

Управление в технических системах

© 2023 г. В.Ю. РУТКОВСКИЙ, д-р техн. наук (vglum@ipu.ru),
В.М. ГЛУМОВ, д-р техн. наук (vglum@ipu.ru),
А.С. ЕРМИЛОВ канд. техн. наук (44eas@mail.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ БОЛЬШОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ¹

Решается задача угловой ориентации и стабилизации космической конструкции при ее сборке на орбите. Рассматривается вариант конструкции, в состав которой входят упругие элементы, устанавливаемые в процессе сборки. Упругие элементы конструкции не имеют датчиков для получения информации о параметрах их деформаций. Предлагаются алгоритмы управления, обеспечивающие устойчивость углового движения конструкции. Для получения необходимой информации используется нелинейный расширенный фильтр Калмана. Разработан алгоритм совместного оценивания координат углового движения рассматриваемой механической системы и координат тонов упругих колебаний, а также алгоритм идентификации их ненаблюдаемых параметров. Приведены результаты математического моделирования варианта механической системы космической конструкции, которые подтверждают работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов оценки координат и параметров.

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм управления, космическая конструкция, гироскопический привод, демпфирование колебаний, оценивание координат.

DOI: 10.31857/S0005231023080081, EDN: HCPDXK

1. Введение

Современные космические аппараты (КА) представляют собой динамические объекты управления, механические структуры которых содержат упругие элементы. В [1] отмечается, что по мере увеличения размеров и усложнения механической структуры таких аппаратов растет влияние упругих свойств конструкции на динамику режима ориентации. Кроме того, существует тенденция к усложнению самой конструкции современных КА, например использование протяженных упругих элементов. Возмущение в динамику КА привносит и трансформация элементов изменяемость конструкции в

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00073).

процессе эксплуатации КА [2]. С развитием космических технологий появились крупногабаритные космические конструкции, получившие наименование «большие космические конструкции» (БКК), которые могут создаваться в космосе различными способами. БКК — многомерная многочастотная механическая система с изменяющимися параметрами [3, 4]. Одними из первых БКК рассматривались крупногабаритные зонтичные рефлекторы, создание конструкций которых предполагалось с помощью сборки в космосе [5]. Развитие космической робототехники позволяет решать задачи сборки БКК с использованием различных роботизированных устройств [6]. В [7] отмечается, что развитие космической робототехники характеризуется наличием двух тенденций. С одной стороны, предполагается совершенствование элементов перспективной космической инфраструктуры типа крупногабаритных многомодульных КК, например орбитальных станций, у которых неотъемлемой составляющей являются средства робототехники. С другой стороны, все больше обращается внимание на робототехническое сервисное обслуживание, трактуемое в широком смысле и подразумевающее также роботизированные монтажные операции применительно к весьма широкому классу объектов [8]. Из робототехнических средств предполагается активное использование космических манипуляционных роботов [9], в том числе свободно летающих роботов [10].

В настоящей работе рассматривается собираемая в космосе БКК зонтичного типа, которая представляет собой динамический объект управления с переменными параметрами, с большим и дискретно изменяющимся во времени числом степеней свободы. Как механическая система, такая БКК может рассматриваться в виде последовательности формируемых в процессе сборки промежуточных механических структур. Конструкция содержит упругие элементы, устанавливаемые в процессе сборки с помощью космического манипулятора или свободно летающего космического манипуляционного робота. Рассматривается вариант БКК, у которой упругие элементы не имеют датчиков информации о координатах и параметрах колебаний. Одними из основных задач управления БКК являются управление ориентацией и стабилизация осей корпуса конструкции. Решение этой задачи традиционно получается на основе релейных или дискретных алгоритмов [11]. Разрывной характер управляющих воздействий на корпус и ударные воздействия при установке новых элементов конструкции являются причинами возникновения упругих колебаний БКК. При управлении угловым движением БКК возникает противоречие между основной целью управления упругим динамическим объектом как жестким телом и необходимостью демпфирования возникающих упругих колебаний. Отсутствие сил атмосферного сопротивления приводит к накоплению энергии упругих колебаний в процессе управления «жестким» движением БКК. Превышение критической амплитуды упругих колебаний и близость их частот к частотам управления «жестким» движением приводят к неустойчивости системы [12]. Отсутствие точного определения переменных параметров математической модели (ММ) в наземных условиях приводит

к необходимости решать задачу устойчивого и точного управления угловым движением на всех этапах сборки БКК с использованием методов робастного или адаптивного управления динамическими объектами [13].

В [14] предлагается алгоритм управления ориентацией БКК при наличии низких частот упругих колебаний, существенно влияющих на качество переходных процессов вследствие близости собственных частот конструкции к частоте управления ее «жестким» движением. В [15] решается задача обеспечения робастной устойчивости упругих колебаний КА с нелинейной системой управления ориентацией, использующей двигателя-маховики. Решение основано на целенаправленном изменении границ областей устойчивости в пространстве параметров объекта и регулятора с целью максимизации числа робастно устойчивых упругих компонент конструкции КА. Следует отметить, что алгоритмы, обеспечивающие робастное управление, эффективны для окончательно собранной комической конструкции (КК). Предлагаемый в [14, 15] подход ограничен необходимостью получения текущей информации о состоянии системы и параметрах ее ММ. Алгоритмы адаптивного управления позволяют обеспечить устойчивость и гашение колебаний в достаточно широком диапазоне значений собственных частот упругих колебаний БКК при минимальном значении конструкционного демпфирования. В [16] были определены три типа стратегии адаптивного управления КК на последовательности этапов ее изменения при сборке в космосе. Первый тип: управление с использованием анализа и прогноза состояния упругих колебаний БКК. Второй тип: управление с оценкой фазы доминирующей колебательной составляющей в спектре частот упругих колебаний в момент переключения управления. Третий тип: управление на основе нечеткой логики [17]. В [18] предлагается алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью угловым движением собираемой БКК. Его функционирование не зависит от интенсивности и спектрального состава входных воздействий и не требует оценивания упругих колебаний БКК. Однако алгоритм обеспечивает высокую точность управления при больших энергетических затратах. В настоящее время уделяется внимание реализации первого типа стратегии адаптивного управления БКК, при котором используются методы идентификации и оценивания состояния механической системы конструкции. В [11] предложено активное демпфирование упругих колебаний конструкции Международной космической станции двигателями ориентации с использованием алгоритмов идентификации. Для получения необходимой информации для управления угловым движением космической конструкции с упругой механической системой целесообразно использовать алгоритмы оценивания на основе теории фильтрации Калмана-Бьюси [19]. В [20] решена задача оценивания координат упругих колебаний КК с использованием нелинейного расширенного фильтра Калмана. В настоящей работе (в развитие [20]) разработан алгоритм совместного оценивания координат углового движения механической системы и неизмеряемых координат тонов упругих колебаний, а также алгоритм идентификации их ненаблюдаемых параметров. Решается задача формиро-

