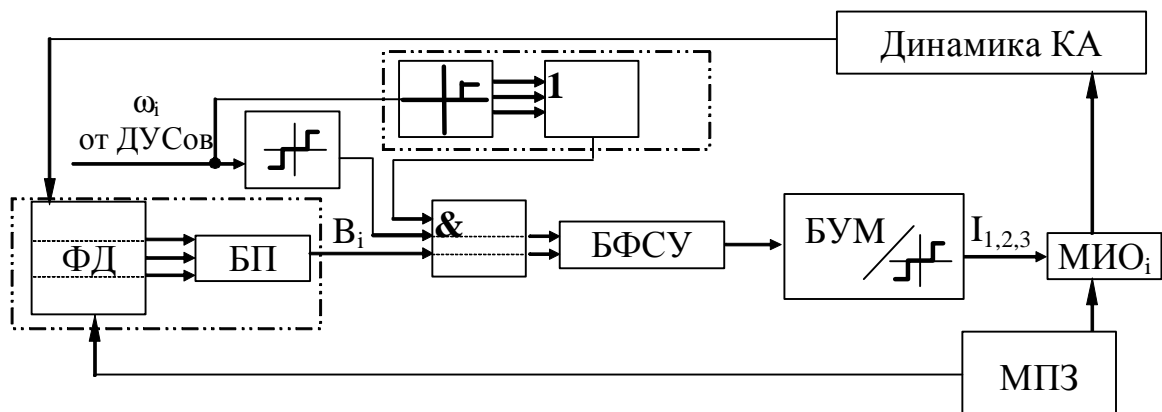


Рис. 14. Блок – схема СУ с непрерывным формированием сигналов управления

Таблица 1

№	1	2	3	4
Функционирование	непрерывное	непрерывное	непрерывное	непрерывное
Закон формирования сигнала управления	линейный	линейный	линейный	логический
Выход	линейный	линейный с ограничением	релейный	релейный
k	0,1	0,1	0,1	0,0002
Дополнительные параметры	$I_{max}=2\text{ A}$	$I_{max}=2\text{ A}$	$I=2\text{ A}$	$I=2\text{ A}$, $w^*=0,001\text{ рад/с}$
P_{cp}	0,23553	0,16557	0,07726	0,06275

Таблица 2

№	1	2	3	4
k	0,1	0,15	0,25	0,00055
Дополнительные параметры	$I_{max}=2\text{ A}$	$I_{max}=2\text{ A}$	$I=2\text{ A}$	$I=2\text{ A}$, $w^*=0,001\text{ рад/с}$
P_{cp}	0,23553	0,24198	0,24845	0,25725

На рис. 15 приведены графики разгрузки кинетического момента (1 соответствует СУ с непрерывным функционированием и линейным выходом, 2 – СУ с непрерывным функционированием и ограничителем на выходе, 3 – СУ с непрерывным функционированием и релейным выходом, 4 – СУ с непрерывным функционированием и логическим законом формирования сигнала управления). Рис. 15 подтверждает, что упрощение

СУ приводит к ухудшению динамических показателей. Хотя при упрощении СУ снижается средняя рассеиваемая в контурах мощность, но отношение «эффективность управления/рассеиваемая мощность» уменьшается (рис. 16 и табл. 2).

Решение об использовании в системе компенсации той или иной схемы СУ зависит от ее требуемой массы, энергопотребления, надежности, условий работы и др. По-

