

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ ГИРОСИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫМ УПРУГИМ СПУТНИКОМ ДЛЯ ТРЕХ ТИПОВ БАЗОВЫХ АЛГОРИТМОВ<sup>1</sup>

И.Н. Крутова, В.М. Суханов

Представлены полученные методами компьютерного моделирования некоторые результаты сравнительного анализа качества переходных процессов углового движения крупногабаритного спутника с низкочастотными упругими колебаниями конструкции для трех видов законов управления в системе пространственной гиросиловой стабилизации спутника: пропорционального, пропорционально-дифференциального и пропорционально-интегрального. Определены области предпочтительного применения того или иного алгоритма управления (по критерию минимума времени регулирования) в варьируемом пространстве низшей частоты спектра упругих колебаний конструкции.

**Ключевые слова:** деформируемый космический аппарат, гиросиловая стабилизация, алгоритмы управления.

## ВВЕДЕНИЕ

При управлении крупногабаритными упругими спутниками, относящимися к классу деформируемых космических аппаратов (ДКА), в режиме стабилизации углового положения возникают упругие колебания конструкции, низшая частота которых для больших космических конструкций (БКК) может оказаться близкой к частоте процессов управления. При этом демпфирование упругих колебаний системой управления ухудшается, что в целом приводит к снижению степени устойчивости и, соответственно, к увеличению времени регулирования в переходных режимах [1–3].

В современных системах управления ориентацией космических аппаратов (КА) в качестве исполнительных органов, как правило, применяются гиросины (ГД), представляющие собой двухстепенные силовые гироскопы с моментными приво-

дами по осям прецессии [1]. Известно, что по отношению к упругим колебаниям система, содержащая силовой гироскопический комплекс с той или иной схемой установки гиродинамов, сохраняет устойчивость даже при отсутствии управления гиродинами и при нулевом собственном демпфировании колебаний конструкции. Физически это объясняется свойством пассивной гироскопической реакции ГД, наличие которого приводит к тому, что упругие колебания, инерционно взаимодействуя с корпусом КА, передаются на ось прецессии ГД и далее гасятся в его демпфирующем устройстве. Однако демпфирующие свойства пассивной гиросtabilизации упругих колебаний в системе, изначально предназначенной для управления угловым положением КА, являются несущественными и к тому же заметно ухудшаются при снижении частот.

Динамика пространственного углового движения ДКА с активной (управляемой) гиросиловой системой стабилизации указанного типа в малой окрестности невозмущенного движения описывается линеаризованными уравнениями вида [1]:

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



- боковое движение, включающее в себя:
  - канал курса ( $\alpha_1 \doteq \psi$ )

$$\dot{\alpha}_1 = \omega_1 + \omega_0 \alpha_2,$$

$$\begin{aligned} & J_x \dot{\omega}_1 + aJ_G(\ddot{\beta}_2 + \ddot{\beta}_3) + d_{xx} \ddot{q}_{xx} + d_{xy} \ddot{q}_{xy} - \\ & - H\dot{\beta}_1 + (J_z - J_y)\omega_0\omega_2 - aJ_G\omega_0(\dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_2) + \\ & + \omega_0 d_{yy} \dot{q}_{yy} + H\omega_0 \beta_2 = M_x, \\ & aJ_G(\dot{\omega}_2 + \dot{\omega}_3) + J_G \ddot{\beta}_1 + H\omega_1 + Ha\omega_0 \beta_1 = \\ & = M_{u1}^G(u_1) - k_D \dot{\beta}_1, \\ & d_{xx} \ddot{\omega}_1 + \ddot{q}_{xx} + (\Omega_1^\Psi)^2 q_{xx} = 0, \\ & d_{xy} \ddot{\omega}_1 + \ddot{q}_{xy} + (\Omega_2^\Psi)^2 q_{xy} = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