вания алгоритмов управления угловой стабилизацией КК на этапах сборки. Предполагается, что на каждом этапе сборки происходит подсоединение элемента конструкции, вызывающее упругие колебания, которые необходимо демпфировать в течение заданного промежутка времени с использованием силовых гироскопических исполнительных органов системы угловой стабилизации БКК.

2. Математическая модель углового движения БКК

Структуру механической системы БКК зонтичного типа будем рассматривать в виде совокупности твердых тел, одно из которых является несущим. Остальные (носимые) тела являются строительными элементами, присоединяемыми в том или ином порядке к несущему телу при использовании спиральной схемы сборки каркаса «зонтичного» типа. Такая механическая система содержит нежесткие элементы и характеризуется дискретно изменяющимся числом степеней свободы [21]. В точках присоединения элементов конструкции учитываются вращательная степень свободы в рассматриваемой плоскости движения и упругая связь, ограничивающая возможные смещения элементов областью малых отклонений относительно состояния равновесия [22]. При использовании в качестве исполнительного органа собираемой БКК гироскопического силового привода, содержащего три одинаковых гиродина (ГД), установленных по схеме трехлучевой звезды, возникают взаимосвязи каналов гиросtabilизации, которые обусловлены инерционными и гироскопическими влияниями [23]. Упрощенная ММ пространственного углового движения механической системы рассматриваемого типа БКК, полученная из полной ММ, подробно представлена в [23]. Для решения задачи аналитического синтеза структуры алгоритмов управления ГД модель движения БКК с гиросиловым приводом, пренебрегая перекрестными влияниями движений ГД, можно упростить до трех однотипных каналов управления и гиросtabilизации БКК вида

$$(1) \quad \begin{aligned} I_x \ddot{\chi} + \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{I}_{i,x} \ddot{q}_{i,x} - H \dot{\beta} + a I_{\beta} \ddot{\beta}_s + F(\dot{\chi}) &= M_x, \\ a_{i,x} \ddot{\chi} + \ddot{q}_{i,x} + b_{i,x} \dot{q}_{i,x} + c_{i,x} q_{i,x} &= 0, \quad i = \overline{1, n_x}, \\ I_{\beta} \ddot{\beta} + k_d \dot{\beta} + H \dot{\chi} + a I_{\beta} \ddot{\beta}_s &= M_u(u_x), \end{aligned}$$

где $\chi = (\psi, \varphi, \vartheta)^T$ — вектор углов ориентации корпуса, $\beta = (\beta_{\psi}, \beta_{\varphi}, \beta_{\vartheta})^T$ — вектор углов прецессии рамок ГД, $q = (q_k)^T$ — составной вектор координат, характеризующих упругие колебания элементов конструкции по каждому из трех каналов углов ориентации так, что $q_k = (q_{i,k})^T$, $i = \overline{1, n_x}$, где n_x — число учитываемых в канале χ_k упругих координат, ($k = \overline{1, 3}$); $\beta_s = [(\beta_{\varphi} + \beta_{\vartheta}), (\beta_{\psi} + \beta_{\vartheta}), (\beta_{\varphi} + \beta_{\psi})]^T$; $a = \cos(\pi/4 = 0,707$ (для установки ГД типа “звезда”), I_{β} — моменты инерции рамок ГД; $H = \text{diag}(h_1, h_2, h_3)$ — диа-

гональная матрица кинетических моментов ГД; k_d — коэффициент демпфирования по оси подвеса ГД; $a_{i,x}, b_{i,x}, c_{i,x}$ — параметры уравнений колебаний упругих элементов; $I_x = \bar{I}_x + \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{I}_{i,x}$, где \bar{I}_x — диагональная матрица осевых моментов инерции корпуса, $\tilde{I}_{i,x}$ — матрица инерционного влияния i -го упругого элемента на динамику конструкции; $F(\dot{\chi})$ — вектор нелинейных функций, содержащих произведения $\chi_i \chi_j$, $i, j = \overline{1, 3}$, $i \neq j$; M_x — вектор возмущающих моментов внешних сил, действующих на корпус; $M_u(u_x)$ — вектор управляющих моментов, прикладываемых относительно осей рамок ГД; u_x — вектор управляющих напряжений, компоненты которого подаются на входы соответствующих моментных приводов ГД.