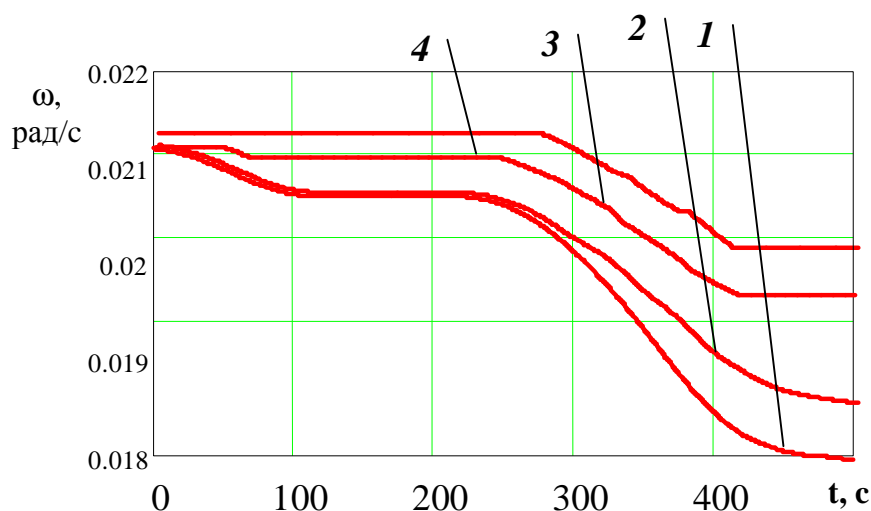


Рис. 15. График разгрузки кинетического момента

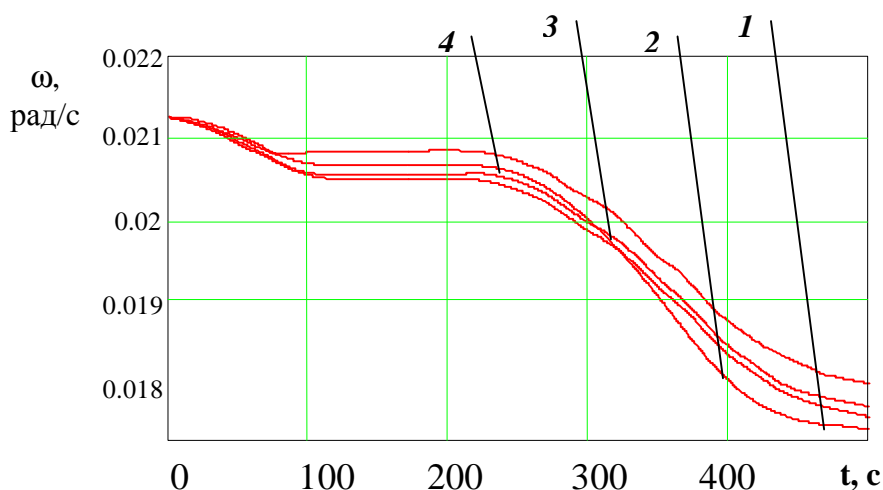


Рис. 16. График разгрузки кинетического момента

этому оно должно приниматься на основании результатов детального анализа схемных решений построения СУ и характеристик КА.

4. Моделирование движения КА «Фотон»

Моделирование проводилось для КА, представленного в виде эллипсоида вращения, с характеристиками и параметрами орбиты, указанными в 1, для СУ с непрерывным формированием сигнала управления и релейным выходом (рис. 8), исполнительные органы которой имеют 1 виток. Коэффициент пропорциональности $k = 0,1$, максимальный ток $I_{max} = 3$ А.

Зависимость модуля угловой скорости от времени приведена на рис. 17.

Как следует из рис. 17, использование

предлагаемой магнитной системы компенсации обеспечивает существенное снижение угловой скорости вращения КА.

5. Моделирование движения спутника-датчика

Рассмотрено движение КА в виде сферы диаметром 5 м с моментами инерции: $J_1 = J_2 = J_3 = 15,3$ и смещениями: $\Delta_1 = 0$, $\Delta_2 = 0$, $\Delta_3 = -2$ м. Начальное взаимное положение связанной и орбитальной систем координат задается углом крена $j_2 = 30^\circ$. Параметры орбиты: эксцентриситет $e = 0,074$, большая полуось орбиты $a = 7232$ км, наклонение $i = 73^\circ$.

