

Рис. 1. Малый спутник связи на основе платформы “Экспресс-1000”

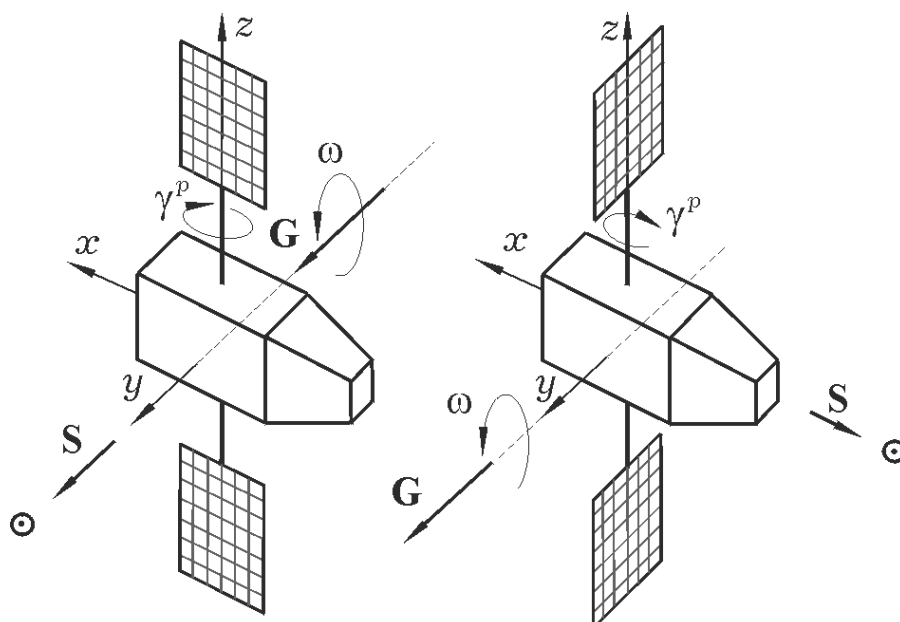


Рис. 2. Расположения КА относительно Солнца

ное направление, поэтому главная задача состоит в совмещении этого вектора с осью Oy максимального момента инерции корпуса КА, используя при этом только СГК, имеющего малые ресурсы по размерам областей вариации векторов его кинетического $\mathbf{H}(t)$ и управляющего $\mathbf{M}(t)$ моментов. Существенно нелинейные динамические процессы возникают при перемещении вектора $\mathbf{G}(t) = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{H}(t)$ суммарного КМ механической системы относительно связанной с корпусом КА системы координат (ССК) $Oxuz$. При этом на борту КА включается датчик Солнца, с помощью которого определяется направление на Солнце в ССК, и, при необходимости, панели СБ разворачиваются на некоторый угол γ^p , где $0 \leq \gamma^p \leq 270^\circ$. В результате предлагаемой перезагрузки корпуса КА вектор его угловой скорости будет направлен по оси Oy ССК, которая перпендикулярна оси вращения панелей СБ.

В предельных случаях в зависимости от начальных положений вектора \mathbf{G} и орта \mathbf{S} направления на Солнце, панели СБ будут освещаться Солнцем либо непрерывно, когда векторы \mathbf{G} и \mathbf{S} совмещены, либо периодически, когда эти векторы перпендикулярны, см. рис. 2. На этом этапе миссии спутника СГК формирует *внутренние* управляющие моменты и плазменные РД не используются. На следующем этапе начальных режимов СУД плазменные РД включаются и создают *внешние* управляющие моменты для успокоения спутника.

Современное состояние теоретических аспектов рассматриваемой проблемы подробно представлено в предыдущих работах [2 – 3]. В данной статье намеренно рассматриваются только принципиальные аспекты синтеза нелинейного закона управления для совмещения оси Oy ССК с вектором КМ спутника при отсутствии

всех внешних возмущающих моментов. Решение данной весьма непростой задачи теоретической механики и теории управления движением основывается на строгом доказательстве устойчивости требуемого вращения КА. Полученные результаты компьютерной имитации нелинейных колебаний при перезакрутке упругого КА, которые затухают на завершающем этапе этого процесса, подтверждают эффективность предложенного закона управления КА только внутренними моментами, реализуемыми СГК.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Модель динамики КА как свободного твердого тела (ТТ) с одной закрепленной точкой и некоторым СГК имеет известный вид

$$\dot{\mathbf{K}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{G} = \mathbf{M} \equiv -\dot{\mathbf{H}}; \mathbf{K} = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}; \mathbf{G} = \mathbf{K} + \mathbf{H}. \quad (1)$$

Здесь векторы-столбцы \mathbf{G} , \mathbf{K} и \mathbf{H} соответствующих КМ представлены в ССК и для простоты предполагается, что в ССК Ox_yz тензор инерции корпуса КА вместе с неподвижным СГК является диагональным, т.е.

$$\mathbf{J} = \text{diag}\{J_x, J_y, J_z\}.$$

Рассматриваются СГК двух типов – на основе 4 РМ по схеме GE и на основе 4 гиродин по схеме $2-SPE$, представленных в приборной канонической системе координат на рис. 3 и рис. 4, соответственно.