- канал крена ( $\alpha_2 \doteq \psi$ )

$$\dot{\alpha}_2 = \omega_2 + \omega_0 \alpha_1,$$

$$\begin{aligned} & J_y \dot{\omega}_2 + aJ_G(\ddot{\beta}_1 + \ddot{\beta}_3) + d_{yy} \ddot{q}_{yy} - H\dot{\beta}_2 + \\ & + (J_x - J_z)\omega_0\omega_1 - aJ_G\omega_0(\dot{\beta}_2 + \dot{\beta}_3) + \\ & + \omega_0(d_{xx} \dot{q}_{xx} + d_{xy} \dot{q}_{xy}) - H\omega_0 \beta_1 = 3\omega_0^2(J_x - z)\alpha_2 + M_y, \\ & aJ_G(\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_3) + J_G \ddot{\beta}_2 + H\omega_2 + Ha\omega_0 \beta_2 = \\ & = M_{u2}^G(u_2) - k_D \dot{\beta}_2, \\ & d_{yy} \ddot{\omega}_2 + \ddot{q}_{yy} + (\Omega_1^\Phi)^2 q_{yy} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

- движение по каналу тангажа ( $\alpha_3 \doteq \vartheta$ ):

$$\dot{\alpha}_3 = \omega_3 - \omega_0,$$

$$\begin{aligned} & J_z \dot{\omega}_3 + aJ_G(\ddot{\beta}_1 + \ddot{\beta}_2) + d_{zz} \ddot{q}_{zz} - H\dot{\beta}_3 = \\ & = 3\omega_0^2(J_x - J_y)\alpha_3 + M_z, \\ & aJ_G(\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2) + J_G \ddot{\beta}_3 + H(\omega_3 + \omega_0) = \\ & = M_{u3}^G(u_3) - k_D \dot{\beta}_3, \\ & d_{zz} \ddot{\omega}_3 + \ddot{q}_{zz} + (\Omega_1^\Theta)^2 q_{zz} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\alpha = (\alpha_1 \doteq \psi, \alpha_2 \doteq \psi, \alpha_3 \doteq \vartheta)$  — вектор углов ориентации;  $\omega = (\omega_j), j = \overline{1, 3}$  — вектор абсолютной угловой скорости;  $\omega_0$  — угловая скорость орбитального движения ДКА;  $q = (q_{xx}, q_{xy}, q_{yy}, q_{zz})$  — вектор координат, характеризующий упругие колебания конструкции;  $\Omega_1 = \Omega_1^\Psi, \Omega_2 = \Omega_2^\Psi, \Omega_3 = \Omega_1^\Phi$ ,

$\Omega_4 = \Omega_1^\Theta$  — парциальные частоты упругих колебаний, из которых  $\Omega_1 = \Omega_1^\Psi$  является минимальной, а остальные частоты связаны с частотой  $\Omega_1$  определенными коэффициентами пропорциональности ( $k_{\Omega_i} > 1$ ); собственное демпфирование упругих колебаний считается отсутствующим;  $J_x, J_y, J_z$  — моменты инерции ДКА относительно соответствующих осей связанной системы координат;  $q_{xx}, q_{xy}, q_{yy}, q_{zz}$  — коэффициенты взаимодействия колебаний упругих элементов конструкции и движений корпуса ДКА;  $\beta \doteq (\beta_j), j = \overline{1, 3}$  — углы прецессии рамок ГД соответствующих каналов гиросtabilизации;  $J_G$  — момент инерции гиродина относительно оси подвеса;  $H$  — кинетический момент ГД;  $k_D$  — коэффициент демпфирования по оси подвеса ГД;  $a = \cos(\pi/4)$  — коэффициент, характеризующий кинематическую структуру установки трех ГД по схеме «звезда» [1];  $M_{uj}^G(u_j), j = \overline{1, 3}$  — управляющие моменты, прикладываемые относительно осей рамок ГД;  $u_j$  — алгоритм управления соответствующим гиродином. Управляющие динамические моменты по осям вращения рамок ГД для простоты можно представить в виде  $M_{uj}^G = u_j$ . В малой окрестности невозмущенного движения для управляемой системы (1)–(3) можно принять  $M_x = M_y = M_z = 0$ .

В работе [1] на основе уравнений (1)–(3) рассмотрен ряд вопросов гиросилового управления упругим КА при использовании в качестве закона управления гиродинами дискретного аналога пропорционально-интегрального (ПИ) алгоритма, сформированного на основе сигналов измерения углового положения ДКА. В рамках одноканальной модели, получаемой из (1)–(3) в предположении  $\omega_j \gg \omega_0 \approx 0, j = \overline{1, 3}$ , и без учета упругости объекта, проведен аналитический выбор параметров ПИ-алгоритма управления ГД, принимаемых за базовые и корректируемых далее с учетом упругих колебаний конструкции на основе численного моделирования полных уравнений (1)–(3). Замечено, что в рассматриваемом диапазоне парциальных частот  $\Omega_1 = 2\pi\tilde{f}_1, \tilde{f}_1 = (0,1 \div 0,05)$  Гц при дискретном управлении  $M_{uj}^G = u_j, j = \overline{1, 3}$ , возникают затруднения в обеспечении требуемой степени устойчивости замкнутой системы, вызванные эффектом транспонирования частот [1].

