

ОСОБЕННОСТИ ГИРОСИЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СОБИРАЕМОЙ НА ОРБИТЕ БОЛЬШОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ¹

В.М. Глумов, И.Н. Крутова, В.М. Суханов

Приведены уравнения одноосного углового движения большой космической конструкции, собираемой на орбите из отдельных упругих строительных элементов. Дана методика расчета параметров дискретно изменяющихся динамических свойств собираемой конструкции, модель которой имеет переменные коэффициенты и ярко выраженные свойства упругой многочастотной колебательной системы. Предложен параметрически настраиваемый алгоритм гиросилового управления движением таких объектов, обеспечивающий желаемую динамику на всех этапах роботизированной сборки. Приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: большая космическая конструкция, сборка на орбите, математическая модель, гиросиловое управление, алгоритм, управление.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматриваются некоторые проблемы гиросилового стабилизации углового положения больших космических конструкций (БКК) в процессе их поэлементной роботизированной сборки на орбите [1]. Особенности этого типа объектов, к которым могут быть отнесены, например, космические радиотелескопы и ретрансляторы солнечной энергии [2, 3], заключается в дискретно изменяющейся во времени структуре и существенной нежесткости собираемой конструкции в целом. Таким образом, как объект управления БКК в процессе развития представляет собой динамическую систему с переменными коэффициентами, с большим и изменяющимся во времени числом степеней свободы и имеющую ярко выраженные свойства упругой многочастотной колебательной системы, которая в работе [4] названа дискретно развивающейся конструкцией (ДРК). Как механическая система ДРК может рассматри-

ваться в виде некоторой последовательности возникающих в процессе сборки частных механических структур.

Для большей конкретности изложения в качестве объекта исследования примем введенную в работе [4] дискретно изменяющуюся в процессе сборки космическую конструкцию «зонтичного» типа, которая достаточно хорошо подходит для описания регулярных структур типа больших космических зеркал или радиотелескопов [2, 3].

На каждом отдельном этапе сборочного процесса ДРК представляет собой совокупность из $n + 1$ тел (рис. 1), одно из которых — на рис. 1 выделено темным — несущее, с массой m_0 и моментом инерции I_0 . Остальные (носимые тела с параметрами $m_i, l_i, i = \overline{1, n}, n \in [1, N]$, где N — общее число носимых тел БКК) представляют собой строительные элементы стержневого типа (одномерные тела с массой m_i , приведенной к концу невесомого упругого стержня длины l_i), присоединяемые к несущему телу в заданных точках $o_i = (\alpha_i, r_{oi})$ в определенном порядке. Упругость стержневых элементов порождает в рассматриваемой плоскос-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01091).

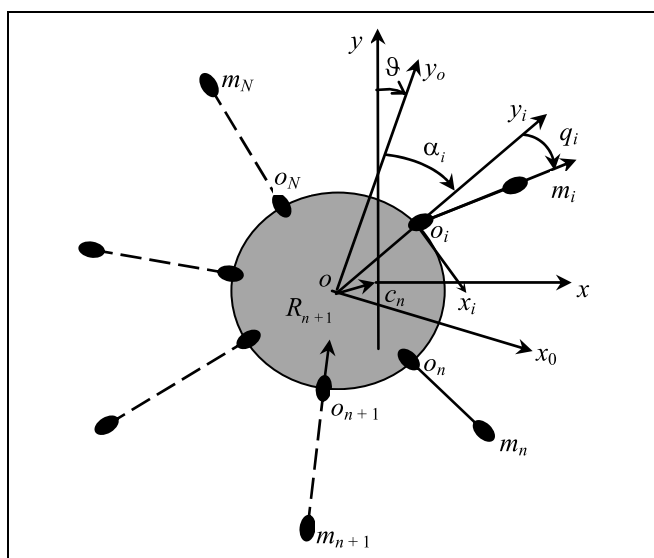


Рис. 1. Текущая структура ДПК

ти малые смещения q_i концевых масс относительно состояния равновесия. Конструкционное демпфирование упругих колебаний не учитывается.

Без ограничения общности будем считать, что поступательное движение стержневого элемента при соединении с несущим телом направлено по радиусу-вектору, связывающему точку присоединения o_i с полюсом o .

Первоочередные задачи настоящей работы заключаются в построении математической модели одноосного углового движения ДПК и исследовании ее динамических свойств как объекта управления на последовательности этапов процесса роботизированной сборки БКК в заданной точке пространства.

Заключительная задача состоит в формировании расширенного алгоритма управления, обеспечивающего устойчивость и требуемое качество процессов стабилизации ДПК, собираемой из строительных элементов с пониженной конструктивной жесткостью.

1. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СОБИРАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ

Для описания текущей конфигурации ДПК (см. рис. 1) введем системы координат (СК): $o x_0 y_0$ — СК, связанная с главными осями инерции несущего тела (o — его центр масс); $o_i x_i y_i$ — локальная СК, в которой определяется отклонение q_i i -го эле-

мента от его невозмущенного положения, $o_i y_i$ — ось, проходящая через полюс o и совпадающая с продольной осью элемента в его недеформированном состоянии; $c_n x y$ — инерциальная СК с началом c_n , совпадающим с центром масс ДПК на n -м этапе сборки, т. е. после установки n -го элемента конструкции.

Положение точки c_n в связанной СК $o x_0 y_0$ определяется выражениями

$$x_{c_n} = m_{\Sigma n}^{-1} \sum_{i=1}^n m_i x_i, \quad y_{c_n} = m_{\Sigma n}^{-1} \sum_{i=1}^n m_i y_i,$$

где

$$x_i = L_i \sin \alpha_i, \quad y_i = L_i \cos \alpha_i, \quad L_i = r_{oi} + l_i;$$

$$m_{\Sigma n} = m_o + \sum_{i=1}^n m_i.$$

Момент инерции ДПК относительно центра масс системы на n -м этапе сборки

$$I_n = I_o + m_o (x_{c_n}^2 + y_{c_n}^2) + \sum_{i=1}^n m_i r_{i,c_n}^2,$$

где $r_{i,c_n}^2 = (x_i - x_{c_n})^2 + (y_i - y_{c_n})^2$ — квадрат расстояния между концевой массой i -го элемента ($i \leq n$) и центром масс системы c_n на n -м этапе сборки ДПК.

Рассматривается режим гиросtabilизации углового положения собираемой на орбите БКК, к корпусу которой в процессе сборки в отдельные моменты времени присоединяются упругие строительные элементы стержневого типа. Исполнительными органами системы служат двухстепенные силовые гиросtabilизаторы (гиродины). Из приведенных в работе [5] уравнений пространственного движения такой системы, соответствующей n -му этапу сборки, следует, что все каналы гиросtabilизации даже в рамках линеаризованной модели являются взаимосвязанными, причем структура взаимосвязей обусловлена как инерционными, так и гироскопическими влияниями. Тем не менее, утверждается [6], что в рассматриваемом режиме точной стабилизации при синтезе параметров системы можно пренебречь межканальными перекрестными связями. Это позволяет декомпозировать пространственную систему на три подсистемы, соответствующие изолированным каналам стабилизации. При этом плоские движения в каждом из таких каналов гиросtabilизации на

n -м этапе сборки могут быть описаны уравнениями [6]:

$$I_o \ddot{x} - \sum_{i=1}^n e_i b_i q_i + H \dot{\beta} = M_x,$$

$$I_G \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} - H \dot{x} = M_G(u_x),$$

$$\tilde{I}_i (\ddot{q}_i + e_i \ddot{x}) + b_i q_i = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \in [1, N], \quad (2)$$

где x — подлежащая стабилизации угловая координата корпуса ДРК (угол ϑ , см. на рис. 1); q_i — координата упругого смещения концевой массы (m_i) i -го стержневого элемента; β — угол прецессии гири (ГД); I_o — момент инерции корпуса ДРК; I_G — момент инерции ГД относительно оси прецессии; H — кинетический момент ГД; k_D — коэффициент вязкого трения на подвесе ГД; $(\tilde{I}_i e_i)$ — момент инерции i -го стержневого элемента относительно центра масс ДРК на n -м этапе сборки (\tilde{I}_i — собственный момент инерции i -го элемента, $1 \leq e_i < 2$ — параметр i -го тона упругих колебаний конструкции [6]); b_i — изгибная жесткость присоединяемого упругого элемента, одинаковая для всех элементов ДРК; M_x — возмущающий момент внешних сил, действующих на корпус ДРК; $M_G(u_x)$ — управляющий момент, прикладываемый относительно оси прецессии ГД моментным приводом; $u_x = u_x(x, \dot{x})$ — управляющее напряжение (алгоритм управления) на входе моментного привода.

Умножая в системе (2) последние n уравнений на соответствующие коэффициенты e_i и складывая полученные результаты с первым уравнением, перепишем ее в виде

$$\left(I_o + \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i e_i^2 \right) \ddot{x} + \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i \ddot{q}_i + H \dot{\beta} = M_x,$$

$$I_G \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} - H \dot{x} = M_G(u_x),$$

$$e_i \ddot{x} + \ddot{q}_i + \Omega_i^2 q_i = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \in [1, N], \quad (3)$$

где $\left(I_o + \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i e_i^2 \right) \doteq I_n$ — момент инерции ДРК на n -м этапе сборки; $\Omega_i = \sqrt{b_i \tilde{I}_i^{-1}}$ — парциальная частота i -го упругого элемента; n — варьируемое число (номер этапа сборки), принадлежащее ряду целых чисел $n = \overline{1, N}$; M_x — внешнее возмущение и, в частности, $M_x = M_{R_{n+1}}$ — внешний возмущаю-

щий момент ударного типа, возникающий при установке очередного $(n + 1)$ -го элемента (см. § 3).