В режиме угловой ориентации и стабилизации БКК на этапе сборки значения скоростей $\dot{\chi}_k$ достаточно малы, что позволяет пренебречь в $F(\dot{\chi})$ произведениями $\chi_i \chi_j$, $i, j = \overline{1, 3}$, $i \neq j$. При аналитическом исследовании гиросилового управления с тремя одинаковыми ГД целесообразно пренебречь межканальными перекрестными связями и считать в (1) $aI_\beta \ddot{\beta}_s = 0$ [22]. Тогда система (1) имеет вид

$$(2) \quad \begin{aligned} I_x \ddot{\chi} + \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{I}_{i,x} \ddot{q}_{i,x} - H \dot{\beta} &= M_x, \\ a_{i,x} \ddot{\chi} + \ddot{q}_{i,x} + b_{i,x} \dot{q}_{i,x} + c_{i,x} q_{i,x} &= 0, \quad i = \overline{1, n_x}, \\ I_\beta \ddot{\beta} + k_d \dot{\beta} + H \dot{\chi} + aI_\beta \ddot{\beta}_s &= M_u(u_x). \end{aligned}$$

ММ (2) является основой для декомпозиции ее на три подсистемы, которые соответствуют изолированным каналам гиросtabilизации [22].

3. Алгоритмы управления угловым движением БКК

Синтез алгоритмов управления динамическими объектами с ММ вида (1) или (2) традиционно проводится последовательно двумя шагами [22]. На первом шаге определяются тип и параметры алгоритмов, формирующих величины компонент вектора $u_x(t)$, до начала сборки без учета упругих колебаний ($q = 0$). Такие алгоритмы называются базовыми, при синтезе которых ММ (2) преобразуется к виду

$$(3) \quad \begin{aligned} I_x \ddot{\chi} - H \dot{\beta} &= M_x, \\ I_\beta \ddot{\beta} + k_d \dot{\beta} + H \dot{\chi} + aI_\beta \ddot{\beta}_s &= M_u(u_x). \end{aligned}$$

На втором шаге синтеза для стабилизации и гашения упругих колебаний предлагается дополнительно к базовому алгоритму сформировать алгоритм управления, в котором используется информация об упругих колебаниях элементов и их параметрах.

В качестве базовых алгоритмов управления гиродинами в режиме стабилизации БКК на этапе сборки целесообразно применение ПД-алгоритмов в каждом k -м канале в виде

$$u_{x,k}(t) = p_{1,k}\chi_k(t) + p_{2,k}\dot{\chi}_k(t), \quad k = \overline{1,3},$$

где $p_{1,k}, p_{2,k}$ — коэффициенты, которые выбираются с учетом параметров уравнений (3) и без учета упругости конструкции из условий обеспечения устойчивости и требуемого качества управления.

Управляющие моменты, прикладываемые относительно осей прецессии ГД, формируются в виде [22]

$$(4) \quad M_{u,k}(u_{x,k}) = p_{0,k}(p_{1,k}\chi_k(t) + p_{2,k}\dot{\chi}_k(t)), \quad k = \overline{1,3},$$

где коэффициенты $p_{0,k}$ определяются конкретными конструкционными характеристиками корпуса и устанавливаются в зависимости от моментов инерции I_x на этапе сборки. Следует отметить, что ММ (3) с алгоритмами (4) описывают линейную динамическую систему с постоянными параметрами на этапе сборки, для которой из анализа ее характеристических уравнений в каждом k -м канале определяется условие устойчивости по вектору угловых скоростей $\dot{\chi}$ в виде [22]

$$(5) \quad k_d(h_k + p_{0,k}p_{2,k}) > I_\beta p_{0,k}p_{1,k}, \quad k = \overline{1,3}.$$

На основе тех же характеристических уравнений решается задача определения значений коэффициентов $p_{1,k}, p_{2,k}$ алгоритмов (4), которые обеспечивают требуемое время регулирования $t_{r,k} \approx 3/\eta_k^*$, $k = \overline{1,3}$ по координатам вектора χ . Здесь η_k^* — заданные значения степеней устойчивости характеристических уравнений [22].

Исследования динамики БКК зонтичного типа показали, что при увеличении числа упругих элементов в спектре частот появляются пониженные частоты упругих колебаний. Следует отметить, что гиросиловая система с базовым алгоритмом (4) обеспечивает необходимое демпфирование высокочастотных упругих колебаний. Однако при этом в указанной низкочастотной области процессы демпфирования упругих колебаний средствами базового управления (4) при условии (5) оказываются излишне затянутыми [22]. Подобная динамика процессов ориентации и стабилизации углового положения БКК является неудовлетворительной. Кроме этого, увеличение времени демпфирования упругих колебаний создает известные трудности при использовании свободно летающего космического манипуляционного робота в процессе сборки БКК [24]. Указанные недостатки требуют усложнения исходного базового алгоритма управления (4). Возможный путь коррекции базового алгоритма состоит в организации подсистемы дополнительной гиросиловой стабилизации низкочастотных упругих колебаний БКК, использующей оценки $\hat{q}_{i,x}, \hat{q}_{i,x}$ соответствующих упругих координат. Дополнительная подсистема

подключается после окончания маневра переориентации и установки элемента конструкции на этапе сборки. Для ускорения гашения колебаний подсистема формирует на входах ГД дополнительные воздействия вида

$$(6) \quad M_{d,k}(u_{q,k}) = \sum_{i=1}^{n_k} \tilde{p}_{1,k,i} \hat{q}_{k,i} + \sum_{i=1}^{n_k} \tilde{p}_{2,k,i} \dot{\hat{q}}_{k,i}, \quad k = \overline{1,3},$$

где $\hat{q}_k, \dot{\hat{q}}_k$ — векторы оценок упругих координат и их производных, $\tilde{p}_{1,k,i}, \tilde{p}_{2,k,i}$ — постоянные на этапе сборки коэффициенты.

