

НЕЛИНЕЙНЫЕ АЛГОРИТМЫ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СОБИРАЕМОЙ НА ОРБИТЕ БОЛЬШОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Глумов В.М., Ермилов А.С.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65

vglum@ipu.ru, yermas@ipu.ru

Аннотация: Предлагается решение задачи обеспечения высокоточной угловой стабилизации большой космической конструкции при ее сборке в космосе с использованием нелинейных алгоритмов. При формировании управления учитываются особенности гироскопических исполнительных органов типа двигателей-маховиков и гиродинов. Приводятся результаты моделирования предлагаемых алгоритмов управления конструкцией зонтичного типа.

Ключевые слова: большие космические конструкции, оценивание координат объекта, управление движением, алгоритм управления

Введение

Большие космические конструкции (БКК) представляют собой механические системы, которые содержат гибкие элементы. При сборке БКК на орбите возникают возмущения ее угловых координат, вызванные присоединением новых элементов и технологическими поворотами относительно центра масс механической системы. Отсутствие жесткости механической системы БКК порождает проблему взаимосвязи между упругими колебаниями конструкции и системой управления угловым движением БКК, выражающуюся в снижении качества управления, в частности, в ухудшении точности ориентации и в увеличении времени регулирования [1]. Ориентация осей любого космического аппарата (КА) в заданном направлении является основным режимом, как с точки зрения его продолжительности, так и значимости в течение всего срока активного существования КА. Следовательно, задача формирования высокоточного, экономичного и надежного, т.е. безотказного, функционирования собираемой БКК в этом режиме является очень актуальной.

В качестве исполнительных органов системы управления угловым движением БКК могут использоваться двигатели-маховики или гиродины (ГД) [2]. Маховик способен формировать как релейные, так и непрерывные управляющие моменты, поддерживающие требуемую ориентацию корпуса БКК. ГД позволяют использовать в качестве закона управления дискретные пропорционально-дифференциальный или пропорционально-интегральный алгоритмы [2, 3].

В данной работе предполагается, что собственное демпфирование колебаний механической системы БКК отсутствует при использовании двигателей-маховиков или малоэффективно при использовании ГД. В [1, 4] рассматривались различные подходы к решению проблемы демпфирования возникающих колебаний БКК, которые основаны на линейной постановке. В настоящей работе рассматриваются особенности динамики углового движения БКК зонтичного типа [2] при наличии упругих колебаний ее элементов в случае использования нелинейных алгоритмов управления.

1 Релейное управление ориентацией БКК

Релейные алгоритмы стабилизации вида $u(x, \lambda, t)$, где x – вектор измеряемых (регулируемых) координат, λ – вектор параметров алгоритма, t – время, которые часто используют в системах управления КА, обеспечивают указанные выше требования по высокоточному, экономичному и надежному управлению угловым движением БКК. В общем случае установившееся движение БКК после установки элемента конструкции представляет собой одно- или двух импульсный устойчивый предельный цикл, содержащий активный (длительностью τ_a) и пассивный (длительностью τ_e) участки движения, последний из которых принадлежит зоне нечувствительности системы. Характеристики этого цикла должны обеспечивать требуемую степень экономичности $\chi = \tau_e / \tau_a$, т.е. низкий расход энергии на каждом периоде цикла $\tau_r = \tau_a + \tau_e$, требуемую точность ориентации и минимальное число точек переключения регулятора в цикле [5]. Чтобы удовлетворить этим требованиям на начальном этапе формирования алгоритма $u(x, \lambda, t)$, предполагая, что БКК является жесткой механической системой, определяются соответствующие значения параметров λ^* . Такой алгоритм $u(x, \lambda^*, t)$ считается базовым, а его параметры λ^* принимаются за номинальные [1]. В

этом случае степень экономичности $\chi^* = \chi(\lambda^*)$ и $x_{\max}^* = x_{\max}(\lambda^*)$, где x_{\max} – требуемая точность ориентации, определяют характеристики номинального (эталонного) предельного цикла $\Gamma^*(u) = \Gamma[u(x, t, \lambda^*)]$.