По отношению к одноканальной системе гиросtabilизации углового положения ДРК, описываемой уравнениями (3), сформулируем следующую задачу.

Общеизвестны повышенные требования к ограниченности массы любых объектов космической техники. Можно принять, что из-за необходимости сохранения конструктивного облика присоединяемого элемента его масса (следовательно, и общая масса ДРК) может быть уменьшена путем снижения изгибной жесткости (b_i) элемента, которое отображается соответствующим уменьшением значения параметра Ω_i^2 в уравнениях (3). Считаем, что все присоединяемые элементы однотипны, т. е. одинаковы относительно механических и геометрических параметров. Поставим задачу найти граничное (малое) значение параметра Ω_{\min} такое, что для всякого $\Omega_i \geq \Omega_{\min}$ собираемая конструкция (в рамках модели (3) с предполагаемым базовым управлением) на всем интервале ее изменения ($n = \overline{1, N}$) стабилизируется относительно заданного направления с сохранением установленных требований к качеству переходных процессов по точности и времени регулирования на каждом этапе сборки.

2. БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ

Пусть в качестве базового алгоритма управления гирином (алгоритма гиросtabilизации на n -м этапе сборки) используется настраиваемый непрерывный пропорционально дифференциальный алгоритм (ПД-алгоритм) управления [7] вида

$$u_x = k_1^n x + k_2^n \dot{x}. \quad (4)$$

Управляющий момент, прикладываемый к рамке гири со стороны моментного привода, формируется в виде

$$M_G^n(u_x) = k_0^n (k_1^n x + k_2^n \dot{x}), \quad (5)$$

где k_0^n — настраиваемый коэффициент усиления, значение которого выбирается в зависимости от текущего момента инерции ДРК $I_n = \left(I_o + \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i e_i^2 \right)$ на n -м этапе сборки; k_1^n, k_2^n — коэффициенты ПД-алгоритма, обеспечивающие устойчивость и требуемое качество управления [7] при фиксиро-



ванных значениях параметров b_i , \tilde{I}_i присоединяемых упругих элементов, характеризующихся парциальными частотами $\Omega_i = 2\pi\tilde{f}_i = \sqrt{b_i\tilde{I}_i^{-1}}$.

Исходные (номинальные) значения коэффициентов базового ПД-алгоритма (4) определяются на основе задания ограничения на степень устойчивости η_x одноканальной изолированной системы, получаемой из системы уравнений (3) без учета упругости конструкции в виде

$$\begin{aligned} I_n \ddot{x} + H\dot{\beta} &= M_x, \\ I_G \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} - H\dot{x} &= M_G^n(u_x). \end{aligned} \quad (6)$$

Характеристическое уравнение этой системы при ее замыкании отрицательной обратной связью, формирующей прикладываемый к рамке ГД управляющий момент (5), записывается для n -го этапа сборки в виде уравнения

$$D_n(\lambda) = \lambda(\lambda^3 + a_2^n \lambda^2 + a_1^n \lambda + a_0^n) = 0, \quad (7)$$

$$a_2^n = \frac{k_D}{I_G}, \quad a_1^n = \frac{H(H + k_0^n k_2^n)}{I_n I_G}, \quad a_0^n = \frac{H k_0^n k_1^n}{I_n I_G}. \quad (8)$$

Корень $\lambda = 0$ характеристического уравнения (7) соответствует неуправляемой координате β . В этом случае условие асимптотической устойчивости невозмущенного движения $x = 0$ системы (6), с законом управления (5), полученное на основе критерия Гурвица, имеет вид: $k_D(H + k_0^n k_2^n) > I_G k_0^n k_1^n$, где коэффициенты k_0^n , k_1^n и k_2^n определяются на основе системы (6).

Далее известным образом [8] на основе решения смещенного уравнения для исходного уравнения (7), приведенного подстановкой $y = \lambda + \eta_n$ к виду

$$D(y) = y^3 + b_2^n y^2 + b_1^n y + 1 = 0,$$

где $b_2^n = \frac{a_2^n}{\sqrt[3]{a_0^n}}$, $b_1^n = \frac{a_1^n}{\sqrt[3]{(a_0^n)^2}}$ — параметры Вышне-

градского, определяются условия устойчивости для смещенного уравнения, обеспечивающие степень устойчивости η_n исходного характеристического уравнения (7) не меньше заданной η_x^* .