Форма выпуклых областей допустимой вариации вектора КМ таких СГК определяется углами γ^w и γ^g соответственно, а их требуемое расположение достигается положением приборной системы координат в ССК. При наличии ограничений на модуль КМ и управляющий момент каждого РМ

$$|\mathbf{h}_p(t)| \leq h^m; |\mathbf{M}_p(t)| \leq M^m, \quad p = 1 \div 4, \quad (2)$$

либо ограничений на модуль угловой скорости по-

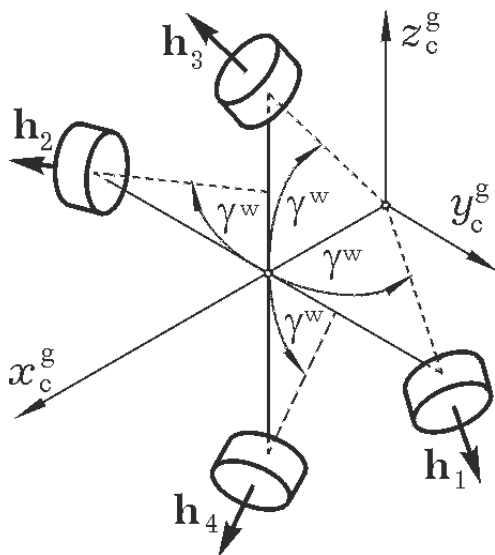


Рис. 3. Схема СГК на основе РМ

ворота каждого ГД относительно оси его подвеса

$$|\beta_p(t)| \leq u^m, \quad p = 1 \div 4, \quad (3)$$

векторы кинетического и управляющего моментов СГК будут ограничены.

Простейшая модель динамики КА как свободного упругого тела с СГК при стандартных обозначениях представляется в векторно-матричном виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{D}_q \\ \mathbf{D}_q^t & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{G} \\ -(\delta/\pi)\boldsymbol{\Omega}\dot{\mathbf{q}} - \boldsymbol{\Omega}^2\mathbf{q} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где вектор КМ $\mathbf{G} = \mathbf{K} + \mathbf{H} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}$ и диагональная матрица $\boldsymbol{\Omega}$ составлена из собственных парциальных частот упругих колебаний конструкции КА.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в начальный момент t_0 вектор КМ СГК $\mathbf{H}(t_0) = \mathbf{0}$. Модуль вектора КМ корпуса КА в начальный момент времени t_0 предполагается ограниченным заданной постоянной, т.е. $\|\mathbf{K}_0\| \leq k_0^*$, где $k_0^* > 0$, но направление этого вектора является произвольным. Поэтому в момент времени $t = t_0$ вектор КМ всей рассматриваемой механической системы $\mathbf{G}_0 = \mathbf{K}_0$ при условии $\|\mathbf{G}_0\| \equiv g_0 \leq g_0^* = k_0^*$. Инерционные параметры спутника считаются известными и предполагается возможность измерения векторов $\boldsymbol{\omega}(t)$ и $\mathbf{H}(t)$. Введем фиксированный в ССК орт $\mathbf{f} = \mathbf{e}_y = \{0, 1, 0\}$, который направлен по оси Oy максимального момента инерции корпуса КА, либо противоположен ему, тогда орт $\mathbf{f} = -\mathbf{e}_y = \{0, -1, 0\}$. Задача состоит в синтезе