Для первых суток полета зависимости составляющих угловой скорости приведены

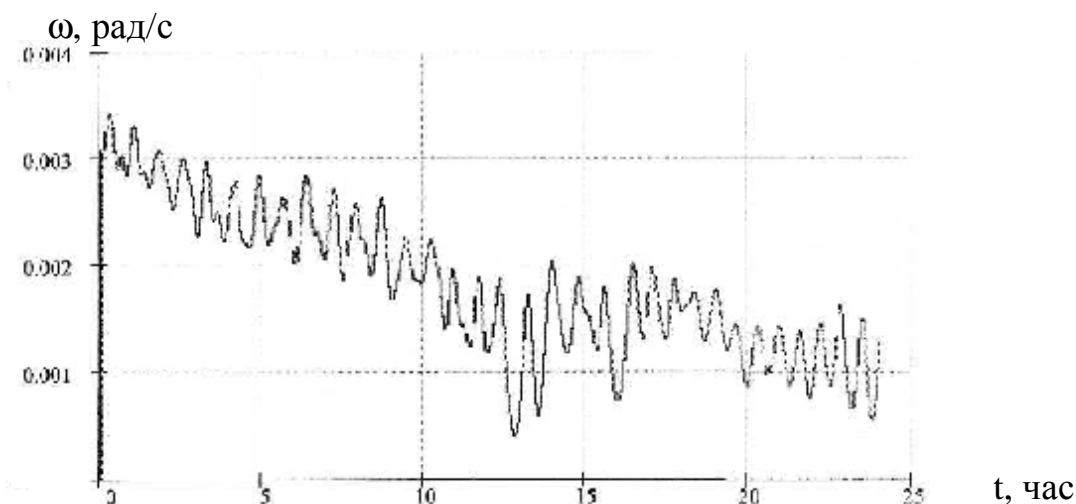


Рис. 17. Зависимость модуля угловой скорости от времени

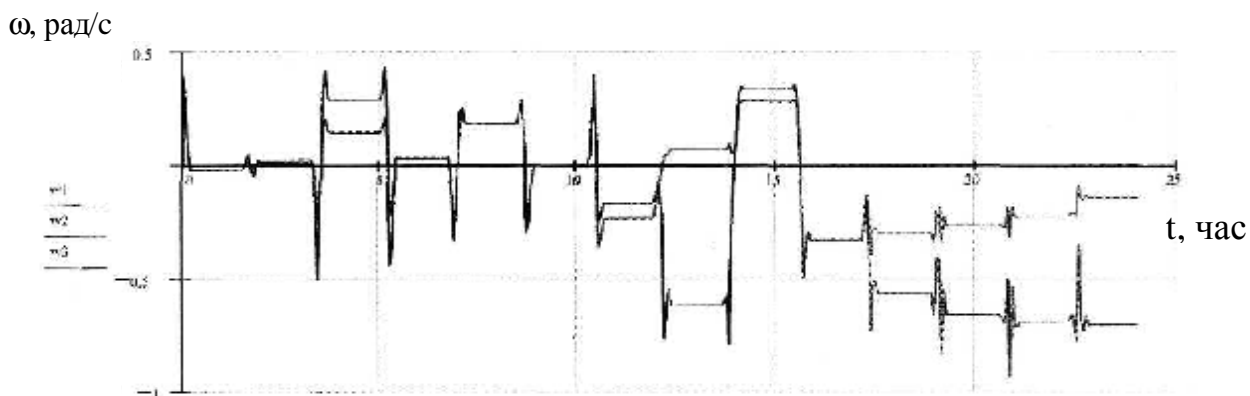


Рис. 18. Зависимость составляющих угловой скорости от времени

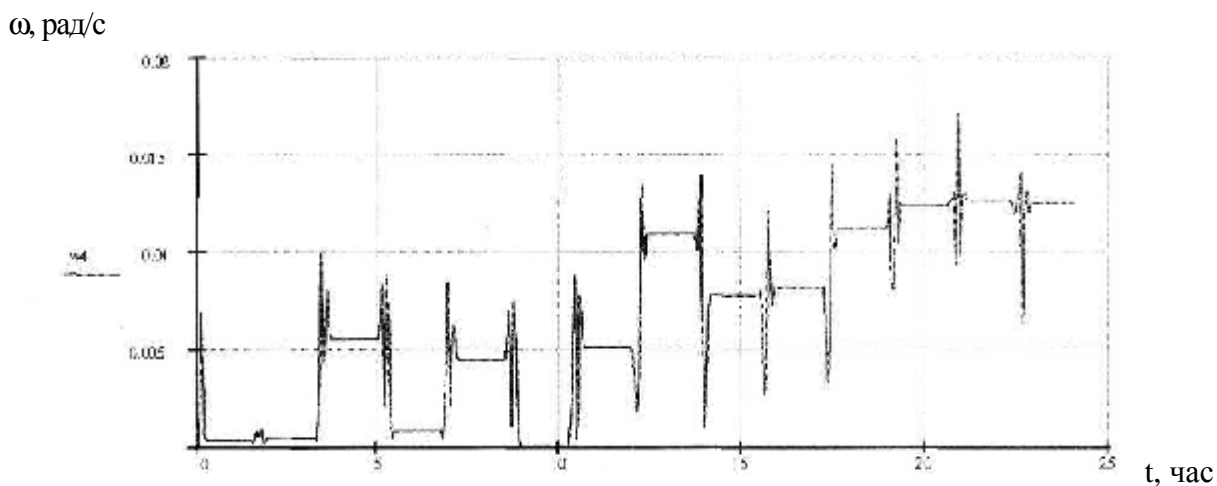


Рис. 19. Зависимость модуля угловой скорости от времени

на рис. 18, а модуль угловой скорости - на рис. 19.