При выборе значений коэффициентов в (6) необходимо учитывать значения оценок параметров в уравнениях упругих колебаний ММ (2). Оценки значений парциальных частот $\omega_{i,x} = \sqrt{c_{i,x}}$ из низкочастотного спектра упругих колебаний позволяют выбрать коэффициенты $\tilde{p}_{1,k,i}, \tilde{p}_{2,k,i}$, которые обеспечивают устойчивость и минимальное время гашения упругой компоненты [22]. При использовании оценок $\hat{\chi}, \dot{\hat{\chi}}$ с учетом (6) управляющие моменты формируются в виде

$$(7) \quad M_{u,k}(u_{x,k}) = p_{0,k} \left[p_{1,k} \left(\hat{\chi}_k - I_x^{-1} \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{I}_{i,k} \hat{q}_{i,k} \right) + \right. \\ \left. + p_{2,k} \left(\dot{\hat{\chi}}_k - I_x^{-1} \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{I}_{i,k} \dot{\hat{q}}_{i,k} \right) \right], \quad k = \overline{1,3}.$$

Коэффициенты усиления в (7) при оценках $\hat{q}_{i,k}, \dot{\hat{q}}_{i,k}$ зависят от значений $\tilde{I}_{i,k}$, которые могут быть меньше значений I_x на порядок и более. Для ускоренной активной компенсации влияния упругих колебаний на угловую ориентацию БКК целесообразно в (7) ввести перенастраиваемые коэффициенты $\tilde{p}_{1,k,i}, \tilde{p}_{2,k,i}$. Тогда алгоритмы (7) принимают вид

$$(8) \quad M_{u,k}(u_{x,k}) = p_{0,k} \left[p_{1,k} \left(\hat{\chi}_k - \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{p}_{1,k,i} \hat{q}_{i,k} \right) + \right. \\ \left. + p_{2,k} \left(\dot{\hat{\chi}}_k - \sum_{i=1}^{n_x} \tilde{p}_{2,k,i} \dot{\hat{q}}_{i,k} \right) \right], \quad k = \overline{1,3},$$

где $\tilde{p}_{1,k,i} \gg p_{1,k} I_x^{-1} \tilde{I}_i, \tilde{p}_{2,k,i} \gg p_{2,k} I_x^{-1} \tilde{I}_i$.

Если упругие элементы не имеют датчиков информации, то необходимо решать задачу получения оценок \hat{q} и параметров упругих колебаний на каждом этапе сборки БКК после его окончания. Для решения данной задачи используется модифицированный вариант предложенного в [20] алгоритма оценивания на основе фильтра Калмана.

4. Синтез алгоритма совместного оценивания координат упругих колебаний и их параметров

Синтез алгоритма совместного оценивания координат углового движения и координат колебаний (тонов) упругих элементов конструкции проведем на примере изолированного канала $\chi_2 = \varphi$, который получается из ММ (2) в виде

$$(9) \quad \begin{aligned} I_\varphi \ddot{\varphi} + \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i \ddot{q}_i - h_2 \dot{\beta} &= M_\varphi, \\ a_i \ddot{\varphi} + \ddot{q}_i + b_i \dot{q}_i + c_i q_i &= 0, \quad i = \overline{1, n_x}, \\ I_\beta \ddot{\beta} + k_d \dot{\beta} + h_2 \dot{\varphi} &= M_u(u_\varphi), \end{aligned}$$

где $M_u(u_\varphi) = p_\varphi u_\varphi$, $p_\varphi = (p_{1,\varphi}, p_{2,\varphi})$ — вектор коэффициентов, $u_\varphi = (\varphi, \dot{\varphi})^T$.

При синтезе алгоритма оценивания полагаем $M_\varphi = 0$. Тогда система (9) преобразуется к виду [20]:

$$(10) \quad \begin{aligned} \ddot{\varphi} - I_\varphi^{-1} h_2 \dot{\beta} &= 0, \\ \left(1 - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n a_i \tilde{I}_i \right) \ddot{q}_i + \left(1 - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1, j \neq i}^n a_j \tilde{I}_j \right) (b_i \dot{q}_i + c_i q_i) + \\ &+ a_i \sum_{i=1, j \neq i}^n \tilde{I}_j (b_j \dot{q}_j + c_j q_j) + a_i h_2 \dot{\beta} = 0, \\ I_\beta \ddot{\beta} + k_d \dot{\beta} + h_2 \left(\dot{\varphi} - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i \dot{q}_i \right) &= p_\varphi u_\varphi. \end{aligned}$$

и угол φ определяется выражением

$$(11) \quad \varphi = \bar{\varphi} - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i q_i,$$

где $\bar{\varphi}$ — угол поворота корпуса, вызванный вращением БКК как жесткого объекта.

Представление координаты φ в виде (11) позволяет применять алгоритмы фильтрации для совместного оценивания координат углового движения рассматриваемой механической системы БКК с ГД, неизмеряемых координат q_i тонов упругих колебаний, а также идентификации параметров упругих колебаний в реальном времени. Следует отметить, что в отличие от [20] система (10) нелинейная, так как содержит неизвестные параметры. Для получения оценок используется нелинейный расширенный фильтр Калмана. При синтезе алгоритма оценивания представим уравнения ММ (10) и (11) в форме Коши

$$(12) \quad \dot{x}(t) = f(x(t)) + du_\varphi + Cw(t),$$

где $x \in R^{5n+4}$ — вектор состояния, $x = (\bar{\varphi}, \dot{\varphi}, \beta, \dot{\beta}, q_i, \dot{q}_i, a_i, b_i, c_i)^T$, $i = \overline{1, n}$, $b \in R^{5n+4}$ с ненулевым элементом $d_4 = 1$, $f(x)$ — нелинейная вектор-функция, определяемая из (10) и (11),

$$\begin{aligned} f_1 &= x_2, \quad f_2 = I_\varphi^{-1} h_2 x_{2n+4}, \quad f_{2i+1} = x_{2i+2}, \quad f_{2n+3} = x_{2n+4}, \\ f_{2n+4} &= I_\beta^{-1} \left[d_4 u_\varphi - k_d x_{2n+4} - h_2 \left(x_2 - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i x_{2i+2} \right) \right], \\ f_{2i+2} &= (\cdot)^{-1} \left[x_{2n+4+i} h_2 x_{2n+4} - (\cdot)_j (x_{3n+4+i} x_{2i+2} + x_{4n+4+i} x_{2i+1}) - \right. \\ &\quad \left. - x_{2n+4+i} \sum_{j=1, j \neq i}^n \tilde{I}_j (x_{3n+4+j} x_{2j+2} + x_{4n+4+j} x_{2j+1}) \right], \end{aligned}$$