В работах [2, 3] на примере рассмотрения той же модели (1)–(3) исследовалась возможность использования в качестве базового закона управления гиродинами дискретного аналога пропорционально-дифференциального (ПД) алгоритма. Было выявлено, что в указанной области пониженных значений частот время затухания упругих колебаний может значительно превышать время регулирования по углам ориентации, что следует считать определенным недостатком прямого применения ПД-алгоритма управления гиродинами в задаче гиросиловой стабилизации ДКА. Для устранения этого недостатка в работе [2] была введена процедура оптимальной коррекции значений коэффициентов ПД-алгоритма, минимизирующая время гашения упругой низкочастотной моды с фиксированной парциальной частотой, а в работе [3] предложена подсистема дополнительной гиросtabilизации слабозатухающих низкочастотных колебаний.

В настоящей работе методами математического моделирования осуществляется сравнительный анализ динамики указанных типов алгоритмов управления (а также пропорционального (П) алгоритма) гиросиловыми системами стабилизации углового положения крупногабаритных КА с инфранизкими ( $\tilde{f}_1 \leq 0,05$  Гц) частотами упругих колебаний конструкции. Цель исследования заключается в выявлении областей оптимального применения того или иного алгоритма управления в пространстве значений низкочастотного спектра упругих колебаний крупногабаритного ДКА.

## 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Учитывая, что решение поставленной задачи далее реализуется на основе методов компьютерного моделирования, введем числовые значения параметров механической структуры ДКА и параметров ГД в соответствии с приведенными в работе [1] данными для крупногабаритного ДКА с низкочастотным спектром упругих колебаний конструкции:  $J_x = 47\,000 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $J_y = 7000 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $J_z = 52\,000 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $d_{xx} = 142 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $d_{xy} = -56 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $d_{yy} = 58 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ,  $d_{zz} = 152 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $H = 170 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ ;  $J_G = 0,36 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $k_D = 2 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{рад}$ .

Парциальные частоты колебаний, распределенных по каналам системы в соответствии с уравнениями (1)–(3):  $\Omega_1^\psi \doteq \Omega_{\min} = 2\pi(0,005 \div 0,05 \text{ Гц})$ ,  $\Omega_2^\psi = 1,74\Omega_1^\psi$  — парциальные частоты колебаний в канале курса,  $\Omega_1^\phi = 1,04\Omega_1^\psi$  — частота колебаний в канале крена,  $\Omega_1^\theta = 1,13\Omega_1^\psi$  — парциальная частота колебаний в канале тангажа.

Для измерения углов ориентации  $\alpha = (\psi, \phi, \theta)$  используется дискретная система определения углового положения КА с периодом квантования  $T_q$ . Кусочно-непрерывные управления гиродинами фиксируются на каждом периоде управления  $T_u$ , которое выбирается кратным  $T_q$  так, что  $n_q = T_u/T_q$  — целое число (для определенности примем  $T_u = 4 \text{ с}$ ,  $T_q = 0,25 \text{ с}$ ). Для обработки измерений на  $k$ -м периоде управления принимается следующая процедура осреднения координаты:

$$\bar{\alpha}_k = n_q^{-1} \sum_{v=1}^{n_q} \alpha_v, \quad \alpha_v = \alpha(vT_q). \quad (4)$$

Введем описание трех указанных типов алгоритмов управления гиродинами в режиме стабилизации ДКА, представленных в дискретной форме и используемых далее в решении поставленной задачи:

— П-алгоритм:

$$u_p^{\alpha_j}(kT_u) = k_1^{\alpha_j} \bar{\alpha}_k(kT_u), \\ k = 0, 1, 2, \dots; \quad j = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где  $\bar{\alpha}_k$  вычисляется согласно формуле (4);