При численном решении задачи в ее исходной (постановочной) части основные параметры гипотетического объекта, изображенного на рис. 1, и

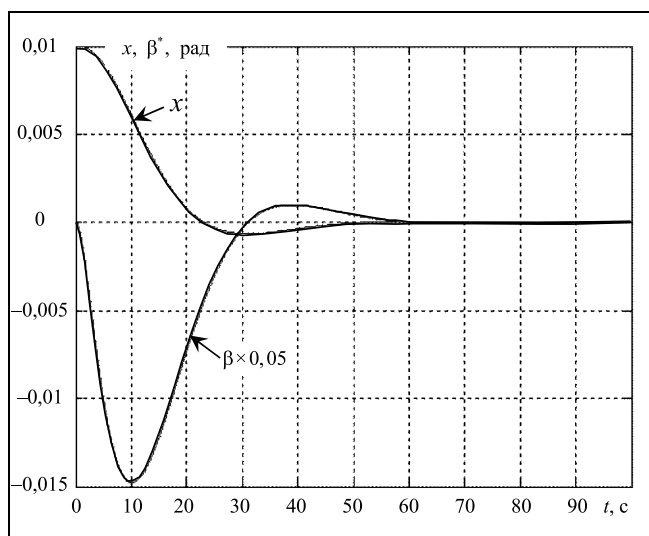


Рис. 2. Желаемая динамика ДРК на всех этапах сборки

гиростабилизатора принимались близкими к параметрам БКК, приведенным в работах [5, 6]:

$$I_o = 16\,000 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2, \quad \tilde{I}_i = (1000 \div 5000) \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2,$$

$$(I_n = (16\,000 \div 74\,000) \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2 \text{ при } 1 \leq e_i < 2),$$

$$I_G = 3,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2 (0,36 \text{ кг}\cdot\text{м}^2), \quad H = 170 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с},$$

$$k_D = 2,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}.$$

Эталонную динамику ДРК определим переходным процессом в системе (6), характеризующимся [5] малым перерегулированием ($\sigma \leq 10\%$), и временем регулирования $\tilde{t}_p \approx 60$ с при условии достижения требуемой точности (погрешности не более $|\Delta_x| = 10^{-4}$ рад) на каждом из этапов сборки БКК (рис. 2).

В общем случае значение требуемой погрешности $|\Delta_x|$ стабилизации ДРК и времени регулирования определяются из условий взаимодействия осуществляющего сборку космического робота с собираемой конструкцией. Задача реализации эталонной динамики ДРК установленного вида решается путем надлежащего (описанного выше) выбора степени устойчивости η_x^* и связанного с ней значения коэффициента усиления системы k_0^n (или k_1^n), соответствующего номеру этапа сборки и типу (\tilde{I}_i) устанавливаемых элементов конструкции.

На рис. 3 приведены построенные на основе компьютерного моделирования уравнений (5) гра-

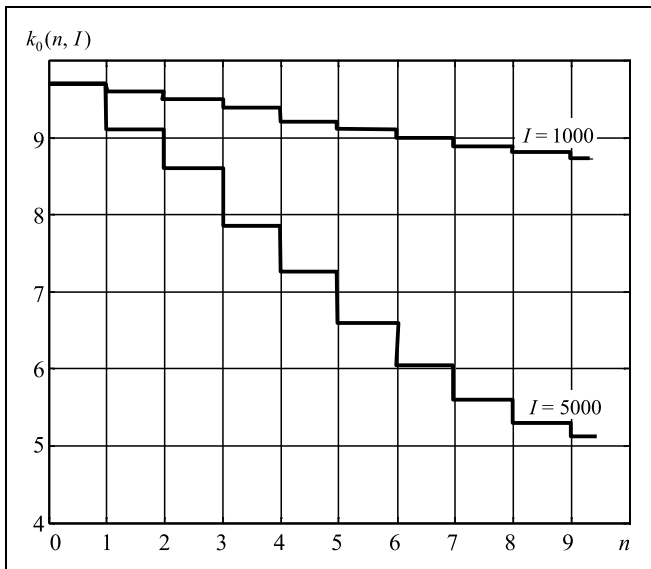


Рис. 3. Изменение коэффициента усиления ПД-алгоритма в процессе сборки ДРК

фики зависимости коэффициента $k_0^n = k_0(n, \tilde{I})$, $n = \overline{1, 9}$, $\tilde{I} = \text{var} = (1000, 5000) \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ от номера этапа сборки n для той или иной группы ($\tilde{I} = \text{var}$) присоединяемых элементов. Соответствующие графики для промежуточных значений параметра $\tilde{I} = (1000 \div 5000) \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ располагаются внутри области, ограниченной графиками, приведенными на рис. 3.

Принятая при этом процедура формирования указанных зависимостей $k_0^n = k_0(n, \tilde{I})$ такова, что для любого, принадлежащего соответствующему графику, значения $k_0(n, \tilde{I})$, обеспечивается желаемая (см. рис. 2) динамика переходных процессов в системе (6) (в частности, требуемое время регулирования $\tilde{t}_p^n \leq 3/\eta_n^*$) на n -м этапе сборки.

