

# ДИНАМИКА ГИРОСИЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СПУТНИКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАСТРАИВАЕМОГО ПД-АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ<sup>1</sup>

И.Н. Крутова, В.М. Суханов

Рассмотрены некоторые вопросы компьютерного синтеза параметров настраиваемого пропорционально-дифференциального алгоритма гиросилового управления крупногабаритным упругим спутником, обеспечивающего оптимальное по времени управление ориентацией при наличии инфранизких частот упругих колебаний конструкции. Предложена методика выделения в пространстве параметров модели объекта области таких значений парциальных частот, в которой можно применять упрощенный алгоритм с постоянными коэффициентами без снижения качества управления. Рассмотрена возможность применения адаптивного алгоритма для гиросилового управления упругим спутником с нестационарной моделью.

**Ключевые слова:** деформируемый космический аппарат, математическая модель, гиросиловое управление ориентацией, гиросил.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается режим точной гиросиловой стабилизации углового положения деформируемых космических аппаратов (ДКА). В качестве исполнительного органа системы служит силовой гироскопический комплекс (СГК), содержащий три гиродина (ГД), установленных по схеме плоской трехлучевой звезды [1]. При равенстве по модулю собственных кинетических моментов ГД  $H_k$  ( $k = \overline{1, 3}$  — номер канала стабилизации) каждый из них создает управляющий момент, воздействующий на угловое положение ДКА преимущественно относительно одной («своей») оси, связанной с корпусом системы координат.

Для крупногабаритных спутников связи, относящихся к классу ДКА, низкочастотные упругие колебания конструкции порождают проблему взаимосвязи между колебаниями конструкции и сис-

темой управления основным («жестким») движением космического аппарата (КА), выражающуюся в снижении качества управления, в частности, в ухудшении точности ориентации в заданном направлении и в увеличении времени регулирования. Показано, что по отношению к упругим колебаниям  $q$  система, содержащая гироскопический стабилизатор, остается устойчивой даже при отсутствии управления гиродинами и при нулевом собственном демпфировании колебаний конструкции [1]. Физически это объясняется наличием свойства пассивной гироскопической реакции ГД с моментным приводом по оси прецессии. Действительно, упругие колебания инерционно взаимодействуют с корпусом КА и, благодаря гироскопической связи с ГД, передаются на ось прецессии ГД, где они гасятся в демпфирующем устройстве. Однако демпфирующие свойства пассивной гиросtabilизации колебаний в системе, предназначенной для управления угловым положением спутника, относительно невелики и к тому же существенно зависят от частоты колебаний, ухудшаясь при снижении частот.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-01037).



В работе [1] рассмотрен также ряд вопросов гиросилового управления упругим КА с использованием в качестве закона управления гиродинами дискретного аналога пропорционально-интегрального алгоритма, сформированного на основе сигналов измерения углового положения ДКА. Наличие интегральной составляющей в законе управления приводит в установившемся режиме к накоплению ошибки углового положения по углам прецессии ГД, что вызывает необходимость периодической разгрузки СГК. Выявлено также наличие влияния упругих низкочастотных (0,1–0,3 Гц) колебаний конструкции на устойчивость и качество системы угловой стабилизации ДКА, хотя и не получено конкретных соотношений, определяющих влияние значений частот на выбор параметров системы из условия обеспечения требуемой динамики процессов управления.

С учетом сказанного в предлагаемой нами работе рассматривается возможность использования в качестве закона управления гиродинами дискретного пропорционально-дифференциального (ПД) алгоритма. Решается задача определения значений коэффициентов ПД-алгоритма, обеспечивающих оптимальное по времени регулирование управления ориентацией ДКА при наличии «инфранизких» (0,01–0,1 Гц) частот упругих колебаний его конструкции. Рассматривается возможность применения адаптивной настройки параметров алгоритма в случае плохой определенности или при изменении частот упругих колебаний ДКА в отдельных каналах гиросtabilизации.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАССМАТРИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ

Для конкретности перечисленные задачи без нарушения общности будем рассматривать на примере механической структуры геостационарного спутника «Муссон», характерные значения параметров которой, определяющие коэффициенты математической модели объектов рассматриваемого класса, приведены в работах [1, 2].

Уравнения динамики ДКА с СГК из трех ГД, собранных по схеме типа «звезда», в малой окрестности невозмущенного движения могут быть представлены в следующей скалярной форме [1].