— ПД-алгоритм:

$$u_{pD}^{\alpha_j}(kT_u) = k_1^{\alpha_j} \bar{\alpha}_k(kT_u) + k_2^{\alpha_j} \Delta \bar{\alpha}_k(kT_u), \\ k = 0, 1, 2, \dots; \quad j = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

где  $\Delta \bar{\alpha}_k = (\bar{\alpha}_k - \bar{\alpha}_{k-1}) T_u^{-1}$  — первая разность;

— ПИ-алгоритм:

$$u_{pI}^{\alpha_j}(kT_u) = k_1^{\alpha_j} \bar{\alpha}_k(kT_u) + k_3^{\alpha_j} T_u \sum_{i=1}^k \bar{\alpha}_{ki}(kT_u), \\ k = 0, 1, 2, \dots; \quad j = \overline{1, 3}. \quad (7)$$



Номинальные значения коэффициентов  $k_i^{\alpha_j}$ , ( $i, j = \overline{1, 3}$ ), входящих в законы управления (5)–(7), были определены в работах [1, 2] путем аналитического решения задачи параметрического синтеза коэффициентов П-, ПИ- и ПД-алгоритмов на основе рассмотрения одноканальной системы вида

$$J_x \ddot{\alpha} - H \dot{\beta} = 0,$$

$$J_G \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} + H \dot{\alpha} = u_L^\alpha, \quad L = (P, PI, PD),$$

получаемой из системы (1)–(3) в предположении, что  $\omega_0 = 0$  и конструкция КА в целом жесткая, т. е. упругие колебания отсутствуют ( $q = 0$ ).

В результате решения указанной задачи для каждого из трех изолированных каналов гиросtabilизации были получены следующие, принятые далее за неизменяемые, числовые значения коэффициентов рассматриваемых типов базовых алгоритмов управления гиродинами в уравнениях (1)–(3):

$$(k_1^{\alpha_j} = 8,7, j = \overline{1, 3})_{L = (P, PI, PD)};$$

$$(k_2^{\alpha_1} = k_2^{\alpha_3} = 400, k_2^{\alpha_2} = 200)_{L = PD};$$

$$(k_3^{\alpha_j} = 0, 2, j = \overline{1, 3})_{L = PI}.$$

## 2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сравнительный анализ качества работы системы гиросtabilизации ДКА при использовании того или иного базового алгоритма  $L = (P, PI, PD)$  будем осуществлять на основе компьютерного моделирования уравнений (1)–(3), сопоставляя получаемые значения времени регулирования  $T_P^{\alpha_j}, T_{PI}^{\alpha_j}, T_{PD}^{\alpha_j}, j = \overline{1, 3}$  для одинаковых начальных состояний ДКА с инфранизкими частотами  $(2\pi)^{-1} \Omega_1^\Psi = \tilde{f}_1 \leq 0,05$  Гц, содержащимися в общем спектре парциальных частот упругих колебаний конструкции. Время переходного процесса  $T_L^{\alpha_j}$  по соответствующей регулируемой координате  $\alpha_j$  при  $L$ -алгоритме управления ГД, будем определять [4] как время вхождения данной координаты  $\alpha_j(t)$  в зону допустимой погрешности  $\varepsilon$  регулирования

$$|\alpha_j(t) - \alpha_j(\infty)| \leq \varepsilon \forall t \geq T_L^{\alpha_j}, \quad \varepsilon = 10^{-4} \text{ рад.} \quad (8)$$

Начальное состояние ДКА указанного типа (БКК) при  $t = 0$  определим в виде:

$$\psi(0) = \varphi(0) = \vartheta(0) = 1,745 \cdot 10^{-2} \text{ рад};$$

$$\omega_x(0) = \omega_y(0) = \omega_z(0) = 0;$$

$$q_{xx}(0) = q_{xy}(0) = q_{yy}(0) = q_{zz}(0) = 0, \quad \dot{q}(0) = 0;$$

$$\dot{\beta}_j(0) = \beta_j(0) = 0, \quad j = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

Переходные процессы в системе (1)–(3) с начальным состоянием (9) возникают из-за наличия начальных рассогласований  $|\alpha_j(0)| > \varepsilon$ . Управляющие