Отсутствие жесткости механической системы БКК в процессе активного управления очень часто не только ухудшает установленные показатели качества ориентации, но может привести и к неустойчивости системы из-за неконтролируемого нарастания амплитуды упругих колебаний до критических значений. В режиме стабилизации БКК при использовании релейного управления упругие колебания возбуждаются при переключениях регулятора на активных участках траектории предельного цикла. При отсутствии собственного демпфирования колебаний их амплитуда остается неизменной при движении на пассивном участке цикла вплоть до очередного выхода системы из зоны нечувствительности в зону активного управления. Повторные переключения регулятора в этой зоне, как правило, увеличивают интенсивность колебаний, что может привести к указанной выше неустойчивости системы.

2 Модель углового движения БКК с двигателями-маховиками

Динамику углового движения БКК зонтичного типа, управляемого двигателем-маховиком, целесообразно представить с помощью модально-физической модели, описывающей движение несущего тела под действием внешних сил и сил реакции от колеблющихся упругих элементов конструкции [1].

При низких угловых скоростях механической системы БКК гироскопические моменты можно полагать относительно малыми величинами. Тогда движение БКК в первом приближении можно рассматривать в виде трех независимых движений (по углам крена, курса и тангажа). В этом случае математическая модель углового движения БКК может быть разделена на три независимые модально-физические модели, описывающие плоские вращения ДКА относительно любой из трех осей базовой системы координат в виде

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{x}} &= m(u), \quad m(u) = M_r(u)I_\Sigma^{-1}, \quad I_\Sigma = (I + J); \\ \ddot{\tilde{x}}_i + \omega_i^2 \tilde{x}_i &= \tilde{k}_i m(u); \quad \tilde{k}_i m(u) \omega_i^{-2} = \tilde{x}_{ci}; \\ x &= \bar{x} + \tilde{x}, \quad \tilde{x} = \sum \tilde{x}_i, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1)$$

где x – измеряемая и регулируемая угловая координата БКК в рассматриваемой плоскости движения; \bar{x} – координата углового движения условно "отвердевшей" механической системы БКК; \tilde{x} – дополнительные изменения угловых координат корпуса БКК, вызываемые воздействием на него упругих колебаний присоединенных элементов; $\tilde{\omega}_i, \tilde{k}_i, i = \overline{1, n}$ – собственные частоты и коэффициенты упругих колебаний конструкции; I_Σ – суммарный осевой момент инерции ДКА с учетом момента инерции маховика J ; $I = \text{diag}(I_x, I_y, I_z)$ – матрица моментов инерции БКК; $M_r(u)$ – управляющее воздействие; u – закон управления.

Входящие в уравнения (1) управляющие воздействия $M_r(u)$ представляют собой моменты сил динамической реакции, которые прикладываются к корпусу БКК при разгоне или торможении маховика:

$$M_r = -M_d + M_f, \quad (2)$$

где M_d – момент, создаваемый двигателем, вращающим маховик, $M_f = f(\Omega)$ – момент от сил сопротивления и от нагрузки на валу двигателя, нелинейно зависящий от угловой скорости маховика.

Для электродвигателей постоянного и переменного тока имеем [1]:

$$\Delta M_d = k_u \Delta u - k_\Omega \Delta \Omega, \quad (3)$$

где $k_u, k_\Omega > 0$ – постоянные электромеханические коэффициенты двигателя, $\Delta \Omega$ – приращение скорости маховика при изменении управляющего напряжения Δu .

На основании закона сохранения момента количества движения для механической системы типа БКК с маховиком справедливо соотношение

$$\Delta\Omega = -IJ^{-1}\dot{x}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) и обозначая $\Delta M_d \equiv M_d$, $\Delta u \equiv u$, получим выражение для разгонного момента электродвигателя

$$M_d(u) = k_\omega \dot{x} + k_u u, \quad k_\omega = k_\Omega IJ^{-1}. \quad (5)$$