где $(\cdot) = 1 - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n a_i \tilde{I}_i$, $(\cdot)_j = 1 - I_\varphi^{-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n a_j \tilde{I}_j$, $j = \overline{1, n}$, $j \neq i$,

$f_{2n+4+i} = f_{3n+4+i} = f_{4n+4+i} = 0$; $w \in R^{4n+2}$ — вектор шумов,

$C = \text{diag}(C_0 \cdots C_i \cdots)$ — блочно-диагональная матрица шумов объекта, содержащая блоки $C_0 \in R^{4 \times 2}$, $C_i \in R^{5 \times 4}$. Элементы матрицы C_0 нулевые, кроме $c_{21} = c_{42} = 1$, в матрицах C_i также нулевые элементы, кроме $c_{21,i} = c_{32,i} = c_{43,i} = c_{64,i} = 1$.

Предполагается, что в (10) неизвестные параметры упругих колебаний приняты постоянными на этапе сборки. При необходимости в вектор состояния χ можно включить любые параметры, что приводит к громоздкости математических выражений.

Если на борту БКК измеряются только координаты φ и $\dot{\varphi}$, то уравнение измерений имеет вид

$$(13) \quad z(t) = Gx(t) + v(t),$$

где вектор измерений $z \in R^2$ имеет координаты $z_1 = x_1 - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i x_{4+i} + v_1$,

$z_2 = x_2 - I_\varphi^{-1} \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i x_{4+n+i} + v_2$; v — вектор шумов измерителей.

Структура матрицы измерений $G \in R^{2 \times (5n+4)}$ имеет вид [20]

$$G = [C_1 G_2 \cdots G_{i+2}],$$

где C_1, G_2, G_{i+2} — присоединенные матрицы, $i = \overline{1, n}$; G_1 — квадратная единичная матрица, G_2 — квадратная нулевая матрица; матрица $G_{i+2} \in R^{2 \times 5}$ состоит из следующих ненулевых элементов: $g_{11,i} = g_{22,i} = -I_\varphi^{-1} \tilde{I}_\varphi$.

Предполагается, что начальные значения $x(t_0)$, w , v независимы между собой, w и v — гауссовские белые шумы с нулевыми математическими ожиданиями и корреляционными функциями:

$$M\langle w(t)w^T(\tau) \rangle = Q_w(t)\delta(t - \tau), \quad M\langle v(t)v^T(\tau) \rangle = Q_v(t)\delta(t - \tau).$$

Здесь δ — дельта-функция Дирака, диагональные матрицы интенсивности шумов $Q_w(t)$ и $Q_v(t)$ непрерывны и положительно определены для $t \geq t_0$. Тогда задача синтеза алгоритма оценивания координат $x(t)$ по измерениям $z(t)$ сводится к частному случаю непрерывного нелинейного расширенного фильтра Калмана [20] с постоянными матрицами C и G :

$$(14) \quad \begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= f(\hat{x}) + du(t) + P(t)G^T Q_v^{-1}[z(t) - G\hat{x}(t)], \\ \dot{P}(t) &= D(\hat{x})P(t) + P(t)D^{-1}(\hat{x}) - P(t)G^T Q_v^{-1}GP(t) + CQ_w(t)C^T, \end{aligned}$$

где $\hat{x}(t)$ — вектор оценок координат вектора $x(t)$, $P(t)$ — ковариационная матрица, $D(\hat{x}) = \partial f(\hat{x})/\partial \hat{x}$ — матрица Якоби.

5. Математическое моделирование

Исследование возможностей алгоритма управления (8) для активной компенсации упругих колебаний при угловой ориентации БКК по координате φ проведено с помощью математического моделирования с использованием в (8) оценок, получаемых на основе алгоритма (14). Предполагалось, что количество тонов и величины их параметров известны и одинаковы как в ММ (9), так и в алгоритме оценивания (14), кроме тех параметров, которые считаются в (14) неизвестными. Для сокращения времени моделирования в (9) исследовались только два тона, т.е. $n = 2$, а для формирования момента управления использовались оценки $\hat{\varphi}$, $\dot{\hat{\varphi}}$ и \hat{q}_i , $\dot{\hat{q}}_i$ БКК. В качестве неизвестных были выбраны постоянные параметры c_1 и c_2 , а их оценки \hat{c}_1 и \hat{c}_2 использовались в (14).

Сигнал управления формируется на основе (8) в виде

$$(15) \quad u_\varphi = p_1 \hat{\varphi} - \sum_{i=1}^2 \tilde{p}_{1,i} \hat{q}_{1,i} + p_2 \dot{\hat{\varphi}} - \sum_{i=1}^2 \tilde{p}_{2,i} \dot{\hat{q}}_{2,i},$$

где коэффициенты $\tilde{p}_{1,i}$, $\tilde{p}_{2,i}$ имеют тот же порядок, что и p_1 и p_2 соответственно.