воздействия  $M_{ij}^G(u_j)$ , прикладываемые к корпусу ДКА со стороны гиросtabilизатора, возбуждают упругие колебания конструкции, заметно увеличивающие время регулирования. Показано, что это увеличение тем существеннее, чем меньше низшие парциальные частоты колебаний [2]. По этой причине сравнительные исследования качества работы системы гиросtabilизации при различных алгоритмах  $u_L^\alpha, L = (P, PI, PD)$  будем проводить для ряда дискретных значений низшей частоты  $\tilde{f}_1 = (2\pi)^{-1} \Omega_1^\Psi$  в диапазоне  $(0,005 \leq \tilde{f}_1 \leq 0,05)$  при шаге дискретизации  $\Delta \tilde{f}_1 = 0,005$  Гц с учетом ограничения на допустимое время регулирования ( $T_{L \max}^{\alpha_j} = 500$  с).

На рис. 1 для пояснения методики сравнения качества работы алгоритмов  $u_L^{\alpha_j}$  приведен пример моделирования системы (1)–(3), иллюстрирующий переходные процессы по координате тангажа ( $\alpha_3 \doteq \vartheta$ ) при последовательном применении трех типов алгоритмов  $u_{L=(P, PI, PD)}^{\alpha_3}$  для одного и того же ДКА с низшей парциальной частотой колебаний конструкции  $\tilde{f}_1 = (2\pi)^{-1} \Omega_1^g = 0,03$  Гц.

Видно, что каждому алгоритму соответствует свое время регулирования  $T_L^{\alpha_3}(\tilde{f}_1), L = (P, PI, PD)$ , зависящее от условия (8). При моделировании полученные значения времени регулирования запоминаются для последующего построения функций  $T^{\alpha_j}(L, \tilde{f}_1)$ , используемых для сравнения качества управления по выбранному показателю (времени регулирования) при различных алгоритмах  $u_L^{\alpha_j}$  гиросилового управления ДКА с варьируемыми частотами упругих колебаний конструкции  $\Omega_1 = 2\pi \tilde{f}_1 = \text{var}$  (при этом  $\Omega_i = k_{\Omega_i} \Omega_1, i = \overline{2, 4}$ ).

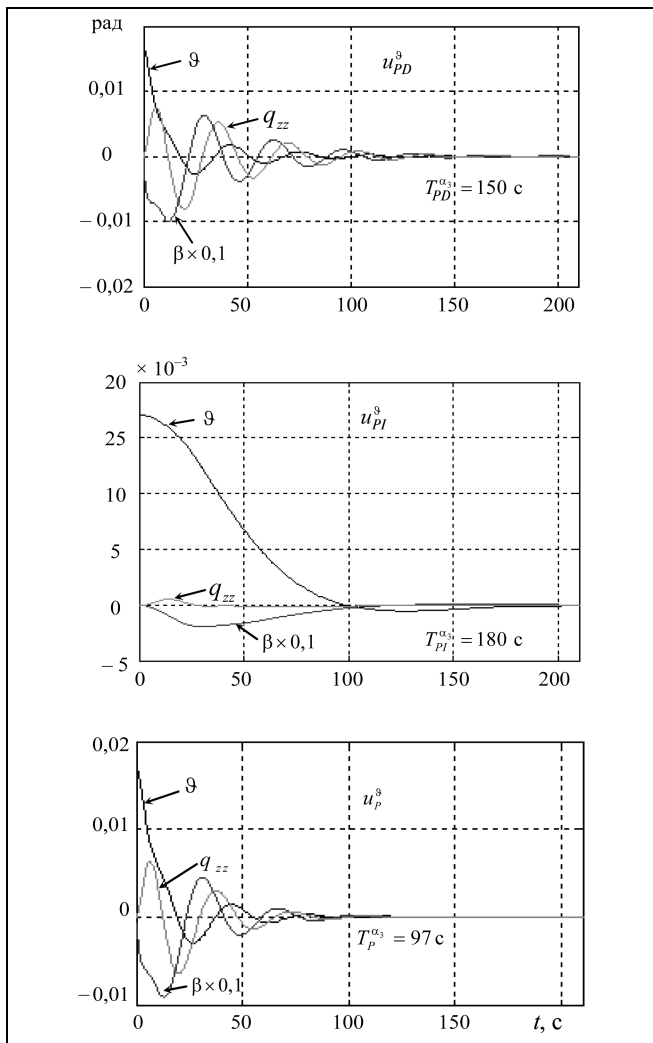


Рис. 1. Переходные процессы в канале тангажа при различных алгоритмах управления гиродинами,  $\tilde{f}_1 = 0,03$  Гц