Управляющий момент M_r , действующий на БКК со стороны двигателя-маховика, на основании (2) определяется выражением

$$M_r(u) = -(k_\omega \dot{x} + k_u u) + M_f. \quad (6)$$

Подставляя (6) в уравнения (1), после несложных преобразований получим модально-физическую модель плоского углового движения БКК, управляемого двигателем-маховиком:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{x}} + k'_\omega \dot{\bar{x}} &= k'_u u - k'_\omega \dot{\bar{x}} + m_f, \\ \ddot{\bar{x}}_i + \tilde{k}'_i k'_\omega \dot{\bar{x}}_i + \tilde{\omega}_i^2 \bar{x}_i &= \tilde{k}'_i k'_u u - \tilde{k}'_i k'_\omega (\dot{\bar{x}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{\bar{x}}_j), \\ x &= \bar{x} + \tilde{x}, \quad \tilde{x} = \sum \tilde{x}_i, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $k'_\omega = k_\omega I_\Sigma^{-1}$, $k'_u = -k_u I_\Sigma^{-1}$, $m_f = M_f I_\Sigma^{-1}$.

Из (7) видно, что использование двигателя-маховика в качестве исполнительного органа системы ориентации БКК привносит в уравнения динамики некоторый эффект демпфирования движений, определяемый зависимостью момента M_d от угловой скорости маховика (3). Однако поскольку коэффициент $k'_\omega = k_\omega I_\Sigma^{-1}$ достаточно мал, то это демпфирование незначительно и при использовании релейных алгоритмов управления система может оказаться неустойчивой.

Уравнениям (7) соответствует структурная схема базовой системы ориентации БКК с двигателем-маховиком, представленная на рис. 1, которая далее может быть принята в качестве исходной при решении задачи синтеза алгоритма управления. На рис. 1 обозначено: $u = u(x, t)$ – синтезируемый базовый алгоритм; ДМ – двигатель-маховик; p – оператор Лапласа.

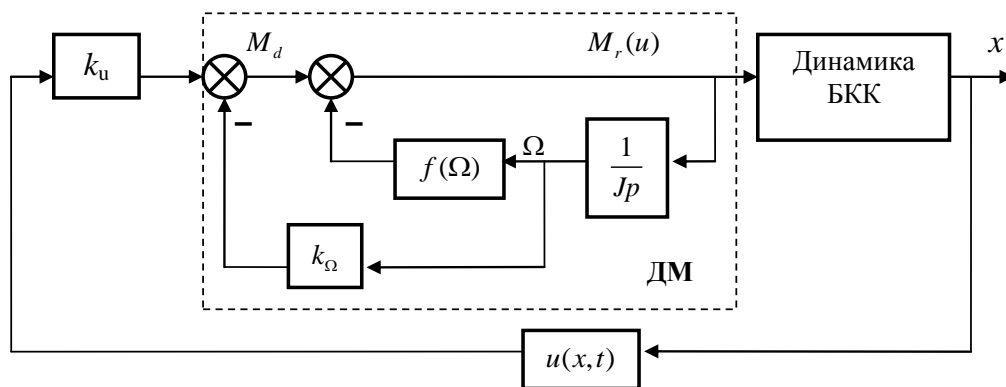


Рис. 1. Базовая система ориентации БКК с двигателем-маховиком

3 Релейный алгоритм управления ориентацией БКК

Известно, что релейные системы управления являются наиболее простыми в реализации и надежными в эксплуатации, что особенно важно для КА с длительным сроком существования. В связи с этим в качестве базового алгоритма $u(x, t)$ в режиме стабилизации примем описанный в [6] закон управления релейно-логического типа

$$u(x, t) = \begin{cases} -u_1 \forall x \geq \varepsilon \vee t \in [t_0, t_1), & x(t_1) = \varepsilon - \gamma, \quad t_1 - t_0 = \tau_1; \\ +u_1 \forall x \leq \varepsilon - \gamma \vee t \in [t_1, t_2), & t_2 - t_1 = \tau_2 = k_i \tau_1, \quad k_i < 1; \\ 0 \quad \forall |x| < \varepsilon - \gamma \vee t \geq t_2, \end{cases} \quad (8)$$

где $\pm u_1 = \text{const}$ – напряжения на входе двигателя-маховика, формирующие управляющие моменты соответствующего знака. При этом

$$M_r(u) = \begin{cases} M_f \quad \forall u = 0, \\ M_0 \text{sign}(u) \quad \forall u \neq 0, \end{cases}$$

где M_0 – релейный управляющий момент, значение которого выбирается в соответствии с известными требованиями к системе стабилизации, причем $M_0 \gg M_f$, где M_f – момент сопротивления на валу маховика при движении системы в зоне нечувствительности ε (отметим, что при действии $M_r(u) = |M_0|$ малым моментом M_f пренебрегаем); γ – гистерезис в алгоритме управления (8); k_i – коэффициент возврата, задающий глубину реверсирующего воздействия, прикладываемого к несущему телу БКК после завершения прямого управления, ограничивающего ошибку ориентации вне ε -зоны.