- Уравнения динамики ДКА с ГД по каналу курса:

$$I_{\psi} \ddot{\psi} - H_1 \dot{\beta}_1 + aI_{\beta}[\ddot{\beta}_2 + \ddot{\beta}_3 + a(2\ddot{\psi} + \ddot{\phi} + \ddot{\vartheta}) + \dot{\phi}(\dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_2) - \dot{\vartheta}(\dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_3)] + \tilde{I}_1^{\psi} \ddot{q}_1^{\psi} + \tilde{I}_2^{\psi} \ddot{q}_2^{\psi} = M_{\psi};$$

$$\begin{aligned} I_{\beta} \ddot{\beta}_1 + k_{\beta} \dot{\beta}_1 + k_{\beta} \beta_1 + aI_{\beta}(\ddot{\phi} + \ddot{\vartheta}) + H_1 \dot{\psi} &= \\ &= M_u^{\psi}(u_{\psi}); \\ r_{1\psi} \ddot{\psi} + \ddot{q}_1^{\psi} + \Omega_1^{\psi 2} q_1^{\psi} &= 0; \\ r_{2\psi} \ddot{\psi} + \ddot{q}_2^{\psi} + \Omega_2^{\psi 2} q_2^{\psi} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

- Уравнения динамики ДКА с ГД по каналу крена:

$$\begin{aligned} I_{\phi} \ddot{\phi} - H_2 \dot{\beta}_2 + aI_{\beta}[\ddot{\beta}_1 + \ddot{\beta}_3 + a(2\ddot{\phi} + \ddot{\psi} + \ddot{\vartheta}) + \dot{\vartheta}(\dot{\beta}_2 + \dot{\beta}_3) - \dot{\psi}(\dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_2)] + \tilde{I}_1^{\phi} \ddot{q}_1^{\phi} &= M_{\phi}; \\ I_{\beta} \ddot{\beta}_2 + k_{\beta} \dot{\beta}_2 + k_{\beta} \beta_2 + aI_{\beta}(\ddot{\psi} + \ddot{\vartheta}) + H_2 \dot{\phi} &= M_u^{\phi}(u_{\phi}); \\ r_{1\phi} \ddot{\phi} + \ddot{q}_1^{\phi} + \Omega_1^{\phi 2} q_1^{\phi} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

- Уравнения динамики ДКА с ГД по каналу тангажа:

$$\begin{aligned} I_{\vartheta} \ddot{\vartheta} - H_3 \dot{\beta}_3 + aI_{\beta}[\ddot{\beta}_1 + \ddot{\beta}_2 + a(2\ddot{\vartheta} + \ddot{\psi} + \ddot{\phi}) + \dot{\psi}(\dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_3) - \dot{\phi}(\dot{\beta}_2 + \dot{\beta}_3)] + \tilde{I}_1^{\vartheta} \ddot{q}_1^{\vartheta} &= M_{\vartheta}; \\ I_{\beta} \ddot{\beta}_3 + k_{\beta} \dot{\beta}_3 + k_{\beta} \beta_3 + aI_{\beta}(\ddot{\phi} + \ddot{\psi}) + H_3 \dot{\vartheta} &= M_u^{\vartheta}(u_{\vartheta}); \\ r_{1\vartheta} \ddot{\vartheta} + \ddot{q}_1^{\vartheta} + \Omega_1^{\vartheta 2} q_1^{\vartheta} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3) обозначено:  $(\psi, \phi, \vartheta) \in x$  — углы ориентации корпуса ДКА (каналы: курс  $\psi \doteq x_1$ , крен  $\phi \doteq x_2$ , тангаж  $\vartheta \doteq x_3$ );  $\beta \doteq (\beta_k)$ ,  $k = \overline{1, 3}$  — углы прецессии рамок ГД соответствующих каналов гиросtabilизации;  $q^x = (q_i^x)$ ,  $i = \overline{1, n_x}$  — вектор координат, характеризующих упругие колебания конструкции ДКА по каждому из трех каналов;  $H = (H_1, H_2, H_3)$  — равные по модулю кинетические моменты гиросилового СГК;  $I_x$  — моменты инерции ДКА ( $I_x \gg 2a^2 I_{\beta}$ , где  $a = \cos(\pi/4)$ ,  $I_{\beta}$  — моменты инерции ГД.);  $\tilde{I} = (\tilde{I}_i^x)$ ,  $i = \overline{1, n_x}$  — коэффициенты инерционного влияния упругих элементов конструкции на движение корпуса ДКА в соответствующем канале гиросtabilизации;  $r_i^x = (r_1^x, r_2^x, \dots, r_{n_x}^x)$  — безразмерные элементы, которые определяются в соответствии с правилом  $r_i^x = \tilde{I}_i^x / \tilde{J}_i^x$ , где  $\tilde{J}_i^x$  — моменты инерции упругих элементов конструкции ДКА;  $\Omega^x = (\Omega_1^x, \Omega_2^x, \dots, \Omega_{n_x}^x)$  — парциальные частоты упругих колебаний ДКА в соответствующих каналах управления (от-

метим, что уравнения колебаний упругих солнечных батарей для КА «Муссон» учитывают четыре основных тона, два из которых ( $q_1^\psi$  и  $q_2^\psi$ ) влияют на динамику канала курса, а в каналах крена и тангажа учитывается по одному тону колебаний ( $q_1^\phi$  и  $q_1^\theta$  соответственно);  $M_x$  — возмущающие моменты;  $M_u^x(u_x)$  — управляющие моменты, прикладываемые относительно осей рамок ГД;  $u_x$  — алгоритм управления соответствующим гироскопом.