3. МОДЕЛЬ УДАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ ДРК

Не учитывая этапа вывода несущего тела (корпуса) БКК в заданную точку орбиты и осуществления требуемой начальной ориентации, считаем, что сборка БКК, состоящего из N элементов, содержит N этапов. Будем полагать, что каждый этап включает в себя процедуру автоматизированного присоединения строительного элемента к корпусу ДРК и операцию по устранению возмущения регулируемой координаты x от воздействия устанавливаемого элемента на несущее тело. Общее время

выполнения n -го этапа определим как $\tau_n = \tau_{n1} + \tau_{n2}$, где τ_{n1} — время действия возмущения (удара), возникающего в процессе установки элемента, τ_{n2} — время устранения возмущения (время регулирования) до уровня достижения требуемой погрешности $|\Delta_x|$.

Для математического описания возмущающего воздействия введем условную модель удара в виде импульса момента, действующего на ДРК n -го этапа сборки, при установке $(n + 1)$ -го стержневого элемента. При установке элемента указанным ранее образом (в радиальном направлении по отношению к полюсу o) на интервале времени установки $\tau_R \doteq \tau_{n1}$ возникает сила R_{n+1} , приложенная к корпусу ДРК вдоль линии $o_{n+1}o$, уравнение которой в СК $ox_o y_o$ имеет вид

$$y_o = \text{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{n+1}\right)x_o, \quad (9)$$

или в форме нормального уравнения прямой [9], проходящей через начало координат o :

$$-x_o \cos \alpha_{n+1} + y_o \sin \alpha_{n+1} = 0. \quad (10)$$

В общем случае прямая (9) (или (10)) не проходит через центр масс ДРК n -го этапа сборки, т. е. через точку c_n с координатами x_{c_n} , y_{c_n} , определяемыми по формулам (1). В этом случае расстояние d_{n+1} от точки $c_n = (x_{c_n}, y_{c_n})$ до линии (10) действия силы R_{n+1} составляет величину [9]:

$$d_{n+1} = y_{c_n} \sin \alpha_{n+1} - x_{c_n} \cos \alpha_{n+1}. \quad (11)$$

При этом возмущающий момент от действия силы $R_{n+1} = \text{const}$, возникающей на интервале установки $(n + 1)$ -го элемента,

$$M_{R_{n+1}} = R_{n+1} d_{n+1}. \quad (12)$$

Динамика полного процесса (N этапов) сборки БКК моделируется последовательностью уравнений (3) и (4), учитывающей номер выполнения текущего n -го ($n = \overline{1, N}$) этапа сборки. Начало реализации n -го этапа определяется начальным моментом установки n -го элемента, совпадающим с моментом завершения процесса регулирования ($x \leq |\Delta_x|$) на $(n - 1)$ -м этапе. При выполнении требований обеспечения эталонной (см. рис. 2) динамики $\tau_{n2} \leq \tilde{t}_p \approx 60$ с и в предположении, что длительность установки τ_{n1} для всех элементов одинакова ($\tau_{n1} = \text{const} = 2 \text{ с} \forall n = \overline{1, N}$), временные интервалы этапов сборки БКК будут постоянны



$\tau_n = \tau_{n1} + \tau_{n2} = \text{const} (= 65 \text{ с}) \forall n = \overline{1, N}$, а начало реализации n -го этапа определяется моментом соприкосновения n -го устанавливаемого элемента с корпусом ДРК. При этом на интервале времени τ_{n1} к корпусу ДРК со стороны устанавливаемого элемента оказывается приложенным возмущающее воздействие (12), присутствующее в виде $M_x \doteq M_{R_{n+1}}$ в правой части первого уравнения системы (3).

Импульсы возмущения $S_x = M_{R_{n+1}} \tau_{n1}$, амплитуда которых определяется подстановкой выражения (11) в формулу (12), возбуждают в системе (3) на интервале сборки БКК дополнительные движения по координатам x и q_i . При этом задача управления (4) состоит в гиросиловом подавлении возникшего отклонения по регулируемой координате x до значений $(x \leq |\Delta_x|) \Big|_{n=\overline{1, N}}$ за установленное принятой выше эталонной динамикой системы (3), (4) время регулирования $\tau_{n2} \leq \bar{t}_p$ на каждом этапе ($n = \overline{1, N}$) сборки ДРК.