Формируемый алгоритмом (8) предельный цикл Γ представлен на рис. 2. Этот цикл, размеченный последовательностью точек переключения (1,2,3), является устойчивым (для жесткого варианта механической структуры БКК), отвечает требованиям желаемой динамики процессов стабилизации и может быть принят за эталонное движение для БКК.

Из-за отсутствия жесткости конструкции в точках переключения управляющего воздействия (0, 1, 2, ...) могут возбуждаться упругие колебания, которые не только ухудшают точность ориентации, но могут привести и к неустойчивости системы. Таким образом, для обеспечения достаточного запаса устойчивости в системе (7), (8) необходимо сформировать дополнительное управление, которое в случае переменной или неточной модели при сборке БКК должно быть адаптивным [4].

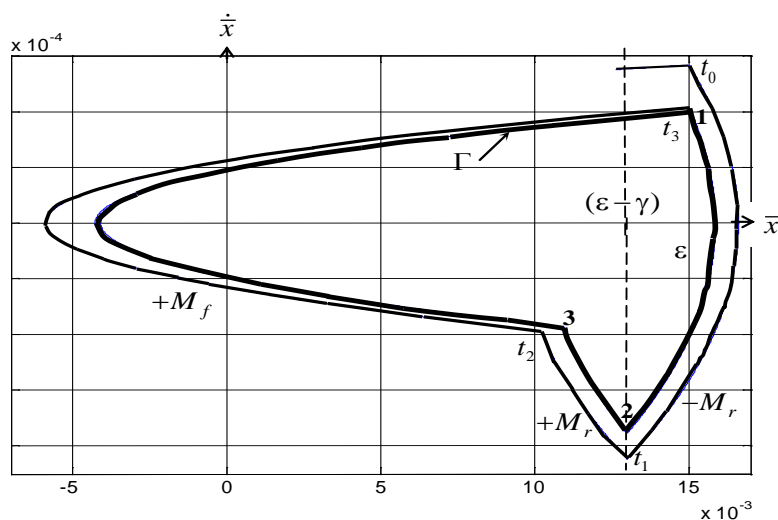


Рис. 2. Предельный цикл при отсутствии колебаний БКК

4 Нелинейный адаптивный алгоритм управления БКК

Для устранения указанного выше недостатка рассматривается возможность стабилизации возбуждаемых колебаний за счет использования при движении в ε -зоне дополнительного управления $M(u_\varepsilon)$, который формируется на основе алгоритма адаптации с эталонной моделью [6]. По существу этот алгоритм предназначен для компенсации влияния изменения параметров динамического объекта на динамику линейной системы управления. Но он также обладает способностью снижать влияние неизмеряемых внешних возмущений на качество функционирования линейной системы. В связи с этим попытаемся использовать предложенный алгоритм адаптации для компенсации упругих колебаний БКК, которые будем рассматривать как внутреннее переменное возмущение с неизвестными параметрами, т.е. как возмущение в системе управления ориентацией. При этом предполагается, что стабилизация колебаний с помощью дополнительного управления $M(u_\varepsilon)$ осуществляется только тогда, когда изображающая точка на фазовой плоскости x, \dot{x} движется внутри ε -зоны ($M(u) = M_f$), где двигатель-маховик может функционировать как исполнительный орган непрерывного типа (рис. 2).