Из уравнений (1)–(3) видно, что все каналы гиросtabilизации даже в рамках линеаризованной модели являются взаимосвязанными, причем структура взаимосвязей обусловлена как инерционными, так и гироскопическими влияниями.

Для измерения углов ориентации  $x = (\psi, \phi, \theta)$  используется дискретная система определения углового положения КА с периодом квантования  $T_q$ . Кусочно-непрерывные управления гиродинами фиксируются на каждом периоде управления  $T_0$ , который выбирается кратным периоду  $T_q$  так, что  $n_q = T_0/T_q$  — целое число (для определенности примем  $T_0 = 4$  с,  $T_q = 0,25$  с). Для обработки измерений на  $j$ -м периоде управления воспользуемся следующей процедурой осреднения координаты:

$$\bar{x}_j = n_q^{-1} \sum_{v=1}^{n_q} x_v, \quad x_v = x(vT_q). \quad (4)$$

В отличие от работы [1], где применяется алгоритм управления гиродинами в виде дискретного аналога изодромного звена, в качестве закона управления рассмотрим возможность и особенности применения для управления гиродинами в режиме стабилизации ДКА ПД-алгоритма адаптивного типа (с перестраиваемыми коэффициентами) [3]:

$$u_x(jT_0) = -[k_1^x \bar{x}_j(jT_0) + k_2^x \Delta \bar{x}_j(jT_0)], \quad (5)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots; \quad x = (\psi, \phi, \theta),$$

где  $\Delta \bar{x}_j$  — первая разность,  $\bar{x}_j$  вычисляется согласно выражению (4);  $k_{2k}$  — настраиваемый коэффициент, значение которого определяется на основании приведенного далее решения задачи оптимизации по критерию  $Q_k$ , минимизирующему время  $t_k^*$  регулирования в  $k$ -м канале (при переориентации ДКА), которое в числе прочего зависит от текущего значения частоты  $\Omega_i^x$ , как правило, низшей ( $i = 1$ ) упругой моды

$$Q_x = t_x^*(k_{2x}, \Omega_i^x) \rightarrow \min_{k_{2x} = \text{var}, \Omega_i^x = \text{const}}, \quad (6)$$

$$x = (\psi, \phi, \theta).$$

## 2. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ ДКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ

Показано, что в силу малости величины  $aI_\beta$  ( $\approx 0,25$ ) по сравнению с моментом инерции ДКА  $I_x$  ( $\approx 10^4$ ) перекрестными инерционными влияниями движений ГД в первом приближении можно пренебречь [1]. Это позволяет декомпозировать систему (1)–(3) на три подсистемы, соответствующие изолированным каналам гиросtabilизации:

$$I_x \ddot{x} + \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{I}_i^x \ddot{q}_i^x - H\dot{\beta} = M_x; \quad (7)$$

$$I_\beta \ddot{\beta} + k_\beta \dot{\beta} + H\dot{x} = M(u_x);$$

$$t_{ix} \ddot{x} + \ddot{q}_i^x + \Omega_i^{x2} q_i^x = 0, \quad i = \overline{1, n_x},$$

где  $n_x$  — число учитываемых в данном канале упругих мод.

Предварительно решим задачу начального синтеза базовых значений коэффициентов алгоритма (5) на основе одноканальной системы (7) без учета упругости конструкции. При этом уравнения (7) принимают вид

$$I_x \ddot{x} - H\dot{\beta} = M_x, \quad (8)$$

$$I_\beta \ddot{\beta} + k_\beta \dot{\beta} + H\dot{x} = M(u_x).$$

Характеристическое уравнение этой системы при ее замыкании отрицательной обратной связью (5), формирующей управляющий момент  $M(u_x) = -k_0^x (k_1^x x + k_2^x \dot{x})$ , прикладываемый к рамке ГД, без учета дискретной фильтрации измеряемых углов ориентации записывается в виде операционного уравнения

$$D(s) = s(s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0) = 0, \quad (9)$$