4. ГИРОСТАБИЛИЗАЦИЯ ДРК С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ПРИСОЕДИНЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Динамику процессов гиросtabilизации ДРК с упругими элементами на последовательности n этапов сборки БКК ($n \in [1, N]$) будем исследовать методами компьютерного моделирования уравнений (3) и (4) при введенных в § 2 числовых значениях основных параметров ДРК ($I_o = 16\,000 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$, $\tilde{I}_i = 5000 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$, $I_G = 3,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$, $H = 170 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $k_D = 2,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$) и коэффициентов базового ПД-алгоритма ($k_0^n = 9,7 \div 5,2$, $n = \overline{1, N}$, $N = 9$; $k_1^n = 1,5$; $k_2^n = 3,5$). Исследуемый диапазон парциальных частот присоединяемых упругих элементов определим в виде $\tilde{f}_i = 0,1 \div 0,01 \text{ Гц}$ ($\Omega_i^2 = (2\pi\tilde{f}_i)^2 = 0,39 \div 0,0039 \text{ с}^{-2}$), позволяющем оценить влияние на динамику управления ДРК установку как относительно жестких строительных элементов ($\tilde{f}_i = [0,1 \div 0,05] \text{ Гц}$), так и элементов с существенно нежесткими свойствами ($\tilde{f}_i \leq 0,03 \text{ Гц}$).

Проведенные методами компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink исследования, некоторые результаты которого представлены на рис. 4 и 5 в виде графиков переходных процессов в системе гиросиловой стабилизации углового положения ДРК (3), (4), выявили наличие определенной зависимости времени регулирования от

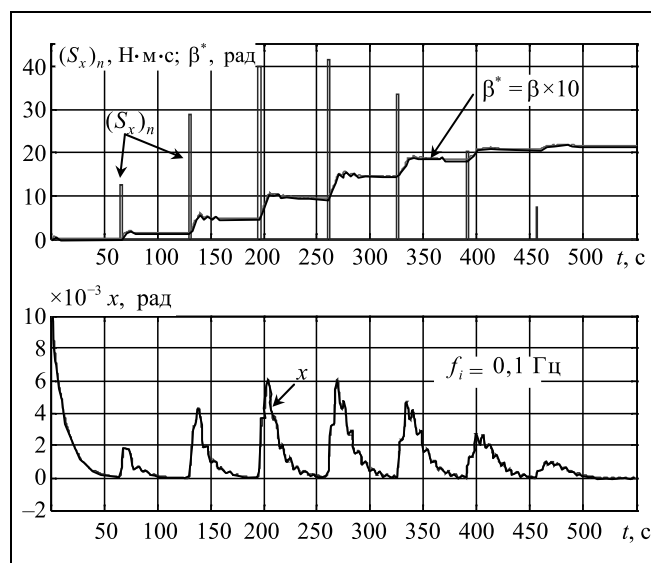


Рис. 4. Переходные процессы при сборке БКК из элементов с парциальной частотой $\tilde{f}_i = 0,1 \text{ Гц}$

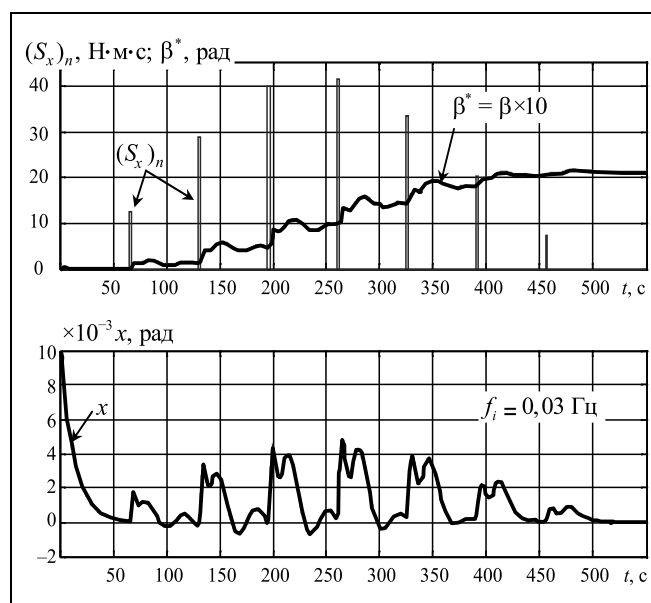


Рис. 5. Переходные процессы при сборке БКК из элементов с парциальной частотой $\tilde{f}_i = 0,03 \text{ Гц}$

парциальной частоты $\Omega_i = 2\pi\tilde{f}_i$ устанавливаемых упругих элементов. В частности, для ДРК с принятыми выше конкретными значениями параметров найдено граничное значение парциальной частоты $\Omega_{\min} = 0,314 \text{ с}^{-1}$ ($\tilde{f}_{\min} = 0,03 \text{ Гц}$), ниже которого для обеспечения желаемой динамики требуется вводить усложненные алгоритмы управления.

В относительно высокочастотной области парциальных частот упругих элементов ($\tilde{f}_i \geq \tilde{f}_{\min} = 0,05$ Гц) желаемая динамика процессов регулирования сохраняется (рис. 4, см. кривые для $\tilde{f}_i = 0,1$ Гц) при значениях $k_0(n, \tilde{I})$, полученных при решении задачи параметрического синтеза базового алгоритма гиросtabilизации ДРК с жесткими элементами (см. рис. 3).