Очевидно, что управляющее напряжение u , подаваемое на вход двигателя-маховика (рис. 1), должно формироваться с помощью двух последовательно сменяющих друг друга алгоритмов $u(x, t)$ и u_ε , последний из которых решает задачу стабилизации упругих колебательных компонент БКК. Объединенный (комбинированный) алгоритм при таком способе управления БКК можно записать в виде

$$M(u) = \begin{cases} M(u) \forall u \neq 0; \\ (M(u_\varepsilon) + M_f) \forall u = 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{Где } u = \begin{cases} u \forall x(t), t \in \tau_a; \\ u_\varepsilon \forall x(t), t \in \tau_\varepsilon. \end{cases}$$

Прежде чем перейти к решению задачи непосредственного синтеза алгоритма u_ε , рассмотрим кратко предложенный в [7] алгоритм адаптации, полученный применительно к системе, заданной математической моделью вида

$$\dot{x} + A(t)x = B(t)g + f + S, \quad (10)$$

где $x(t) \in R^n$, $g(t) \in R^m$, $f(t) \in R^n$ – векторы состояния системы, управления и возмущения соответственно; $A(t) \in R^{n \times n}$ и $B(t) \in R^{n \times m}$ – матрицы с неизвестными переменными компонентами; $S \in R^n$ – вектор дополнительной обратной связи.

Предполагается, что матрицы $A(t)$ и $B(t)$ могут быть представлены в виде

$$A(t) = A_0 + \Delta A(t), \quad B(t) = B_0 + \Delta B(t), \quad (11)$$

где A_0, B_0 – заданные постоянные матрицы при $f(t) \equiv 0$ и $S \equiv 0$ ($-A_0$ является гурвицевой), $\Delta A(t)$ и $\Delta B(t)$ – неизвестные параметрические возмущения.

Уравнение эталонной модели принимается в следующем виде:

$$\dot{x}_m + A_0 x_m = B_0 g. \quad (12)$$

Вводя обозначения

$$e = x - x_m, \quad y = -\Delta A(t)x + \Delta B(t)g + f + S, \quad \mu(t) = \frac{d}{dt}d(t), \quad \psi(t) = \frac{d}{dt}S(t)$$

и используя уравнения (10), (11), (12), получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \dot{e} + A_0 e &= y, \\ \dot{y} &= \mu + \psi. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь функция $\psi(t)$ является алгоритмом адаптации.

В [7] было доказано, что нелинейный алгоритм

$$\psi(t, e) = -\chi\sigma - K \operatorname{sign}(y) \quad (14)$$

где $\chi = \text{const} > 0$, $\sigma = Pe$, P – симметричная ($n \times n$) положительно определенная матрица, диагональная матрица $K = \text{diag}(k_1, \dots, k_n)$, $\operatorname{sign}(y) = [\operatorname{sign}(y_1), \dots, \operatorname{sign}(y_n)]^T$ при выполнении условий $k_i > |\mu_i(t)|$, $i = \overline{1, n}$ гарантирует асимптотическую устойчивость движения $e = 0$, $y = 0$ системы (13).

Возможность физической реализации алгоритма (14) была исследована в [7].

Управляющий сигнал на входе двигателя-маховика, формирующий дополнительный момент $M(u_\varepsilon)$ при движении БКК в ε -зоне, запишем в дискретном (с периодом T_0) виде:

$$u_{\varepsilon, k} = k_0 S_k, \quad (15)$$

где S_k является выходным сигналом подсистемы, предназначенной для демпфирования упругих колебаний конструкции.

Эталонную модель получим на основе уравнений (7), в которых положим $\tilde{x}_i \equiv 0$. В этом случае уравнение эталонной модели представляет собой уравнение динамики эквивалентной жесткой механической структуры БКК

$$\ddot{\tilde{x}}_m + k'_{\omega m} \dot{\tilde{x}}_m = k'_u u + m_f. \quad (16)$$

Для решения задачи демпфирования упругих колебаний механической структуры БКК алгоритм адаптации (14) определим в следующем виде:

$$\psi = -\chi(p_{21}e + p_{22} \frac{de}{dt}) - K \operatorname{sign}(c_1 e + c_2 \frac{de}{dt} + \frac{d^2 e}{dt^2}). \quad (17)$$

Здесь P_{21}, P_{22}, c_1, c_2 – положительные постоянные. Следует отметить, что первая и вторая производные de/dt и d^2e/dt^2 используются только в алгоритме адаптации (17).