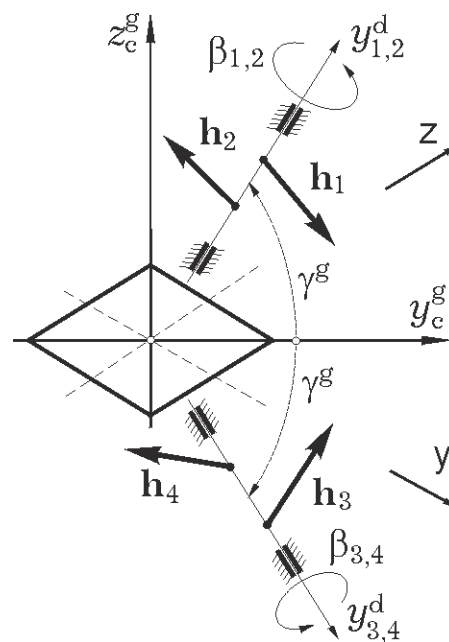


Рис. 4. Схема СГК на основе ГД

закона управления СГК $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{H})$, который обеспечивает выполнение условий

$$\mathbf{K}_f = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_f; \boldsymbol{\omega}_f = \boldsymbol{\omega}_f \mathbf{f}; \mathbf{H}_f = \mathbf{H}_f \mathbf{f}, \quad (5)$$

с заданной точностью в некоторый момент времени $t = T_f$, где $\mathbf{K}_f = \mathbf{K}(T_f)$; $\boldsymbol{\omega}_f = \boldsymbol{\omega}_f(T_f)$; $\mathbf{H}_f = \mathbf{H}(T_f)$ и $\mathbf{H}_f = \mathbf{H}(T_f)$, в частности $\mathbf{H}_f = \mathbf{0}$. В последнем случае, учитывая равенство $J_y \boldsymbol{\omega}_f + \mathbf{H}_f = \mathbf{g}_o$, получаем соотношение $\boldsymbol{\omega}_f = \mathbf{g}_o / J_y$.

После решения этой принципиальной проблемы должна быть решена задача распределения вектора управляющего момента СГК $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{H})$ с избыточным числом РМ либо ГД между этими электромеханическими исполнительными органами. Решение такой задачи опубликовано в [3] и поэтому в силу ограниченности объёма статьи здесь не приводится.

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

В соответствии с классическими законами теоретической механики при отсутствии внешних моментов вектор суммарного КМ $\mathbf{G}(t) = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{H}(t)$ рассматриваемой механической системы неподвижен в инерциальной системе координат (ИСК), но кинетическая энергия вращательного движения ТТ может изменяться внутренними моментами [4]. Орт $\mathbf{g}(t) \equiv \{\mathbf{g}_i(t)\} \equiv \mathbf{G}(t) / g_o$ указанного вектора КМ также неподвижен в ИСК, но в ССК этот орт перемещается в соответствии с уравнением

$$\dot{\mathbf{g}}(t) = -\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{g}(t). \quad (6)$$

Пусть в процессе вращательного движения КА по измерениям векторов $\boldsymbol{\omega}(t)$ и $\mathbf{H}(t)$ в ССК вычисляются следующие функции:

- значение орта $\mathbf{g}(t) = \mathbf{G}(t) / g_o$ суммарного КМ механической системы;
- значение вектора $\boldsymbol{\xi}(t) = \mathbf{g}(t) \times \mathbf{f}$;
- значение орта $\mathbf{e}_\varphi(t) = \boldsymbol{\xi}(t) / \|\boldsymbol{\xi}(t)\|$ при $\|\boldsymbol{\xi}(t)\| = S_\varphi(t) \equiv \sin \varphi(t) \geq \varepsilon_1 = \text{const} > 0$;
- косинус угла $\varphi(t)$ между ортами $\mathbf{g}(t)$ и \mathbf{f} , т.е. $C_\varphi(t) \equiv \cos \varphi(t) = \langle \mathbf{g}(t), \mathbf{f} \rangle$.

Будем также считать, что в момент времени t_0 вычисляется фиксированный индикатор $a_f = \text{Sgn } C_\varphi(t_0)$ направления орта \mathbf{f} в ССК, где функция $\text{Sgn } x$ определяется так: $\text{Sgn } x = 1$ при $x \geq 0$ и $\text{Sgn } x = -1$ при $x < 0$. В результате орт \mathbf{f} в ССК вычисляется по соотношению $\mathbf{f} = a_f \mathbf{e}_y$. В ССК векторное рассогласование $\boldsymbol{\eta}(t)$ между действительным и требуемым положениями вектора угловой скорости КА представляется в виде

$$\boldsymbol{\eta}(t) \equiv \delta\boldsymbol{\omega}(t) = \boldsymbol{\omega}(t) - \boldsymbol{\omega}_f. \quad (7)$$