Из рис. 19 видно, что угловая скорость вращения КА возрастает, т. е. происходит его закрутка вокруг оси OX_3 .

Проведены расчеты для СУ с непрерывным формированием сигнала управления и релейным выходом (рис. 8), исполнительные органы которой содержат один виток.

Способность системы компенсации выполнять свои функции при заданных внешних условиях зависит от коэффициента пропорциональности k и максимально возможного тока I_{max} . Для $k = 0,1$ приняты три варианта I_{max} : 3 А, 0,5 А и 0,1 А. Зависимость модуля угловой скорости от времени для этих

вариантов представлены на рисунках 20, 21 и 22, соответственно.

Из рис. 20-22 следует, что с уменьшением I_{max} у системы компенсации ухудшается способность удерживать угловую скорость КА в заданных пределах. Для I_{max} , меньшего 0,1 А, система не выполняет поставленной задачи, а при дальнейшем уменьшении I_{max} минимально достижимое значение угловой скорости к концу полета возрастает. При $I_{max} > 0,5$ А скорость вращения КА гарантированно удерживается в необходимых пределах. Однако, чем больше I_{max} , тем выше энергопотребление системы. Для анализа влияния коэффициента k рассмотрены два варианта:

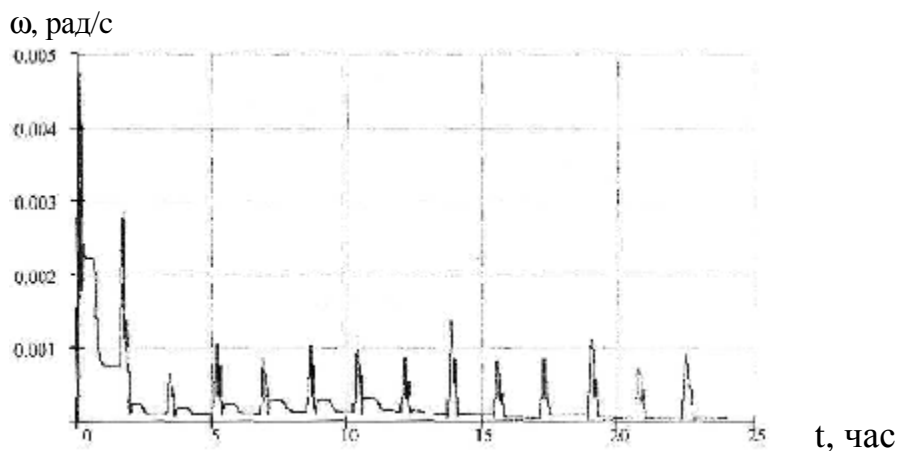


Рис. 20. Зависимость модуля угловой скорости от времени, $I_{max} = 3 A$

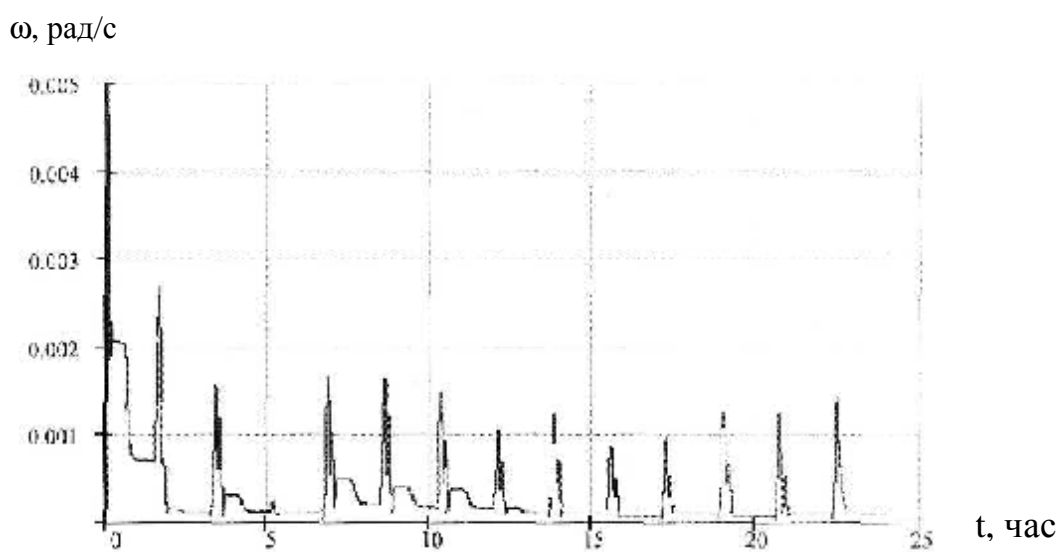


Рис. 21. Зависимость модуля угловой скорости от времени, $I_{max} = 0,5 A$

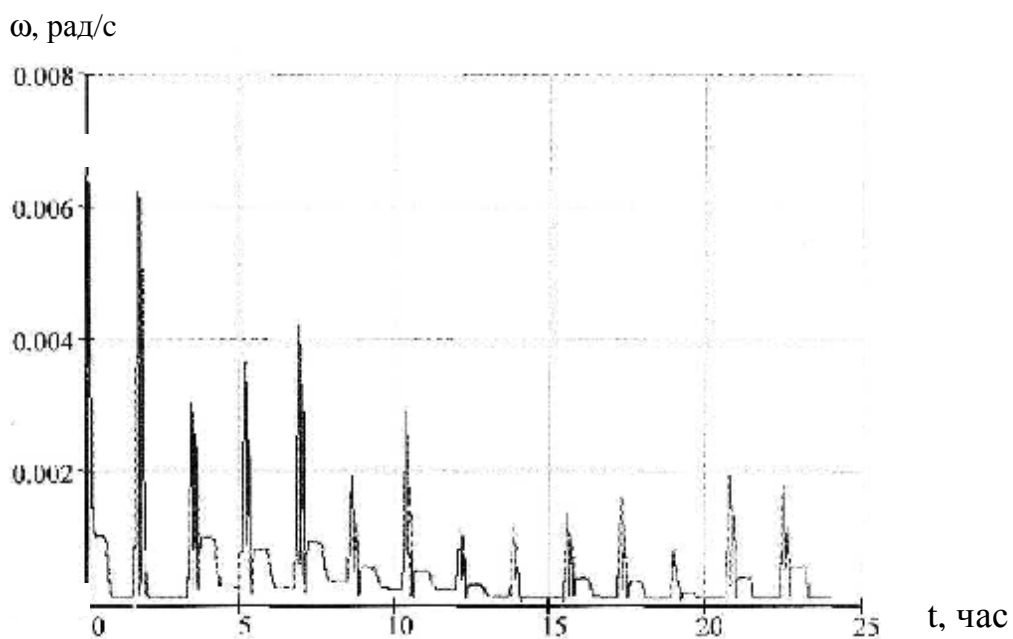


Рис. 22. Зависимость модуля угловой скорости от времени, $I_{max} = 0,1 A$

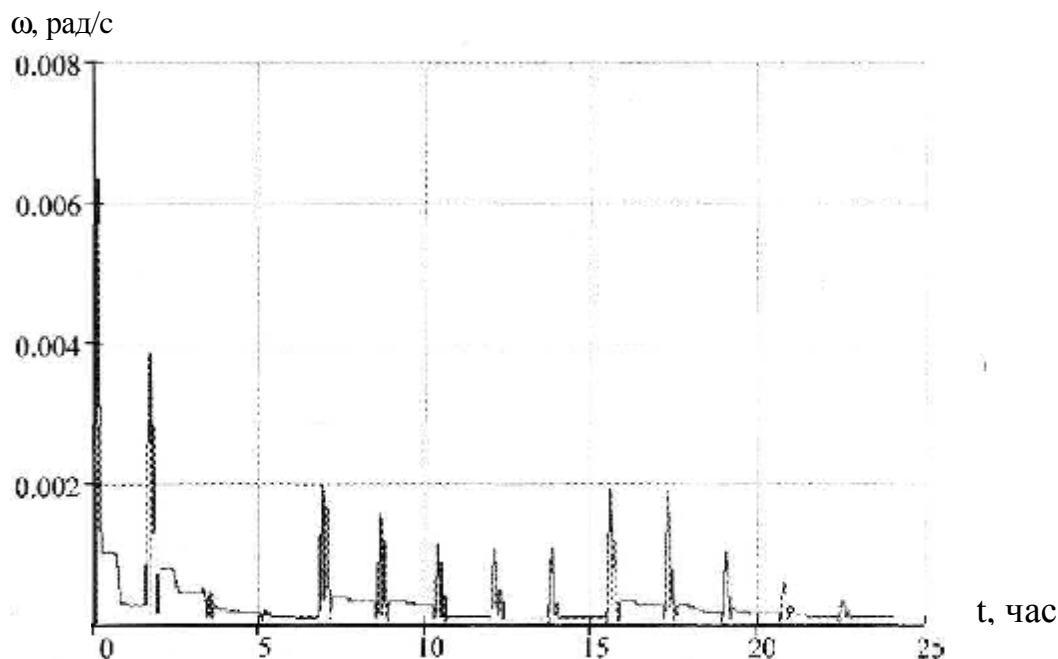


Рис. 23. Зависимость модуля угловой скорости от времени, $k = 0,5$

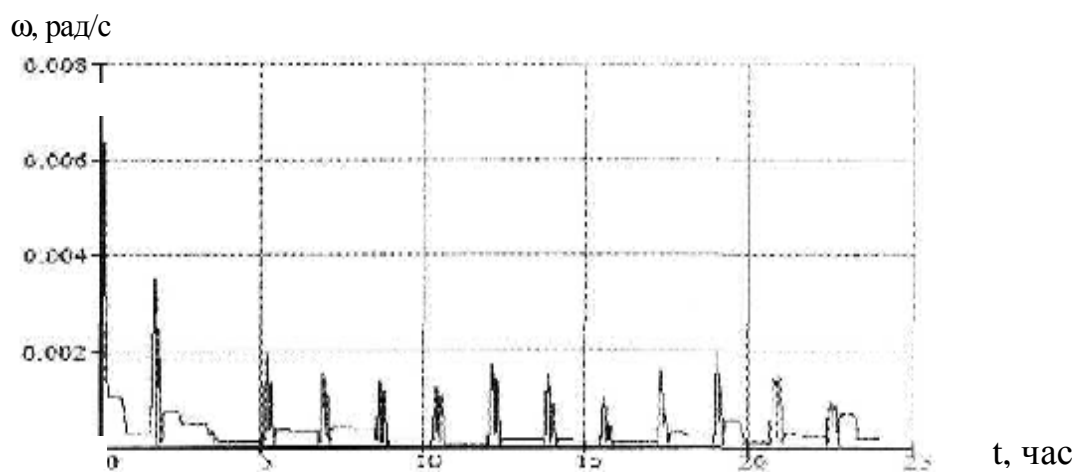


Рис. 24. Зависимость модуля угловой скорости от времени, $k = 0,9$

$k=0,5$ и $k=0,9$ при $I_{max}=0,1$ А. Результаты расчетов приведены на рис. 23 и 24.

Как и следовало ожидать, с ростом коэффициента пропорциональности k эффективность СУ увеличивается – угловая скорость вращения КА уменьшается.

Таким образом, результаты моделирования движения КА относительно центра масс под действием внешних гравитационного и аэродинамического моментов показывают эффективность использования системы компенсации микроускорений, реализующих магнитный способ.

Список литературы

1. Абрашкин В. И., Балакин В. Л., Белоконов И. В, Воронов К. Е., Иванов В. В., Зайцев А. С., Казакова А. Е., Сазонов В. В., Семкин Н. Д. Неуправляемое вращательное движение спутника «Фотон-12» и квазистатические микроускорения на его борту // Космические исследования. – 2003. - №1. - Т. 41. - С. 45-51.
2. Абрашкин В. И., Балакин В. Л., Белоконов И. В, Воронов К. Е., Иванов В. В., Зайцев А. С., Казакова А. Е., Сазонов В. В., Семкин Н. Д. Определение вращательного движения спутника «Фотон-12» по данным бортовых измерений магнитного поля Земли. - 2000 г. - № 60. (Препринт Института

прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН).

3. Модель верхней атмосферы для баллистических расчетов. ГОСТ 22721-77. -М.: Изд-во стандартов, 1978.

4. Сазонов В. В., Чебуков С. Ю., Абрашкин В. И., Казакова А. Е., Зайцев А. С. Анализ низкочастотных микроускорений на борту ИСЗ «Фотон-11». – 1999. - № 33. (Препринт Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН).

5. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. - М.: Машиностроение, 1975.