где  $s$  — переменная преобразования Лапласа и

$$a_2 = k_\beta / I_\beta, \quad a_1 = H(H + k_0^x k_2^x) / I_x I_\beta, \quad (10)$$

$$a_0 = H k_0^x k_1^x / I_x I_\beta.$$

В этом случае условие устойчивости по угловой скорости  $\dot{x}$  для системы (8), полученное на основе уравнения (9) с учетом формул (10), имеет вид

$$k_\beta (H + k_0^x k_2^x) > I_\beta k_0^x k_1^x. \quad (11)$$

Известным преобразованием [4]  $s = y\sqrt[3]{a_0}$  уравнение (9) приводится к виду

$$D(y) = y^3 + b_2 y^2 + b_1 y + 1 = 0, \quad (12)$$



где  $b_2 = a_2/\sqrt[3]{a_0}$ ,  $b_1 = a_1/\sqrt[3]{a_0^2}$  — параметры Вышнеградского.

Степень устойчивости  $\eta_s^x$  исходного характеристического уравнения (9), определяющая время переходного процесса в системе (8) (для канала  $x = (\psi, \varphi, \vartheta)$ ), связана со степенью устойчивости  $\eta_y$  уравнения (12) соотношением

$$\eta_s^x = \eta_y \sqrt[3]{a_0}, \quad (13)$$

где  $\eta_y$  определяется из решения уравнения [4]

$$\eta_y^3 - b_2 \eta_y^2 + b_1 \eta - 1 = 0.$$

Далее синтез параметров ПД-алгоритма (5) для исходной трехканальной модели с учетом низкочастотных упругих колебаний конструкции ДКА будем осуществлять на основе компьютерного моделирования уравнений (1)–(3), описывающих динамику пространственного углового движения ДКА с силовым гироскомплексом из трех гиросилов. Для этого введем числовые значения параметров механической структуры ДКА и параметров СГК в соответствии с приведенными в работах [1, 2] данными для крупногабаритного спутника связи «Муссон»:  $I_\psi = 48\,100 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $I_\varphi = 7700 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $I_\vartheta = 52\,600 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $\tilde{I}_1^\psi = 1630 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $\tilde{I}_2^\psi = 9941 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $\tilde{I}_1^\varphi = 4285 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $\tilde{I}_1^\vartheta = 6130 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $r_{1\psi} = r_{11} = 1$ ,  $r_{2\psi} = r_{21} = 2,32$ ,  $r_{3\varphi} = r_{32} = 1$ ,  $r_{4\vartheta} = r_{43} = 1$ ; остальные  $\tilde{I}_{ix_k}$ ,  $r_{ix_k} = 0$ ;  $H_k = 170 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ ,  $I_\beta = 0,36 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $k_\beta = 0,12 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{рад}$ ,  $k_\beta = 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{рад}$ ;  $a = \cos(\pi/4) = 0,707$  — параметр СГК типа «звезда». Парциальные частоты колебаний, распределенных по каналам системы в соответствии с уравнениями (1)–(3), составляют:  $\Omega_1^\psi \doteq \Omega_{\min} = 2\pi(0,01 \div 0,1 \text{ Гц})$ ,  $\Omega_2^\psi = 1,74\Omega_1^\psi$  — парциальные частоты колебаний в канале курса,  $\Omega_1^\varphi = 1,04\Omega_1^\psi$  — частота колебаний в канале крена,  $\Omega_1^\vartheta = 1,13\Omega_1^\psi$  — аналогичный параметр в канале тангажа. Величину  $f_{\min} = \Omega_{\min}/(2\pi)$  условно назовем «опорной» частотой ДКА.

Используя приведенные числовые значения соответствующих параметров модели (8) и полученные выше условие устойчивости (11) и выражение (13), позволяющее установить допустимое время регулирования (для жесткого КА)  $\bar{t}_p$ , выраженное через параметры уравнения (9) соотношением  $\bar{t}_p = 3/\eta_s^x$ , получим в итоге исходные (номиналь-

ные) значения коэффициентов базового ПД-алгоритма в каждом из каналов управления. В частности, для каналов курса и тангажа с близкими значениями моментов инерции  $I_\psi \approx I_\vartheta$  было получено:

$\bar{k}_0^{\psi, \vartheta} = 2$ ,  $\bar{k}_1^{\psi, \vartheta} = 20$ ,  $\bar{k}_2^{\psi, \vartheta} = 150$ . Соответствующие расчеты для канала крена дали:  $\bar{k}_0^\varphi = 2$ ,  $\bar{k}_1^\varphi = 15$ ,  $\bar{k}_2^\varphi = 130$ . Черта над коэффициентами указывает, что их значения получены без учета упругости конструкции КА.

Процедуру компьютерного синтеза будем осуществлять отдельно по каждому каналу с последующей проверкой методами моделирования «устойчивости» полученных результатов по отношению к возмущениям со стороны других каналов пространственной системы гиросtabilизации углового положения ДКА, заданной уравнениями (1)–(3).