При обозначении $\boldsymbol{\zeta}(t) = \mathbf{g}(t) - \mathbf{f}$ в качестве меры близости ортов $\mathbf{g}(t)$ и \mathbf{f} принимается скалярная функция

$$v_p(t) \equiv v_p(\boldsymbol{\zeta}(t)) = \boldsymbol{\zeta}^2(t) / 2 = 1 - \langle \mathbf{g}(t), \mathbf{f} \rangle \gg 0. \quad (8)$$

Эта функция принимает положительные значения при всех $\mathbf{g}(t) \neq \mathbf{f}$ и обращается в нуль только при совпадении указанных ортов. При отмеченном выше выборе орта \mathbf{f} в виде $\mathbf{f} = a_f \mathbf{e}_y = a_f \{0, 1, 0\}$ мы всегда имеем $v_p(t_0) \leq 1$. Учитывая стандартные векторные тождества $\langle \mathbf{a}, (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) \rangle \equiv \langle \mathbf{b}, (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) \rangle \equiv \langle \mathbf{c}, (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \rangle$ и соотношение для локальных производных векторов в ССК $\dot{\boldsymbol{\zeta}}(t) = \dot{\mathbf{g}}(t) = -\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{g}(t)$ в силу (6) и неподвижности орта \mathbf{f} в ССК, а также выражения $\boldsymbol{\omega}(t) = \boldsymbol{\eta}(t) + \boldsymbol{\omega}_f \mathbf{f}$ из определения (7), производная функции $v_p(t)$ (8) получается в виде

$$\dot{v}_p(t) = \langle \boldsymbol{\zeta}(t), \dot{\boldsymbol{\zeta}}(t) \rangle = \langle \boldsymbol{\xi}(t), \boldsymbol{\eta}(t) \rangle. \quad (9)$$

Векторы $\boldsymbol{\xi}(t)$ и $\boldsymbol{\zeta}(t)$, характеризующие близость ортов $\mathbf{g}(t)$ и \mathbf{f} , связаны между собой такими важными тождествами:

$$\boldsymbol{\xi}^2 \equiv \boldsymbol{\zeta}^2 (1 - \boldsymbol{\zeta}^2 / 4); \boldsymbol{\zeta}^2 \equiv 2\boldsymbol{\xi}^2 / (1 + (1 - \boldsymbol{\xi}^2)^{1/2}), \quad (10)$$

причем вектор $\boldsymbol{\xi}(t)$ изменяется в ССК в соответствии с векторным уравнением

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = \boldsymbol{\eta}(t) - \boldsymbol{\phi}; \quad \boldsymbol{\phi} \equiv \mathbf{g} \langle \mathbf{f}, \boldsymbol{\eta} \rangle - \boldsymbol{\eta} \langle \mathbf{f}, \boldsymbol{\zeta} \rangle, \quad (11)$$

где использовано векторное тождество $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b} \langle \mathbf{a}, \mathbf{c} \rangle - \mathbf{c} \langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle$.

Учитывая, что в ССК $\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \dot{\boldsymbol{\omega}}(t)$ согласно (7), и соотношения

$$\mathbf{G}(t) = g_o \mathbf{g} = g_o \mathbf{f} + g_o (\mathbf{g} - \mathbf{f}) = \mathbf{K}_f + \mathbf{H}_f + g_o \boldsymbol{\zeta};$$

$$\mathbf{v} \equiv \mathbf{J}\boldsymbol{\eta} - g_o \boldsymbol{\zeta} = -(\mathbf{H} - \mathbf{H}_f); \quad \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{G},$$

уравнение (1) представляется в простейшей форме

$$\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) - g_o \dot{\boldsymbol{\zeta}}(t) = \mathbf{M} = -\dot{\mathbf{H}}. \quad (12)$$

Определенно положительная скалярная

функция $v_e = v^2 / (2j_h) = (\mathbf{H} - \mathbf{H}_f)^2 / (2j_h)$ характеризует кинетическую энергию СГК в его движении относительно требуемого положения равновесия в ССК, где постоянная величина j_h представляет инерционные свойства СГК. Требуемое движение ТТ $\mathbf{O}_\eta \equiv \{\boldsymbol{\xi} = \mathbf{0}; \boldsymbol{\eta} = \mathbf{0}\}$ представляется также в виде $\mathbf{O}_v \equiv \{\boldsymbol{\xi} = \mathbf{0}; \mathbf{v} = \mathbf{0}\}$ в силу тождеств (10).