При моделировании динамики угловой ориентации с целью получения измерений в качестве ММ использовался вариант системы (9) с алгоритмом (15) в виде [20]

$$(16) \quad \dot{y} = Ay + \bar{d}u_\varphi,$$

где $y \in R^8$ — вектор состояния, $y = (\bar{\varphi}, \dot{\bar{\varphi}}, \beta, \dot{\beta}, q_1, q_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2)^T$, $\bar{d} \in R^8$ — вектор с одним ненулевым элементом $\bar{d}_4 = 1$.

На основе (16) формировался вектор измеряемых координат $z = (\varphi^*, \dot{\varphi}^*)^T$ с помощью выражения $z = \bar{G}y + v$, где матрица $\bar{G} \in R^{2 \times 8}$ имеет ненулевые элементы $\bar{g}_{1,1} = \bar{g}_{2,2} = 1$, $\bar{g}_{1,5} = \bar{g}_{2,7} = -I_\varphi^{-1} \tilde{I}_1$, $\bar{g}_{2,6} = \bar{g}_{2,8} = -I_\varphi^{-1} \tilde{I}_2$, $v = (v_1, v_2)^T$ — вектор шумов измерений.

В (14) использовалась ММ (12) с вектором $x \in R^{10}$, в который включены идентифицируемые неизвестные параметры c_1 и c_2 , $x = (\bar{\varphi}, \dot{\varphi}, \beta, \dot{\beta}, q_i, \dot{q}_i, c_1, c_2)^T$, $i = \overline{1, 2}$, $d \in R^{10}$ — вектор с одним ненулевым элементом $d_4 = 1$. $C \in R^{10 \times 6}$ — матрица шумов с ненулевыми элементами $c_{2,1} = c_{4,2} = c_{6,3} = c_{8,4} = c_{9,5} = c_{10,6} = 1$. Модель измерений для алгоритма (14) формируется в виде $\hat{z} = G\hat{x}$, где матрица $G \in R^{2 \times 10}$ отличается от матрицы \bar{G} наличием девятого и десятого нулевых столбцов. Матрицы $Q_w \in R^{6 \times 6}$ и $Q_v \in R^{2 \times 2}$ в (14) приняты постоянными.

Начальные значения при $t_0 = 0$ координат и параметров, а также векторов y , \hat{x} и элементов диагональной ковариационной матрицы $P(0)$ приняты следующими [20]:

$$\begin{aligned} y_1(0) &= 0,017; & y_2(0) &= 0,016 \text{ с}^{-1}; & y_3(0) &= 0,18 \cdot 10^{-3}; \\ y_4(0) &= 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}; & y_5(0) &= 0,017; & y_6(0) &= 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}; \\ y_7(0) &= 0,37 \cdot 10^{-2}; & y_8(0) &= 0,13 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}; \\ a_1 &= 1,2; & a_2 &= 2,32; & b_1 &= 0,24 \text{ с}^{-1}; & b_2 &= 0,12 \text{ с}^{-1}; \\ c_1 &= (0,34)^2 \text{ с}^{-2}; & c_2 &= (0,47)^2 \text{ с}^{-2}; \\ I_\varphi &= 69\,200 \text{ Нмс}^2; & \tilde{I}_1 &= 1270 \text{ Нмс}^2; & \tilde{I}_2 &= 2500 \text{ Нмс}^2; \\ I_\beta &= 1,1 \text{ Нмс}^2; & k_d &= 2,5 \text{ Нмс}; & h &= 240 \text{ Нмс}; \\ p_{1,1} &= 3,9 \cdot 10^{-6}; & p_{2,2} &= 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-2}; & p_{3,3} &= 0,49 \cdot 10^{-2}; \\ p_{4,4} &= 6,1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2}; & p_{5,5} &= 4,7 \cdot 10^{-4}; & p_{6,6} &= 0,54 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-2}; \\ p_{7,7} &= 0,11 \cdot 10^{-4}; & p_{8,8} &= 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-2}; \\ p_{9,9} &= 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-4}; & p_{10,10} &= 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-4}. \end{aligned}$$

Использовались начальные значения оценок:

$$\hat{x}_1(0) = \varphi^*, \quad \hat{x}_2(0) = \dot{\varphi}^*, \quad \hat{x}_j(0) = 0 \quad \forall j = \overline{3, 8};$$

если учесть, что параметры c_1 и c_2 могут быть только положительными, то $\hat{x}_9(0) = 0,002 \text{ с}^{-2}$; $\hat{x}_{10}(0) = 0,005 \text{ с}^{-2}$.

Для моделирования дискретных аналогов непрерывных белых шумов объекта и измерителей принимались следующие среднеквадратические отклонения:

$$\begin{aligned} \sigma_{w,1} &= 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-2}; & \sigma_{w,2} &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-2}; & \sigma_{w,3} &= 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-2}; \\ \sigma_{w,4} &= 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-2}; & \sigma_{w,5} &= 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}; & \sigma_{w,6} &= 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}; \\ \sigma_{v,1} &= 2,6 \cdot 10^{-4}; & \sigma_{v,2} &= 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

Матрицы интенсивности белых шумов Q_w и Q_v приняты диагональными вследствие отсутствия корреляции между шумами объекта и шумами в каналах измерений. Элементы этих матриц вычисляются с помощью выражений

$$q_{w,kk} = 2\sigma_{w,k}^2\tau, \quad k = \overline{1, 6} \quad \text{и} \quad q_{v,jj} = 2\sigma_{v,j}^2\tau, \quad j = \overline{1, 2},$$