Показано, что время регулирования в системах управления ориентацией ДКА в общем случае зависит от частоты упругих колебаний конструкции, особенно в низкочастотной области, заметно увеличиваясь при понижении частоты колебаний [3].

*Поставим задачу поканального параметрического синтеза ПД-алгоритма системы гиросtabilизации ДКА с низкочастотным спектром упругих колебаний конструкции.*

Пусть минимальная частота упругих колебаний ДКА, соответствующая частоте колебаний в канале курса  $\Omega_{\min}^\psi \doteq \Omega_1^\psi$ , пошагово, с интервалом дискретности  $\Delta_\Omega = 0,0628 \text{ с}^{-1}$  (или  $\Delta_f = 0,01 \text{ Гц}$ ), изменяется в пределах  $2\pi(0,1 \div 0,01 \text{ Гц})$ . Парциальные частоты колебаний ДКА в остальных каналах управления также изменяются соответствующим образом по соотношениям  $\Omega_i^x = k_x \Omega_{\min}^\psi$ , приведенным выше. Зададим начальное состояние системы (1)–(3) в виде:

$$x(0) = 0,017 \text{ рад}; \quad \dot{x}(0) = 0; \quad \beta_x(0) = \dot{\beta}_x(0) = 0; \\ q_i^x(0) = \dot{q}_i^x(0) = 0; \quad x = (\psi, \varphi, \vartheta).$$

Определяя время регулирования  $t_x^*$  известным образом [4]:  $|x(t) - x_\infty| \leq \Delta_x$ ,  $t \geq t_x^*$ , выберем требуемую точность ориентации ДКА в виде 5 % от установившегося значения так, что  $\Delta_x = 5 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$ . При выбранных ранее базовых значениях параметров ПД-алгоритма (5) ( $\bar{k}_1^x, \bar{k}_2^x = \text{const}$ ) время регулирования  $t_x^*$ , изменяясь при изменении значений частот колебаний  $\Omega_i^x$ , в общем случае не является оптимальным.

Зафиксируем для всей области изменения частот первый коэффициент базового алгоритма  $\bar{k}_1^x = \text{const}$ , оставив свободным выбор второго коэффициента  $k_2^x = \text{var}$ .

Решаемая задача состоит в компьютерном поиске для каждого текущего ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) набора значений парциальных частот ( $\Omega_{\min} = 2\pi f_{\min}$ ,  $\Omega_i^x = k_x \Omega_{\min}$ ) $_n$  такого оптимального значения ( $k_2^x = k_{2\text{опт}}^x$ ) $_n$ , которое в соответствии с критерием (6) обеспечивает для « $n$ -го ДКА» минимальное время регулирования ( $t_x^*$ ) $_n = \min$ ,  $x = (\psi, \varphi, \vartheta)$ .

Результаты решения задачи методами компьютерного моделирования частично приведены в таблице.

В качестве аргумента (варьируемого параметра) здесь принята низшая парциальная частота упругого элемента в канале курса  $f_1^\psi = \Omega_{\min}/(2\pi)$ , которая (в совокупности с зависящими от нее частотами колебаний в других каналах) определяет частотные свойства ДКА на  $n$ -м этапе моделирования ( $n = 1, \dots, 10$ ). В результате поканальной реализации каждого этапа путем вариации коэффициентов алгоритма (5)  $k_2^x = \text{var}$ ,  $x = (\psi, \varphi, \vartheta)$ , отыскиваются их оптимальные значения ( $k_2^x = k_{2\text{опт}}^x$ ) $_n$  (см. табл.), обеспечивающие минимальное время регулирования в соответствующих изолированных каналах гиросtabilизации  $t_{x\min}^*$ . Из таблицы видно, что оптимальные значения коэффициентов  $k_{2\text{опт}}^\psi(f_{\min})$  и  $k_{2\text{опт}}^\vartheta(f_{\min})$  по каналам курса и тангажа в рассматриваемом диапазоне изменения «опорной» частоты  $f_{\min}$  практически совпадают, что объясняется относительной близостью моментов инерции ДКА и парциальных частот в этих ка-

налах. Заметное отличие ( $\sim 15\%$ ) коэффициента  $k_{2\text{опт}}^\varphi(f_{\min})$  в канале крена вызвано более чем пятикратным отличием момента инерции КА по данному каналу. В таблице также содержится информация о времени затухания  $t_{q_i}^{*x}$  упругих колебаний

$q_i^x$ , возбуждаемых управляющими моментами гиросtabilизатора при переориентации ДКА.