Введем обозначение $\boldsymbol{\rho}^2 = \boldsymbol{\xi}^2 + \boldsymbol{\eta}^2$ и рассмотрим сначала случай движения ТТ в малой области $\mathbf{O} \equiv \{\|\boldsymbol{\xi}\| < \varepsilon_1\} \cap \{\|\boldsymbol{\rho}\| < \varepsilon_\rho\}$, когда не проявляются ограничения на вектор $\mathbf{M} = -\dot{\mathbf{H}}$. Для определения структуры закона формирования вектора управляющего момента СГК $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{H})$ введем функцию Ляпунова $V(\boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\eta}) = ab v_p(\boldsymbol{\zeta}) + (a / j_h) \langle \mathbf{v}, \mathbf{P}\boldsymbol{\xi} \rangle + v_e(v)$, (13) где матрица \mathbf{P} является определено положительной и $a > 0$, $b > 0$ – постоянные параметры. С учетом тождеств (10) при большом значении параметра b функция (13) является определено положительной в отношении векторных переменных $\boldsymbol{\zeta}(\boldsymbol{\xi})$ и $\boldsymbol{\eta}$. Её производная с учетом (9) и (12) имеет вид

$$\dot{V} = ab \langle \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta} \rangle + [\langle \mathbf{M}, \boldsymbol{\mu} \rangle + \langle \mathbf{v}, \mathbf{P}\dot{\boldsymbol{\xi}} \rangle] / j_h, \quad (14)$$

где вектор $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{v} + a\mathbf{P}\boldsymbol{\xi}$. В области \mathbf{O} закон управления СГК принимается в виде

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_\xi \equiv -q j_h \mathbf{D}\boldsymbol{\mu} = -m[\boldsymbol{\xi} + k\mathbf{D}\mathbf{v}] \quad (15)$$

с параметрами $q > 0$, $m = q j_h a > 0$, $k = 1/a > 0$ и определенно положительной матрицей $\mathbf{D} = \mathbf{P}^{-1}$.

Теорема. Для требуемого движения \mathbf{O}_η модели механической системы (11), (12) с законом управления (15) гарантируется свойство экспоненциальной устойчивости

$$\rho(t) \leq \rho(t_0) \beta \exp(-\alpha(t-t_0)), \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0 \quad (16)$$

для произвольного вектора начальных условий $\{\xi(t_0), \eta(t_0)\} \in \mathbf{O}_0 \subset \mathbf{O}$ при выборе достаточно большого параметра $q(g_0) > 0$.

Доказательство. Производная (14) функции (13) с учетом соотношения (15) представляется в виде

$$\dot{V} = -qa^2 \langle \xi, \mathbf{P}\xi \rangle + a(b \langle \xi, \eta \rangle - 2q \langle \xi, \mathbf{J}\eta \rangle) - q \langle \mathbf{v}, \mathbf{D}\mathbf{v} \rangle + (a/j_h) \langle \mathbf{v}, \mathbf{P}(\eta - \phi) \rangle \quad (17)$$

где вектор $\mathbf{v} = \mathbf{J}\eta - g_0\zeta$ и векторная функция ϕ определена в (11). Учитывая представление $\langle \mathbf{v}, \mathbf{D}\mathbf{v} \rangle = \langle \mathbf{D}\mathbf{J}\eta, \mathbf{J}\eta \rangle - 2g_0 \langle \mathbf{D}\mathbf{J}\eta, \zeta \rangle + g_0^2 \langle \mathbf{D}\zeta, \zeta \rangle$ и аналогичные представления других членов в соотношении (17), а также тождеств (10), с применением общеизвестной леммы Шура можно убедиться в справедливости мажорирования $\dot{V} \leq -W(\xi, \eta)$, где скалярная функция $W(\xi, \eta)$ определена положительно в отношении векторных переменных ξ и η при больших значениях положительных параметров b и q , зависящих от модуля g_0 вектора \mathbf{G} КМ системы. По аналогии с подходом Е.Я. Смирнова [5] доказывается, что $W(t) \equiv W(\xi(t), \eta(t)) \Rightarrow 0$ и функция $V(t)$ монотонно уменьшается. Оценка (16) выводится с помощью мажорирования функций V

и W квадратичными формами ($a_1\rho^2 \leq V \leq a_2\rho^2, a_1 > 0$; $b_1\rho^2 \leq W \leq b_2\rho^2, b_1 > 0$) с получением параметров $\alpha = b_1/(2a_2)$ и $\beta = (a_2/a_1)^{1/2}$. \diamond