Применяя метод Эйлера, получаем структуру нелинейного дискретного сигнала, используемого для стабилизации упругих колебаний БКК,

$$S_k = S_{k-1} + T_0 [-\chi(p_{21}e_k + p_{22}\Delta e_k) - K \operatorname{sign}(c_1 e_k + c_2 \Delta e_k + \Delta^2 e_k)], \quad (18)$$

где $e_k = x_k - x_{km}$, $\Delta e_k = T_0^{-1}(\Delta x_k - \Delta x_{km})$, $\Delta^2 e_k = \Delta e_k - \Delta e_{k-1}$.

На рис. 3 представлена блок-схема системы комбинированного релейного и дополнительного нелинейного адаптивного управления ориентацией БКК.

Здесь обозначено: ПУ – переключающее устройство, представляющее собой функциональное звено, подключающее дополнительное S_k -управление (18) для стабилизации упругих колебаний БКК при движении координаты x в зоне нечувствительности системы. Управляющие звеном ПУ сигналы u_p формируются в моменты включения регулятора при выходе системы из ε -зоны и в моменты его отключения после возвращения в ε -зону в соответствии с базовым алгоритмом (8).

Работоспособность дополнительного адаптивного алгоритма стабилизации упругих колебаний БКК в ε -зоне была проверена методами математического моделирования. Результаты компьютерного моделирования динамики БКК зонтичного типа на этапе сборки при установке третьего элемента конструкции ($n = 3$) показали, что при отключенном контуре дополнительного управления ($S_k = 0$) и реализации базового алгоритма (8) наблюдается процесс нарастания упругих колебаний. При этом доминирующей является первая компонента $\tilde{x}_1(t)$, отличающаяся максимальным коэффициентом возбудимости и минимальной собственной частотой в ряду других колебательных компонент. Наблюдаемое слабое снижение уровня колебаний при движении системы в ε -зоне объясняется присутствием в уравнениях системы (7) демпфирующего члена $\tilde{k}_i k'_\omega \dot{\tilde{x}}_i$. Дополнительные исследования процесса нарастания упругих колебаний выявили тенденцию к

дальнейшему их нарастанию с последующим переходом к автоколебаниям типа странного аттрактора с недопустимо большой амплитудой, совершающихся относительно зоны гистерезиса.

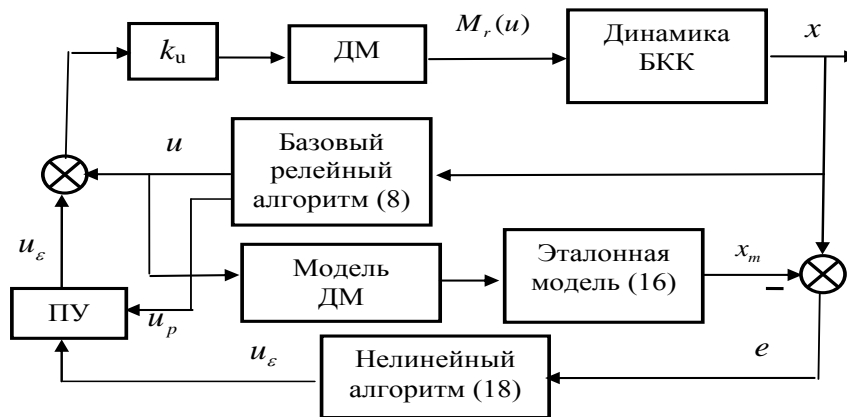


Рис. 3. Блок-схема системы комбинированного управления ориентацией БКК

Упругие колебания \tilde{x}_i , возбуждаемые в активных зонах (τ_a) каждого предельного цикла, соответствующего базовому управлению, в соответствии с алгоритмом (18) вызывают появление дополнительного управления, которое при правильно выбранных коэффициентах алгоритма гасит возникшие колебания раньше, чем система выйдет из ε -зоны. В целом это гарантирует устойчивость движения в течение всего режима стабилизации БКК на этапе сборки.