Как показали исследования, в области пониженных значений рассматриваемого диапазона частот  $\Omega_{\min} = 2\pi(0,1 \div 0,01 \text{ Гц})$ , время затухания упругих колебаний значительно превышает время регулирования по углам ориентации, т. е.  $t_{q_i}^{*x} \gg t_{x\min}^*$ , что в отдельных случаях может считаться недостатком рассматриваемого способа управления.

В качестве примера на рис. 1 представлены переходные процессы в соответствующих каналах гиросtabilизации ДКА при  $k_2^x = k_{2\text{опт}}^x$  для случая  $f_{\min} = 0,03 \text{ Гц}$ , которому в приведенной таблице соответствует состояние  $n = 3$ .

Из графиков видно, что время гашения упругих колебаний существенно превышает реализованное оптимальным управлением (5) время регулирования ( $t_{x\min}^* \leq 170 \text{ с}$ ) по углам ориентации. В некоторых случаях такое «вялотекущее» демпфирование колебаний по тем или иным соображениям может оказаться неприемлемым, вследствие чего должна решаться дополнительная задача повышения эффективности управления колебаниями, которая в данной работе не затрагивается.

В соответствии с данными таблицы на рис. 2 построены графики оптимальных значений коэффициентов  $k_{2\text{опт}}^\varphi$  и  $k_{2\text{опт}}^\vartheta$ , минимизирующих время регулирования в каналах крена и тангажа при из-

Некоторые результаты моделирования

$n$	$f_{\min} = \frac{\Omega_{\min}}{2\pi}, \text{ Гц}$	$k_{2\text{опт}}^\psi$	$t_{\psi\min}^*, \text{ с}$	$t_{q_1}^{*\psi}, \text{ с}$	$t_{q_2}^{*\psi}, \text{ с}$	$k_{2\text{опт}}^\varphi$	$t_{\varphi\min}^*, \text{ с}$	$t_{q_1}^{*\varphi}, \text{ с}$	$k_{2\text{опт}}^\vartheta$	$t_{\vartheta\min}^*, \text{ с}$	$t_{q_1}^{*\vartheta}, \text{ с}$
1	0,01	400	373	Более 1000	900	319	154	Более 1000	390	158	Более 1000
2	0,02	300	300	1200	573	253	126	1100	305	225	1200
3	0,03	225	110	950	219	197	117	970	235	170	840
4	0,04	170	92	900	93	155	145	700	187	130	650
5	0,05	150	75	860	72	128	140	596	150	115	510
6	0,06	135	72	810	65	109	125	460	128	100	320
7	0,07	105	70	760	46	95	91	307	112	90	199
8	0,08	100	67	650	41	87	73	220	105	81	160
9	0,09	97	63	540	38	83	69	150	100	70	135
10	0,1	95	59	429	33	81	64	126	97	60	112

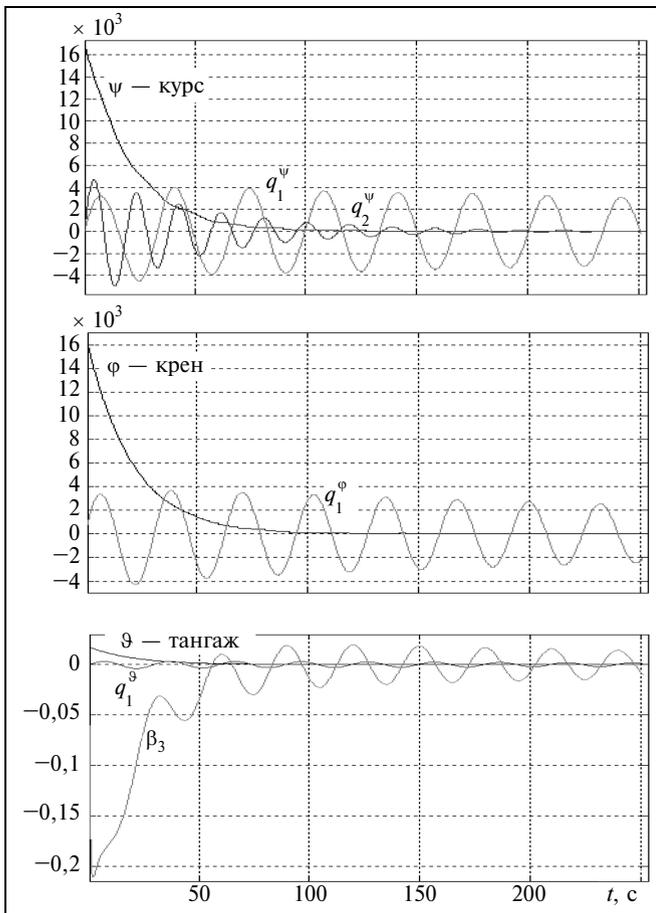


Рис. 1. Переходные процессы при ПД-алгоритме гиросилового трехканального управления ДКА

менении соответствующих парциальных частот колебаний ДКА, связанных с изменяющимся значением «опорной» частоты  $f_{min}$ .