Благодаря тождеству $\mathbf{v} \equiv \mathbf{J}\eta - g_0\zeta = -(\mathbf{H} - \mathbf{H}_f)$ закон управления (15) представляется в очень простом виде $\mathbf{M} = \mathbf{M}_\xi \equiv -m[\xi(t) - k\mathbf{D}(\mathbf{H} - \mathbf{H}_f)]$ для вектора состояния системы из малой окрестности требуемого движения ТТ \mathbf{O}_η . Вне этой окрестности такой закон управления неэффективен в силу наличия многообразий стационарных движений гиростата [6], которые существуют при условиях $\mathbf{M}_\xi = \mathbf{J}\eta - g_0\zeta \equiv \mathbf{0}$, $\mathbf{J}\eta - g_0\zeta = \mathbf{c}$ и $a\mathbf{P}\xi = -\mathbf{c}$, когда постоянный вектор $\mathbf{c} \neq \mathbf{0}$. Поэтому необходимо применять другие простые законы управления для наискорейшей перезакрутки КА, без “застывания” его движения на всех таких многообразиях, отличных от требуемого движения \mathbf{O}_η , и с учетом ограниченности вектора управляющего момента $\mathbf{M} = -\mathbf{H}$ СГК. При обозначениях

$$\mathbf{M}_\xi^r = -m[\mathbf{e}_\xi(t) \text{Sgn} C_\varphi(t) - k\mathbf{D}(\mathbf{H}(t) - \mathbf{H}_f)],$$

$$\mathbf{M}^r = -M^* \{ \text{Sgn} g_i(t), i = x, y, z \},$$

где $M^* > 0$ является большим постоянным параметром, разработанный простой закон управления СГК релейно-непрерывного типа имеет вид

$$\mathbf{M} = \begin{cases} \mathbf{M}_\xi & \|\xi\| < \varepsilon_1; \\ \mathbf{M}_\xi^r & \varepsilon_1 \leq \|\xi\| \leq \varepsilon_2; \\ \mathbf{M}^r & \|\xi\| > \varepsilon_2, \end{cases} \quad (18)$$

где, например, параметры $\varepsilon_1 = 0.1$ (угол $\varphi = 6^\circ$) и $\varepsilon_2 = 0.5$ (угол $\varphi = 30^\circ$).

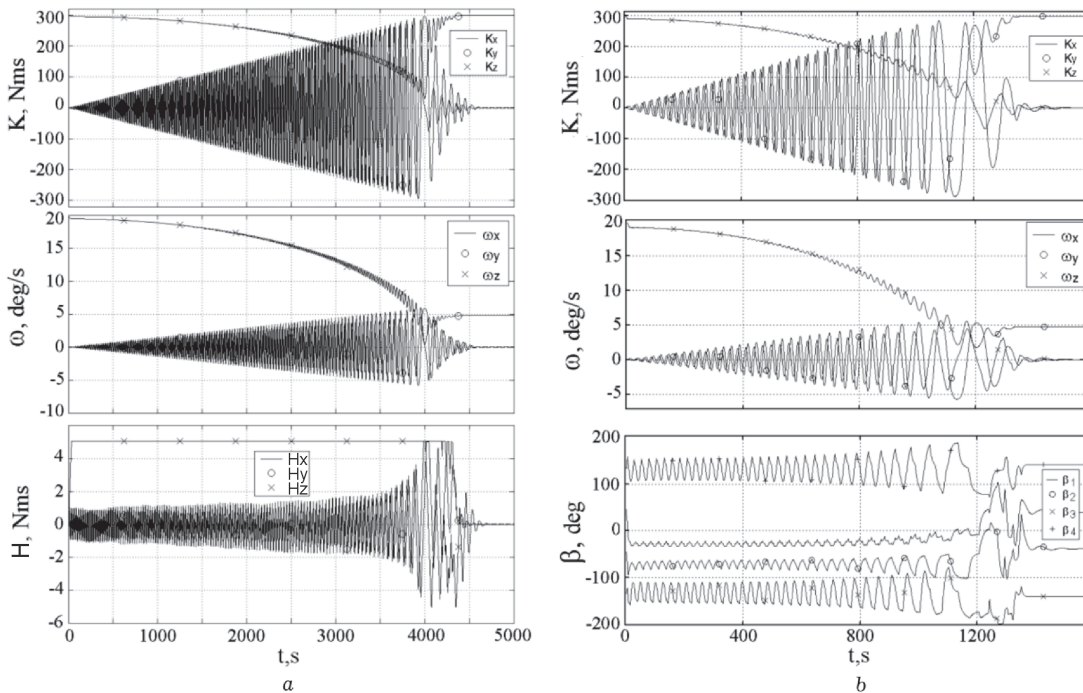


Рис. 5. Перезакрутка КА как ТТ: a – с помощью 3 РМ, b – с помощью 4 ГД

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИИ

С применением закона управления (18) выполнена тщательная имитация движения КА при его перезакрутке, при этом были приняты значения диагональных элементов тензора инерции ТТ $J_x = 2900, J_y = 3600, J_z = 670 \text{ kgm}^2$ [2] и следующие условия: в начальный момент времени t_0 вектор КМ механической системы