4 Алгоритмы стабилизации БКК с активной компенсацией упругих колебаний

При использовании в качестве исполнительного органа собираемой БКК гироскопического силового привода типа ГД плоское движение по угловой координате \mathcal{G} на j -ом этапе сборки БКК описывается системой уравнений [1 - 4]

$$\begin{aligned}
 I_0 \ddot{\mathcal{G}} + \sum_{i=1}^{n_j} \tilde{I}_i \ddot{q}_i &= h \dot{\beta}, \\
 I_\beta \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} + h \dot{\varphi} &= M_\beta(u), \\
 a_i \ddot{q}_i + b_i \dot{q}_i + c_i q_i &= 0, \quad i = \overline{1, n_j},
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

где I_0 – момент инерции корпуса БКК; h – кинетический момент ГД; β – угол поворота ГД; I_β – момент инерции ГД относительно оси прецессии; k_D – коэффициент вязкого трения в подвеске ГД, $M_\beta(u)$ – управляющий момент, прикладываемый относительно оси прецессии ГД моментным приводом, u – управляющее напряжение (алгоритм управления) на входе моментного привода, q_i – координата, характеризующая i -й тон упругих колебаний конструкции, \tilde{I}_i – собственный момент инерции i -го упругого элемента конструкции, a_i , b_i и c_i – параметры i -го тона упругих колебаний, n_j – число тонов на j -ом этапе сборки.

Достижение высоких требований к управлению собираемой БКК невозможно обеспечить без высокоточной информации, как о координатах углового движения механической системы БКК, так и о координатах колебаний и параметрах упругих элементов. В [4] синтезированы алгоритмы фильтрации с использованием нелинейного фильтра Калмана, которые позволяют оценить с высокой точностью не только координаты и параметры системы (19), но и координаты и параметры тонов упругих колебаний. Синтезированный алгоритм совместного оценивания координат углового движения БКК, тонов упругих колебаний конструкции и их параметров позволяет только по показаниям измерителей углового движения объекта в отсутствие какой-либо объективной информации об упругих колебаниях получать с высокой точностью оценки их не измеряемых координат и параметров в реальном времени. Полученные оценки используются в алгоритмах

управления угловым движением БКК с активной компенсацией влияния упругих колебаний на угловую стабилизацию и ориентацию.

Анализ математической модели (19) показал, что одной из причин медленного затухания упругих колебаний является большая разница моментов инерции корпуса I_0 и момента инерции i -го упругого элемента конструкции \tilde{I}_i . Для решения задачи ускоренной активной компенсации влияния упругих колебаний на угловую ориентацию БКК предлагается вместо алгоритма с постоянными на j -ом этапе сборки коэффициентами вида [4]

$$u = k_1 \hat{\mathcal{G}} - \sum_{i=1}^{n_j} k_{1i}^* \hat{q}_i + k_2 \hat{\mathcal{G}} - I_0^{-1} \sum_{i=1}^{n_j} k_{2i}^* \hat{q}_i, \quad (20)$$

где $k_{1i}^* = k_1 I_0^{-1} \hat{a}_i \tilde{I}_i$, $k_{2i}^* = k_2 I_0^{-1} \hat{a}_i \tilde{I}_i$, использовать алгоритм с перестраиваемыми коэффициентами вида

$$u = k_1 \hat{\mathcal{G}} - \sum_{i=1}^{n_j} k_{1i} \hat{q}_i + k_2 \hat{\mathcal{G}} - \sum_{i=1}^{n_j} k_{2i} \hat{q}_i, \quad (21)$$

где коэффициенты k_{1i} и k_{2i} значительно превышают значение соответствующих коэффициентов k_{1i}^* и k_{2i}^* для всех оценок \hat{q}_i и $\hat{\dot{q}}_i$ $i = \overline{1, n_j}$.

На рис. 4 и рис. 5 для сравнения представлены результаты статистического моделирования варианта БКК зонтичного типа на третьем этапе сборки в виде фазовых траекторий динамики углового движения по координате \mathcal{G} при алгоритме управления (20) (см. рис. 4) и при алгоритме управления (21) (см. рис. 5).