### 3. ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ ДКА С АДАПТИВНЫМ ПД-АЛГОРИТМОМ

В работе [3] показано, что зависимость типа  $k_2^x = k_{2opt}^x(f_{min})$  может быть использована для адаптивной настройки соответствующего параметра алгоритма (5) при управлении ДКА с изменяющимся в изолированных каналах спектром частот. Такое поканальное изменение частот упругих колебаний возникает, например, вследствие вращения нежестких панелей солнечных батарей в процессе отслеживания ими направления на солнце.

Для подтверждения целесообразности применения адаптивного управления в этом случае были проведены дополнительные исследования динамики гиросилового управления ориентацией ДКА в канале тангажа при использовании в качестве закона управления гиродинами ПД-алгоритма (5) с

постоянными коэффициентами  $\bar{k}_0^g = 2, \bar{k}_1^g = 20$  при двух альтернативных фиксированных значениях коэффициента  $\bar{k}_2^g = 150$  и  $\bar{k}_2^g = 0$ .

Результаты компьютерного исследования для двух указанных случаев в виде графиков зависимости времени регулирования от изменяющейся частоты упругих колебаний приведены на рис. 3. В обоих случаях наблюдается резкое увеличение времени регулирования при попадании в область

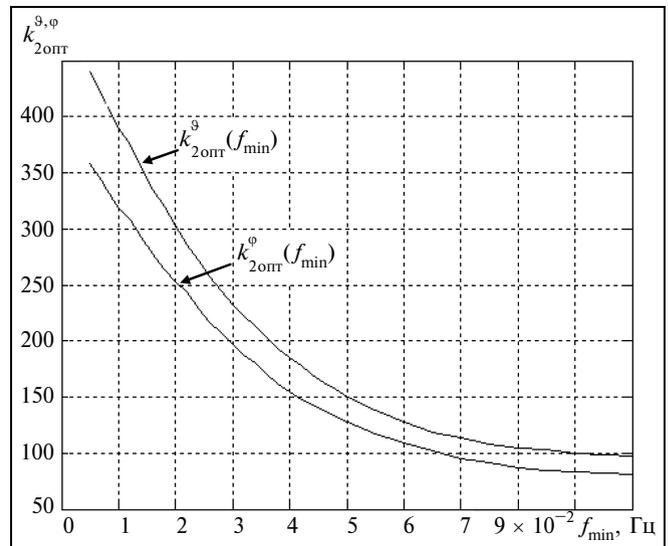


Рис. 2. График зависимости коэффициентов  $k_{2opt}^x$  от частоты упругих колебаний

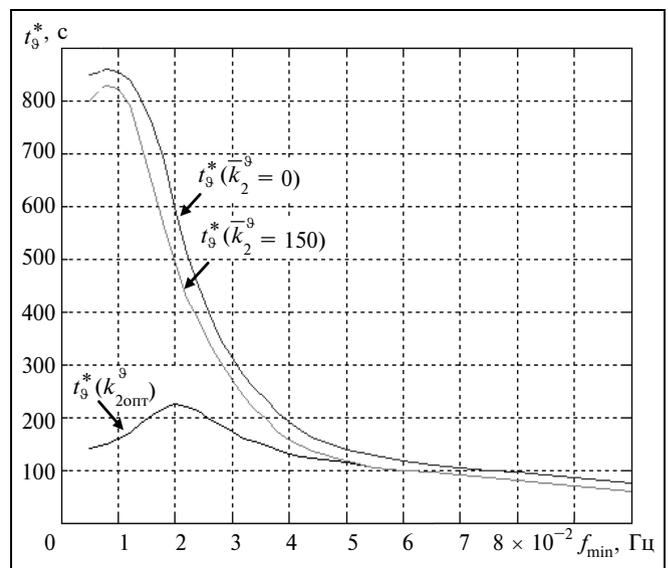
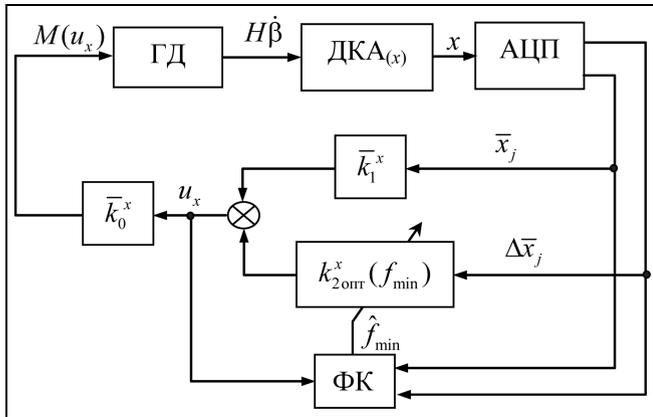