$\mathbf{G}_0 = \mathbf{K}_0$ с модулем $\|\mathbf{G}_0\| = g_0 = 300 \text{ Hms}$ направлен по орту $\mathbf{f} = \{0,0,1\}$ в ССК, т.е. в ССК $\mathbf{g}(t_0) = \{0,0,1\}$; требуемое положение орта $\mathbf{g}(T_f)$ в ССК задано значением $\mathbf{g}(T_f) = \{0,1,0\}$, т.е. в ИСК ось вращения спутника нужно развернуть на угол 90° . Здесь для простоты и ясности были исследованы две простейшие схемы SGK:

- 1) классическая схема SGK на основе 3 РМ, $M^m = 0.15 \text{ Nm}$ и $h^m = 5 \text{ Hms}$;
- 2) каноническая схема SGK на основе 4 ГД,

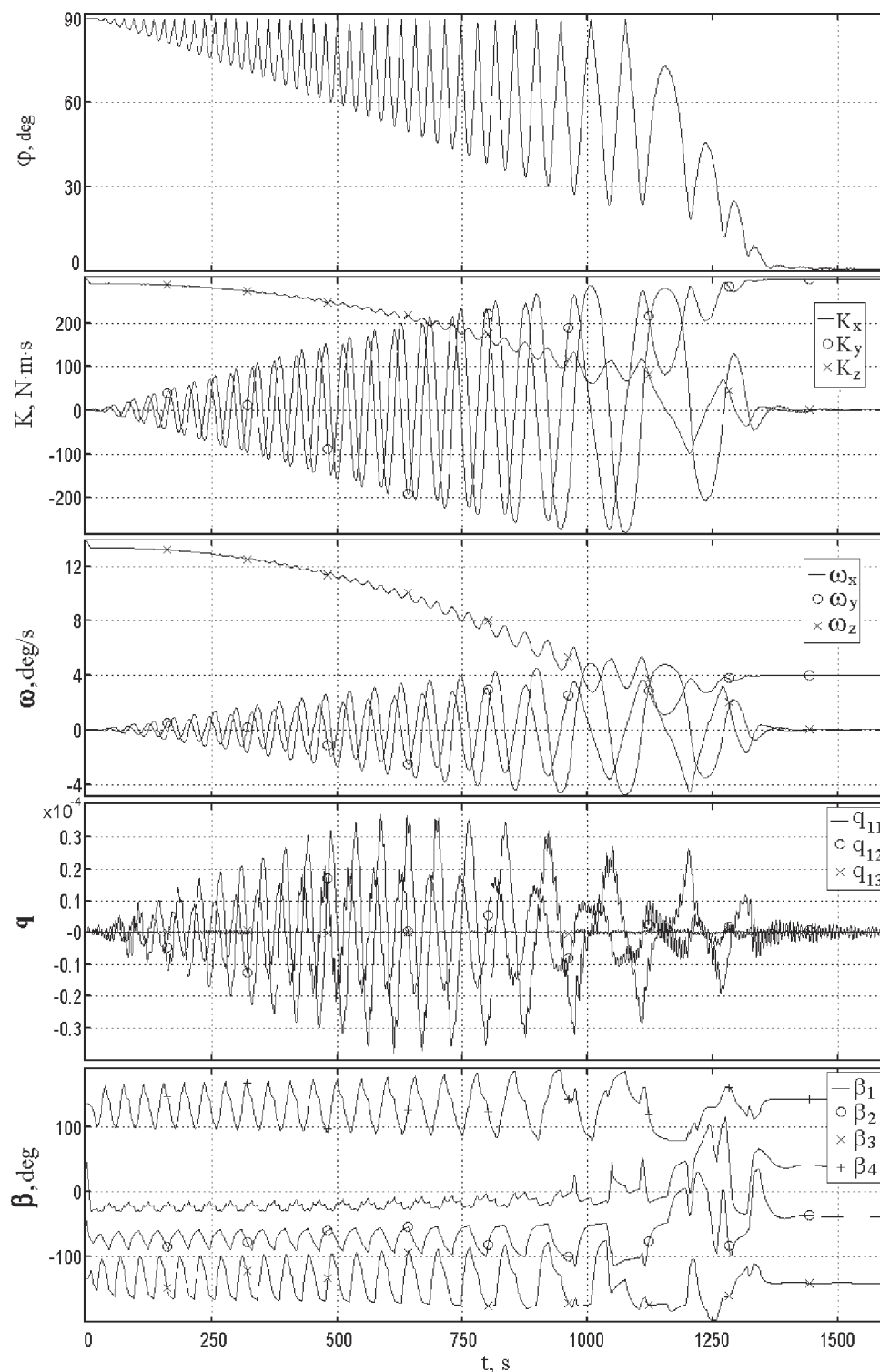


Рис. 6. Перезакрутка упругого КА с помощью SGK на основе 4 гиринов

$$\gamma^s = \pi/4; h_g = 7.5 \text{ Нмс} \text{ и } u^m = 10^\circ/\text{с}.$$

Рис. 5 и рис. 6 представляют полученные результаты по динамике указанной перезакрутки КА как твердого и упругого тела, соответственно. На этих рисунках четко виден асимптотический характер стремления переменных состояния КА и СГК к требуемым значениям при завершении перезакрутки.

При практической реализации предложенного подхода необходимо учитывать, что в общем случае для обеспечения освещенности панелей СБ Солнцем угол γ^p установки их относительно корпуса КА может быть произвольным, следовательно тензор инерции спутника в ССК не будет диагональным. Поэтому при формировании вектора управления СГК необходимо выполнять основные расчеты в главных центральных осях инерции текущей конфигурации конструкции КА с соответствующим пересчетом вектора управления на конкретные исполнительные органы СГК, оси которых зафиксированы в ССК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены принципиальные аспекты нелинейных процессов при перезакрутке спутника для совмещения оси его наибольшего момента инерции с произвольно заданным в ИСК направлением вектора КМ корпуса КА. При этом использованы слабые внутренние управляющие моменты, формируемые СГК с ограниченными ресурсами. Для реализации перезакрутки КА разработан про-

стой нелинейный закон управления СГК, который обеспечивает асимптотическую устойчивость требуемого движения спутника. Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами компьютерной имитации.