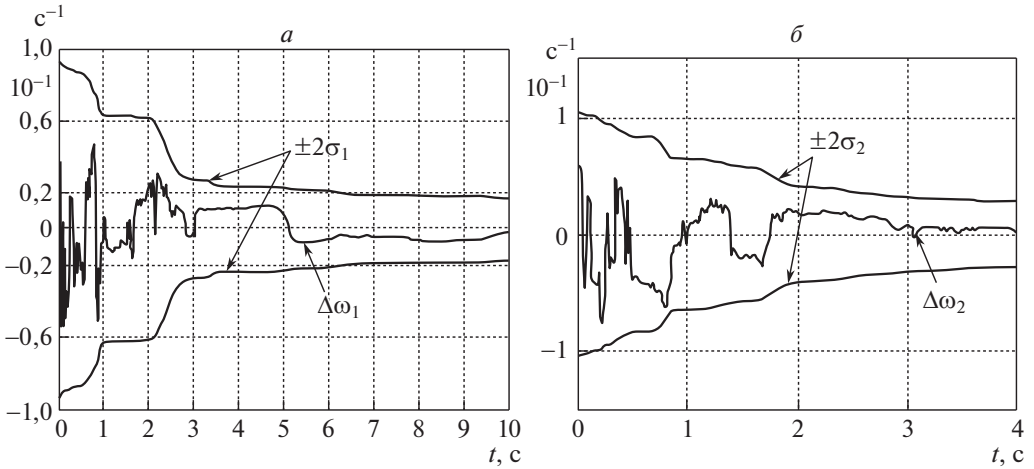


Рис. 1. Ошибки идентификации парциальных частот.

где τ — время корреляции, $\tau \leq \Delta t$, Δt — шаг интегрирования. При этом приняты следующие значения:

$$\begin{aligned}
 q_{w,11} &= 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-3}; & q_{w,22} &= 0,49 \cdot 10^{-14} \text{ c}^{-3}; & q_{w,33} &= 4,8 \cdot 10^{-14} \text{ c}^{-3}; \\
 q_{w,44} &= 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ c}^{-3}; & q_{w,55} &= 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-3}; & q_{w,66} &= 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-3}; \\
 q_{v,11} &= 4,7 \cdot 10^{-12} \text{ c}; & q_{v,22} &= 2,9 \cdot 10^{-13} \text{ c}^{-1}.
 \end{aligned}$$

При статистическом моделировании дискретизация уравнений (14) проводилась с использованием метода Рунге–Кутты четвертого порядка с Δt , который выбирался в диапазоне от 0,002 до 0,005 с.

На рис. 1 представлены графики ошибок идентификации неизмеряемых парциальных частот $\Delta\omega_i(t) = \sqrt{\hat{c}_i} - \sqrt{\hat{c}_i(t)}$, $i = \overline{1,2}$ с удвоенными среднеквадратическими отклонениями, рассчитанными как соответствующие диагональные элементы матрицы $P(t)$: $\sigma_{w,1} = p_{9,9}^{-4}$, $\sigma_{w,2} = p_{10,10}^{-4}$. Из результатов статистического моделирования следует, что время сходимости оценок параметров c_1 до 2% от максимальной величины начального значения составляет в среднем от 3 до 6 с. При этом время сходимости оценок координат $\hat{\varphi}$ и $\dot{\hat{\varphi}}$ до 2% от их максимальных величин составляет в среднем 20–25 с.

С целью проверки возможности применения алгоритма (15) для активной компенсации влияния колебаний упругих частей БКК на его угловую динамику проведено математическое моделирование в режиме угловой стабилизации. Результаты сравнительного моделирования углового движения БКК по координате φ с алгоритмом управления (7) и алгоритмом (15) представлены на рис. 2.

На рис. 2,а представлены графики реальных значений φ (11), полученных при использовании алгоритма (7) с $\tilde{p}_{1,i} = 0,017$, $\tilde{p}_{2,i} = 0,01$, $i = \overline{1,2}$, на рис. 2,б — при использовании алгоритма (15), в котором $\tilde{p}_{1,i} = 3,6$, $\tilde{p}_{2,i} = 2,3$.

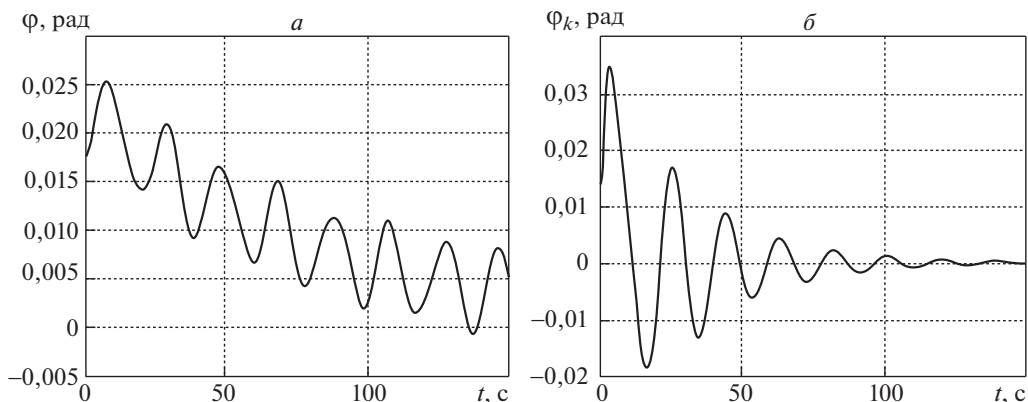


Рис. 2. Процессы стабилизации угла поворота конструкции.

В первом случае затухание упругих колебаний до 2% от максимального значения начального значения амплитуды происходит за ~ 6000 с, во втором случае при активной компенсации влияния упругих колебаний — за ~ 80 с.

При моделировании процесса стабилизации угла поворота до 150 с (см. рис. 2,б) ошибки идентификации парциальных частот колебались в диапазоне от 0,7 до 1,6% от истинных значений параметров ω_i .