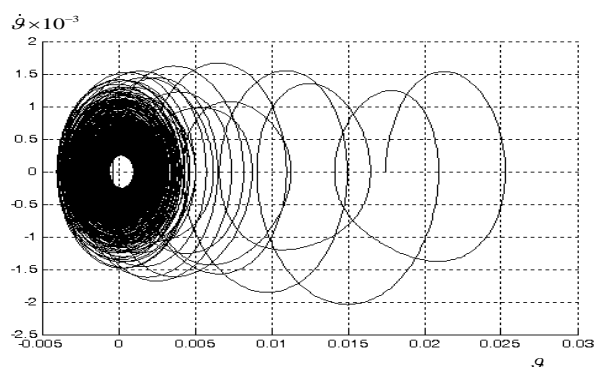


Рис. 4. Фазовая траектория при алгоритме (20)

В первом случае при алгоритме (20) затухание упругих колебаний до 2% от начального значения амплитуды происходит за длительное время.

Во втором случае, когда используется активная компенсация влияния упругих колебаний на динамику процесса ориентации, такое же затухание упругих колебаний до 2% происходит значительно быстрее (на два порядка), чем при алгоритме (20).

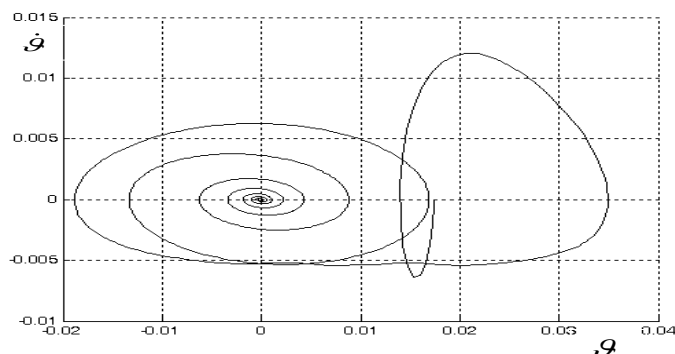


Рис. 5. Фазовая траектория при алгоритме (21)

Заключение

Предложенные в работе релейный и нелинейный адаптивный алгоритмы управления ориентацией БКК принципиально решают задачу обеспечения устойчивости системы по отношению к упругим колебаниям конструкции, возбуждаемым основной системой регулирования углового положения БКК. Введение дополнительного контура адаптивной стабилизации упругих колебаний на основе использования эталонной модели позволяет решать задачу и в случае переменных или неизвестных значений параметров колебаний. Следует отметить, что использованный в работе алгоритм адаптации (18) является существенно упрощенным вариантом математически строгого исходного алгоритма, предложенного в [7], и поэтому должен рассматриваться лишь в качестве эвристического алгоритма. Однако проведенное компьютерное исследование показало его достаточно хорошую работоспособность при стабилизации многочастотных и параметрически плохо определенных колебаний БКК. Предлагаемый и исследованный адаптивный алгоритм управления угловой ориентацией и стабилизацией БКК, использующий получаемые в реальном времени оценки углов, координат и параметров тонов упругих колебаний, с активной компенсацией влияния упругих элементов конструкции значительно сокращает время затухания упругих колебаний на всех этапах сборки БКК.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00073).

Литература

1. Глумов В.М., Ермилов А.С. Сборка и управление крупномасштабной космической конструкцией на орбите // Труды 12-й Международной конференция «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019, Москва)», под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, . – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 722-731.
2. Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М. Особенности гиросиловой стабилизации собираемой на орбите большой космической конструкции // Проблемы управления. 2016, № 1. – С. 82-89.
3. Динамика и управление космическими объектами / под ред. В.М. Матросова, М.Ф. Решетнева. – Новосибирск: Наука. 1992. – 211с.
4. Глумов В.М., Ермилов А.С. Обеспечение эффективности адаптивного управления собираемой на орбите космической конструкции // Труды 13-й Международной конференция «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020, Москва)», под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 1188-1196.
5. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. – М.: Наука, 1974. – 336с.
6. Rutkovsky V.Yu., Sukhanov V.M., Dodds S.J. Control of flexible Space vehicles using an adjustable model and alternate control laws // Eur. Control Conf. (ECC97). Full paper on CD-ROM. Brussels, 1997.
7. Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Суханов В.М. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 2011, №8. – С. 96-108.