На приведенных графиках видно, что импульсы возмущающих моментов $(S_x)_n = M_{R_{n+1}} \tau_{n1}$, возникающие при установке элементов конструкции, вызывают возмущения угла ориентации ДРК x и упругих координат q_p , оказывающих дополнительное влияние на движение $x(t)$. Видно также, что управляющее воздействие (отображаемое угловыми скоростями прецессии гиросtabilизации $\dot{\beta}$), прикладываемое к корпусу ДРК со стороны системы гиросtabilизации, направлено на устранение возникающих отклонений регулируемой координаты.

В области пониженных жесткостей устанавливаемых элементов ($\tilde{f}_i < \tilde{f}_{\min} = 0,05$ Гц) при тех же значениях $k_0(n, \tilde{I})$ параметров базового алгоритма время регулирования перестает отвечать требованиям желаемой динамики ($\tau_{n2} > \tilde{t}_p$). Это, как видно из представленных на рис. 5 (для случая $\tilde{f}_i = 0,03$ Гц) графиков, приводит к ухудшению точности $(x_n = |A_x|) \Big|_{n=1, N}$ в моменты присоединения элементов конструкции, что может оказаться недопустимым по условиям сборки ДРК.

Подобную динамику процессов гиросtabilизации углового положения ДРК на последовательности этапов сборки БКК следует считать неудовлетворительной, поэтому необходима коррекция исходного алгоритма управления (4).

5. РАСШИРЕННЫЙ АЛГОРИТМ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ ДРК С НИЗКОЧАСТОТНЫМИ УПРУГИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Для решения задачи коррекции алгоритма управления ДРК с низкочастотным спектром упругих колебаний присоединяемых элементов воспользуемся предложенным в работе [10] подходом, основанным на расширении базового алгоритма $u_x = k_1^n x + k_2^n \dot{x}$ дополнительным сигналом вида

$$u_q = k_{1q}^n \hat{q}_\Sigma + k_{2q}^n \dot{\hat{q}}_\Sigma,$$

где $\hat{q}_\Sigma = \sum_{i=1}^n q_i$, $\dot{\hat{q}}_\Sigma = \sum_{i=1}^n \dot{q}_i$ — получаемые с помощью фильтра Калмана [11] сигналы оценок упругих координат ДРК.

Соответствующие коэффициенты усиления k_{1q}^n и k_{2q}^n определяются, исходя из выполнения сформулированных в работе [10] требований к устойчивости и качеству (быстродействию) процесса гашения упругих колебаний с помощью прикладываемого к входу гиросtabilизации управляющего моментного воздействия

$$M_G^n(u_x) = k_0^n (k_1^n x + k_2^n \dot{x} + k_{1q}^n \hat{q} + k_{2q}^n \dot{\hat{q}}). \quad (13)$$

Применяя предложенный в работе [10] итерационный алгоритм вычисления оптимальных значений $(k_{1q}^n, k_{2q}^n)_{\text{opt}}$, позволяющих решать задачу минимизации времени регулирования ($\tau_{n2} \leq \tilde{t}_p \approx 3/\eta_q^n$)

$$\eta_{q\max}^n = \max_{k_{1q}^n, k_{2q}^n} \min_i |\text{Re} \lambda_i|, \quad i = \overline{1, n},$$

для любого фиксированного значения парциальной частоты $\Omega_i = 2\pi \tilde{f}_i$ из низкочастотного диапазона ($\tilde{f}_i \leq 0,05$), можно найти n пар оптимальных значений коэффициентов $(k_{1q}^n, k_{2q}^n)_{\text{opt}}$, которые соответствуют максимальному удалению действительной части ближайшего к мнимой оси корня характеристического уравнения системы (3), определяя, в конечном счете, минимальное время $\tilde{t}_{p\min} \approx 3/\eta_{q\max}^n$ гашения плохо демпфируемой базовым управлением (5) упругой низкочастотной моды q_Σ^n .

В частности, решение этой задачи для ДРК с числовыми значениями параметров системы (3), приведенных в начале параграфа 4 (в том числе $\tilde{I}_i = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $\tilde{f}_i = 0,03$ Гц), дало представленные в таблице соотношения коэффициентов $(k_{1q}^n, k_{2q}^n)_{\text{opt}}$.