Многочисленное повторение решения задачи компьютерного моделирования уравнений (1)–(3) с начальными условиями (9) для каждого из алгоритмов (5)–(7) на множестве значений низшей парциальной частоты  $\tilde{f}_1 \in (0,005 \div 0,05)$  Гц с шагом дискретности  $\Delta \tilde{f}_1 = 0,005$  Гц позволяет сформировать массив данных

$$T^{\alpha_j}(\tilde{f}_1, L), \quad j = \overline{1, 3}, \quad i = 1, 2, \dots, \bar{i},$$

$$L = (P, PI, PD),$$

на основе которого компьютерным способом были построены три группы ( $j = \overline{1, 3}$ ) графиков зависимости времени регулирования  $T_{L=(P, PI, PD)}^{\alpha_j}$  от ва-

рьируемой низшей частоты упругих колебаний, объединенных по признаку принадлежности соответствующим ( $\alpha_j$ ) каналам гиросиловой стабилизации ДКА.

На рис. 2 для примера представлена одна из этих трех групп графиков, отображающая зависимость изменения времени регулирования для трех различных алгоритмов (5)–(7) гиросtabilизации ДКА в канале тангажа ( $\alpha_3$ ) при варьировании низшей парциальной частоты в диапазоне значений  $\tilde{f}_1 \in (0,005 \div 0,05)$  Гц.

В остальных каналах гиросtabilизации ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) картина распределения соответствующих зависимостей  $T_L^{\alpha_1}, 2(\tilde{f}_1)$  идентична представленной на рис. 2 и в количественном отношении незначительно отличается от нее.

Сформированные указанным образом графики  $T_{L=(P, PI, PD)}^{\alpha_j}(\tilde{f}_1)$  оказались удобным инструментом для выявления особенностей динамики гиросtabilизации ДКА с варьруемой низшей частотой спектра упругих колебаний конструкции и для решения задачи сравнения качества управления (времени регулирования) в зависимости от типа используемого алгоритма  $u_L^{\alpha_j}$ .

Анализ результатов моделирования (частично представленных графиками, приведенными на рис. 2) позволил сделать следующие выводы.

Одна из особенностей динамики процессов гиросиловой стабилизации углового положения ДКА с инфранизкими частотами упругих колебаний конструкции заключается в существовании зави-

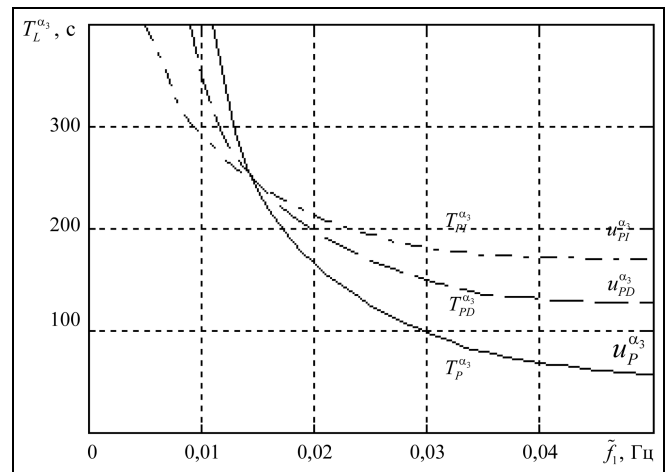


Рис. 2. Зависимость времени регулирования в канале тангажа от  $\tilde{f}_1$  для различных алгоритмов гиросtabilизации