Рис. 3. Графики зависимости времени регулирования от частоты упругих колебаний в канале тангажа для трех типов алгоритма



**Рис. 4.** Структурная схема адаптивной системы изолированного канала гиросtabilизации ДКА: АЦП — аналого-цифровой преобразователь сигнала датчика угла ориентации ДКА;  $\hat{f}_{\min}$  — оценка текущего значения изменяющейся «опорной» частоты ДКА на выходе фильтра Калмана ФК, используемая для настройки коэффициента  $k_2^x$

пониженных значений частот упругих колебаний ( $f_{\min} < 0,05$  Гц). Присутствующий на рисунке третий график  $t_9^*(k_{2\text{опт}}^g)$  будет пояснен далее.

Для устранения указанного недостатка в любом из каналов гиросtabilизации используем предложенную в работе [3] процедуру адаптивной настройки коэффициента  $k_2^x$ ,  $x = (\psi, \varphi, \vartheta)$  при изменении частоты  $f_{\min}$ , используя найденную ранее зависимость  $k_{2\text{опт}}^x(f_{\min})$  (см. табл. и рис. 2). Подсистема настройки коэффициента  $k_2^x$  в общем случае содержит фильтр Калмана, используемый для идентификации текущего значения частоты  $f_{\min}$  [5]. Структурная схема изолированного канала гиросtabilизации ДКА с контуром адаптивной настройки коэффициента  $k_2^x$  алгоритма (5) приведена на рис. 4.

Результаты моделирования динамики системы гиросtabilизации с настраиваемым указанным образом ПД-алгоритмом управления гиродином на примере канала тангажа представлены на рис. 3 в виде графика зависимости времени регулирования от изменяющейся частоты  $t_9^*(k_{2\text{опт}}^g)$ . Видно, что в области относительно высоких частот  $f_{\min} \geq 0,05$  Гц все три типа алгоритма реализуют примерно одинаковое время регулирования по координате  $\vartheta$ . При управлении ДКА в области низких частот  $f_{\min} < 0,05$  Гц адаптивный алгоритм обеспечивает заметно более высокое

качество управления по времени регулирования  $t_9^*(f_{\min})_{k_{2\text{опт}}^g} \ll t_9^*(f_{\min})_{k_2^g = \text{const}} \quad \forall f_{\min} < 0,05$  Гц.

Компьютерные исследования динамики двух других каналов гиросtabilизации углов  $\psi$  и  $\varphi$  показали, что выявленные положительные свойства применения настраиваемого ПД-алгоритма сохраняются и в этих каналах, а, следовательно, и при управлении полным движением ДКА, описываемым моделью (1)–(3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили возможность применения ПД-алгоритма в качестве закона управления в режиме гиросиловой стабилизации крупногабаритных спутников с ограниченной жесткостью конструкции. Особенно эффективен данный алгоритм при гиродинном управлении нежесткими спутниками с инфранизкими частотами упругих колебаний, хотя при этом требуется усложнение исходного ПД-алгоритма, заключающееся в необходимости введения процедуры настройки его коэффициента при квазипроизводной (первой разности) регулируемой координаты. Такой усложненный алгоритм целесообразно применять в качестве адаптивного в задачах управления ориентацией деформируемых спутников с изменяющимся спектром низкочастотных упругих колебаний конструкции

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сомов Е.И. Динамика многократной цифровой системы пространственной гиросиловой стабилизации упругого космического аппарата // Динамика и управление космическими объектами: сб. науч. тр. — Новосибирск, 1992. — С. 46–76.
2. Космические аппараты космодрома «Плесецк» серии «Муссон» // Инф. бюлл. пресс-центра космодрома «Плесецк». — 1994. — № 39. URL: [www.plesetzk.ru/index.php?d=doc/inf&p=inf039](http://www.plesetzk.ru/index.php?d=doc/inf&p=inf039) (дата обращения 14.08.2012).
3. Крутова И.Н., Суханов В.М. Адаптивный алгоритм управления ориентацией крупногабаритных информационных спутников с изменяющимися параметрами // Проблемы управления. — 2011. — № 5. — С. 74–81.
4. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Ч. 1. — М.-Л.: Энергия, 1965.
5. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Идентификация нестационарных параметров мод упругих колебаний деформируемых космических аппаратов // Тр. 11-й междунар. конф. «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» / ИПУ РАН. — М., 2010. — С. 121–123.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

**Крутова Инесса Николаевна** — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-87-79,

**Суханов Виктор Миньонович** — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-87-79, ✉ suhv@ipu.ru, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.