Результаты моделирования уравнений (3) управления ориентацией ДРК (собираемой из упругих элементов с параметрами $\tilde{I}_i = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$,

Оптимальные значения параметров расширенного алгоритма

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{1q\text{opt}}^n$	0,27	0,30	0,34	0,35	0,40	0,43	0,09	0,0	0,0
$k_{2q\text{opt}}^n$	0,49	0,46	0,47	0,49	0,53	0,62	0,07	0,0	0,0

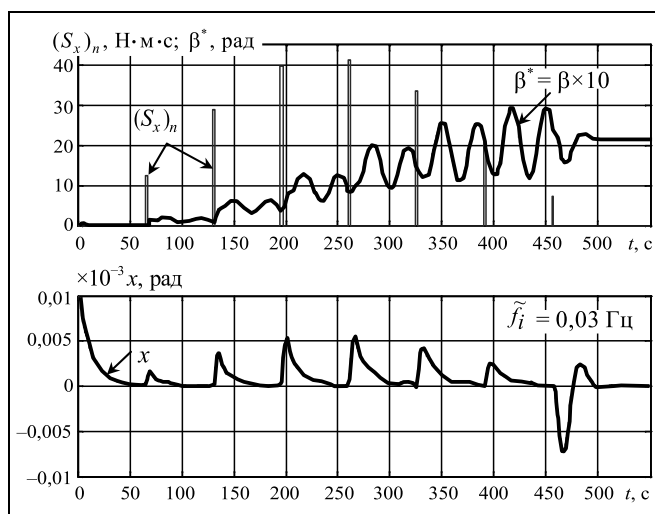


Рис. 6. Переходные процессы при сборке БКК из элементов с парциальной частотой $\tilde{f}_i = 0,03$ Гц при работе расширенного алгоритма гиросtabilизации (13)

$\tilde{f}_i = 0,03$ Гц) с помощью расширенного алгоритма гиросtabilизации (13) со значениями его параметров из таблицы представлены на рис. 6 графиками переходных процессов $x(t, n)$, управляющих ($\dot{\beta}(t)$) и возмущающих ($(S_x)_n$) воздействий.

Сравнение результатов моделирования, представленных осциллограммами на рис. 5 и 6, показывает возможность обеспечения желаемой динамики ДРК по регулируемой координате $x(t, n)$ в процессе сборки БКК из облегченных элементов конструкции ($\tilde{f}_i \leq 0,03$ Гц) при наличии оценок \hat{q}_Σ , $\hat{\dot{q}}_\Sigma$ упругих колебаний элементов ДРК, используемых для формирования расширенного алгоритма гиросtabilизации (13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к исследованию динамики гиросиловой стабилизации автоматически собираемой на орбите большой космической конструкции позволяет выявить особенности, связанные с управлением новым классом объектов космической техники, отличающихся дискретно изменяющейся во времени моделью с ярко выраженными свойствами многочастотной колебательной системы. Показана необходимость коррекции базового алгоритма, связанной с изменением на каждом этапе сборки инерционных свойств дискретно развивающейся конструкции. Определена системно обеспечиваемая возможность уменьшения общей массы конструкции благодаря снижению жесткостных свойств (следовательно, и металлоем-

кости) устанавливаемых строительных элементов. Предложенный в работе расширенный алгоритм работы гиросиловой системы управления позволяет обеспечить требуемую точность и время регулирования, соответствующие установленным показателям качества управления эквивалентным жестким объектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ishijima Yo., Tzeranis D., Dubowsky S.* The on-orbit maneuvering of large space flexible structures by free-flying robots // Pros. of the 8 Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (SAIRAS-2005), Munich, 5–8 Sept., 2005, Noordwijk: ESTEC. — 2005. — P. 419–426. (ESA SP. ISSN 1609-042X. No 603).
2. *Буякас В.И.* Многозеркальные управляемые конструкции // Космические исследования, т. 28. — № 5. — 1990. — С. 776–786.
3. *Bekey I.* An extremely large yet ultra lightweight space telescope and array. (Feasibility assessment of a new concept). Bekey Designs, Inc. 46245 Quarter Charge Dr. Annandale, VA 22003, — 1999.
4. *Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М.* Метод построения математической модели дискретно развивающейся большой космической конструкции // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 10. — С. 15–33.
5. *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.
6. *Бурносков С.В., Козлов Р.И.* Синтез цифровой системы гиросtabilизации упругого КА методом ВФЛ // Там же. — С. 85–101.
7. *Крутова И.Н., Суханов В.М.* Динамика гиросиловой стабилизации крупногабаритных спутников при использовании настраиваемого ПД-алгоритма управления // Проблемы управления. — 2012. — № 5. — С. 74–80.
8. *Воронов А.А.* Основы теории автоматического управления. Ч. 1. — М.-Л.: Энергия, 1965.
9. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1986.
10. *Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М.* Стабилизация низкочастотных колебаний конструкции крупногабаритного спутника с гиросиловым управлением // Автоматика и телемеханика. — 2013. — № 3. — С. 120–135.
11. *Ермилов А.С., Ермилова Т.В.* Непрерывный фильтр Калмана для оценивания координат упругих колебаний деформируемых космических аппаратов с гиросиловой стабилизацией // Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: Тез. докл. 2-й Всерос. научно-техн. конф. М.: МОКБ «Марс», — 2012. — С. 21–22.

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

Глумов Виктор Михайлович — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, ✉ vglum@ipu.ru,

Крутова Инесса Николаевна — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник,

Суханов Виктор Миньонович — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ✉ suhvv@ipu.ru,

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