Работа поддержана РФФИ (грант 11-08-01037) и отделением ЭМПУ РАН (программа фундаментальных исследований № 14).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Titov G.P., Somov Ye.I., Rayevsky V.A.* Nonlinear dynamics of small-mass gyro-moment AOCS with plasma thrusters for communication satellites // Proceedings of 5th ESA International conference on Guidance, Navigation and Control Systems. Noordwijk: ESTEC. 2003. P. 541-550.
2. *Somov Ye.I., Titov G.P., Butyrin S.A., Rayevsky V.A., Kozlov A.G.* Strongly nonlinear dynamics of a gyrostator respinup by weak control // Proceedings of IEEE / EPCS / IUTAM International conference "Physics and Control". Saint Petersburg: IPME of RAS. 2003. Vol. 1. P. 127-132.
3. *Somov Ye.I., Titov G.P., Butyrin S.A., Rayevsky V.A., Kozlov A.G.* Robust control of a spacecraft respinup by weak internal forces // Proceedings of 16th IEACWorld Congress, Prague. 2005. Oxford: Elsevier Science. P. 1-6. URL: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/29270.html> (дата обращения 11.09.2012).
4. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1961.
5. *Смирнов Е.Я.* Некоторые задачи математической теории управления. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981.
6. *Hall C.D.* Spinup dynamics of gyrostators // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1995. Vol. 18, no. 5. P. 1177-1183.

STABILITY AND NONLINEAR OSCILLATIONS AT A FLEXIBLE SATELLITE RESPINUP BY WEAK INTERNAL TORQUES

Ye.I. Somov

Samara State Technical University
Samara Scientific Centre, Russian Academy of Sciences

Nonlinear processes are considered at a satellite respinup for combining the body angular momentum on its maximum inertia axis with direction of any given unit into inertial reference frame. Moreover the weak internal torques are applied which are formed by gyromoment cluster with bounded resources. For realization of such respinup we synthesized nonlinear control law which ensures asymptotic stability of given satellite motion. Efficiency of suggested approach is confirmed by results of computer imitation.

Key words: spacecraft, attitude gyromoment control, respinup

Yevgeny Somov, Candidate of Technics, Associate Professor, Senior Researcher, Head of Department "Guidance, Navigation and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University, Principle Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Scientific Centre, Russian Academy of Sciences. E-mail: e_somov@mail.ru