сящей от применяемого алгоритма границы  $\tilde{f}_{1L}^*$ ,  $L = (P, PI, PD)$ , правее которой ( $\tilde{f}_1 \geq \tilde{f}_{1L}^*$ ) время регулирования для рассматриваемого алгоритма управления гиродинами не зависит от значений спектральных частот колебаний конструкции. Это объясняется тем, что в указанной области  $\tilde{f}_1 \geq \tilde{f}_{1L}^*$  относительно высокочастотные упругие колебания  $q(t)$  демпфируются системой гиросtabilизации быстрее, чем заканчиваются переходные процессы по координатам  $\alpha_j$ . В частности, из графиков  $T_{L=(P, PI, PD)}^{\alpha_j}(\tilde{f}_1)$  на рис. 2 следует, что  $\tilde{f}_{1P}^* \approx 0,05$  Гц,  $\tilde{f}_{1PI}^* \approx \tilde{f}_{1PD}^* = 0,04$  Гц. Этот результат ( $\tilde{f}_{1PI}^*, \tilde{f}_{1PD}^* < \tilde{f}_{1P}^*$ ) указывает на то, что в рассматриваемой низкочастотной области ПИ- и ПД-алгоритмы лучше демпфируют упругие колебания ДКА, чем П-алгоритм, хотя последний и обеспечивает меньшее время регулирования  $T_P^{\alpha_j} < T_{PI}^{\alpha_j}, T_{PD}^{\alpha_j}$ .

Левее границ  $\tilde{f}_{1L}^*$ , т. е. в области инфранизких частот ( $\tilde{f}_1 < \tilde{f}_{1L}^*$ ), время регулирования  $T_L^{\alpha_j}(\tilde{f}_1) \forall \tilde{f}_1 < \tilde{f}_{1L}^*$  становится резко возрастающей функцией даже при незначительном уменьшении частоты. В этом случае недостаточная определенность параметра  $\tilde{f}_1$  при необходимости учета ограничения на время регулирования ( $T_L^{\alpha_j} \leq \bar{T}$ ) позволяет сделать заключение, что в области инфранизких частот ( $\tilde{f}_1 < \tilde{f}_{1L}^*$ ) ни один из рассматриваемых алгоритмов  $u_{L=(P, PI, PD)}^{\alpha_3}$  не может гарантировать реализации требуемого качества управления.

Исследования также показали, что в рассматриваемой низкочастотной области упругих колебаний конструкции ( $\tilde{f}_1 < \tilde{f}_{1L}^*$ ) при уменьшении варьируемой частоты может происходить смена в определении предпочтительного применения того или иного базового алгоритма по критерию времени регулирования. На рис. 2 подобный момент фиксируется точками пересечения графиков функций  $T_L^{\alpha_3}(\tilde{f}_1)$  и при  $\tilde{f}_1 \approx 0,014$ , левее которых предпочтительным становится алгоритм  $u_{PI}^{\alpha_3}$ , обеспечивающий новое свойство  $T_{PI}^{\alpha_3} < T_{PD}^{\alpha_3} < T_P^{\alpha_3}$ .

При переходе к алгоритму  $u_{PI}^{\alpha_3}$  должно учитываться наличие ограничения на время регулирования  $T_L^{\alpha_3} \leq \bar{T}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компьютерное моделирование динамики гиросилового управления крупногабаритными спутниками с инфранизкими частотами упругих колебаний конструкции при использовании трех типов (П, ПИ и ПД) базовых алгоритмов управления гиродинами выявило наличие областей в пространстве значений частот упругих колебаний, в которых наблюдается резкое увеличение времени регулирования по сравнению с процессами аналогового гиросилового управления в относительно высокочастотной области упругих колебаний ДКА.

В дальнейшем предполагается исследовать возможность привлечения предложенных ранее в работе [5] методов адаптивного управления для расширения области применимости рассмотренных алгоритмов гиросtabilизации ДКА в сторону еще более низких значений конструкционных частот объекта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сомов Е.И. Динамика многократной цифровой системы пространственной гиросиловой стабилизации упругого космического аппарата // Динамика и управление космическими объектами. — Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1992. — С. 46—76.
2. Крутова И.Н., Суханов В.М. Динамика гиросиловой стабилизации крупногабаритных спутников при использовании настраиваемого ПД-алгоритма управления // Проблемы управления. — 2012. — № 5. — С. 74—80.
3. Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глузов В.М. Стабилизация низкочастотных колебаний конструкции крупногабаритного спутника с гиросиловым управлением // Автоматика и телемеханика. — 2013. — № 3. — С. 120—135.
4. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Ч. 1. — М.-Л.: Энергия, 1965.
5. Крутова И.Н., Суханов В.М. Адаптивный алгоритм управления ориентацией крупногабаритных информационных спутников с изменяющимися параметрами // Проблемы управления. — 2011. — № 5. — С. 74—81.

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

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

**Виктор Миньонович Суханов** — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-87-79, ✉ suhv@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.