6. Заключение

При управлении угловым движением собираемой на орбите БКК, содержащей упругие элементы, возникает проблема демпфирования колебаний при отсутствии информации о новых механических параметрах собираемой конструкции и начальных характеристиках, возникающих на каждом этапе сборки новых упругих компонент. Это требует обеспечения не только своевременной смены стратегии оценивания и соответственно управления при переходе конструкции из одного класса механических систем в другой, но и применения принципов адаптивного управления на интервале развития конструкции внутри каждого этапа сборки выше первого. При необходимости на этапе сборки должна решаться задача оптимизации коэффициентов в алгоритме (8) при координатах тонов упругих колебаний с точки зрения быстродействия.

Синтезированный алгоритм совместного оценивания координат углового движения БКК, тонов упругих колебаний конструкции и их параметров позволяет только по показаниям измерителей углового движения БКК в отсутствие какой-либо объективной информации об упругих колебаниях получать с высокой точностью оценки их неизмеряемых координат и параметров в реальном времени.

Следует отметить, что при построении расширенного фильтра Калмана для оценки координат движения и их параметров такой сложной механиче-

ской системы, как рассматриваемая в работе БКК зонтичного типа, требуется использование полной ММ значительно более высокого порядка, в которой учитывается взаимное влияние колебательных компонент. Такую задачу целесообразно решать при разработке системы для конкретного варианта собираемой конструкции с использованием соответствующего объема вычислительных средств. В данной работе рассматривается принципиальная возможность использования предлагаемого подхода для решения задачи оценивания таких сложных динамических объектов.

Использование синтезированных алгоритмов (8) и (14) при сборке БКК имеет ряд достоинств. Так, при установке первого упругого элемента размерность вектора состояния в алгоритме оценивания увеличивается на пять неизмеряемых координат: две координаты тона упругих колебаний и три параметра колебаний. Так как эти параметры длительное время остаются постоянными, то после их идентификации они становятся известными и дальнейшая идентификация их нецелесообразна, тогда эти три параметра можно исключить из вектора состояния. После установки следующего упругого элемента указанное выше изменение размерности повторяется и вектор состояния увеличивается на пять координат. После процедуры идентификации следующих постоянных параметров вектор состояния также уменьшается на следующие три координаты и т.д. Таким образом, вектор состояния после идентификации параметров колебаний всех упругих элементов БКК увеличивается только на $2n$ координат, где n — количество установленных на БКК упругих элементов.

Результаты статистического математического моделирования доказывают возможность активной компенсации влияния колебаний упругих частей конструкции БКК на динамику угловой ориентации и стабилизации самого БКК с помощью управления вида (15). При моделировании алгоритма идентификации параметров a , b , c проверялись три варианта оценивания, в которых выбирался один из трех параметров, а остальные два считались известными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акуленко Л.Д., Крылов С.С., Марков Ю.Г., Тун Тун Вин, Филиппова А.С. Динамика космического аппарата с упругими и диссипативными элементами в режиме ориентации // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5. С. 106–115.
2. Геча В.Я., Гриневич Д.В., Чирков В.П., Канунникова Е.А. Влияние упругих трансформируемых элементов конструкции на точность стабилизации космического аппарата // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 5. С. 3–6.
3. Nurte G.S., Ryan R.S., Scofield H.N., Sims J.L. Dynamics and control of large space structures // J. of Guidance, Control, Dynam. 1984. V. 7. No. 5. P. 514–526.
4. Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. Ч. 1 // АиТ. 1996. № 7. С. 52–65. Rutkovsky V.Yu., Sukhanov V.M. Large Space Structure: Models, Methods of Study and Control // Autom. Remote Control. 1996. V. 57. No. 7. Part 1. P. 953–963.

5. Mikulas M.M., Collins T.J., Hedgepeth J.M. Preliminary design considerations for 10–40 meter-diameter precision truss reflectors // J. Spacecraft Rockets. 1991. V. 28. No. 4. P. 439–447.
6. Boning P., Dubowsky S. Coordinated control of space robot teams for the on-orbit construction of large flexible space structures // Advanced Robotics. 2010. V. 24. No. 3. P. 303–323.
7. Белоножко П.П. Космическая робототехника для монтажа и сервиса. Потенциальные задачи, концепции перспективных систем // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 4. С. 84–97.
8. Flores-Abad A., Ma O., Pham K., Ulrich S. A review of space robotics technologies for on-orbit serving // Progr. Aerospace Scie. 2014. No. 68. P. 1–26.
9. Papadopoulos E., Aghili F., Ma O., Lampariello R. Manipulation and capture in space: A survey // Front. Robot. AI. 2021. No. 8. P. 1–36.
10. 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).
11. Тьмаков С.Н., Журнов А.В. Алгоритм активного демпфирования упругих колебаний конструкции Международной космической станции // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2014. № 3. С. 37–53.
12. Крутова И.Н., Суханов В.М. Особенности динамики управления деформируемым космическим аппаратом в процессе его преобразования в большую космическую конструкцию // АиТ. 2008. № 5. С. 41–56.
Krutova I.N., Sukhanov V.M. Dynamic features of flexible spacecraft control in process of its transformation into a large space structure // Autom. Remote Control. 2008. V. 69. No. 5. P. 774–787.
13. Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / под ред. Д.А. Новикова. М.: ЛЕНАНД, 2019.
14. Крутова И.Н., Суханов В.М. Синтез модифицированного PD-алгоритма управления угловым движением большой космической конструкции // АиТ. 2009. № 1. С. 39–50.
Krutova I.N., Sukhanov V.M. Design of modified PD algorithm to control angular motion of large space structure // Autom. Remote Control. 2009. V. 70. No. 1. P. 33–42.
15. Крутова И.Н., Суханов В.М. Синтез дискретной системы управления деформируемым космическим аппаратом, обеспечивающей робастную устойчивость упругих колебаний // АиТ. 2009. № 7. С. 25–36.
Krutova I.N., Sukhanov V.M. Design of discrete control system of flexible spacecraft maintaining robust stability of elastic oscillations // Autom. Remote Control. 2009. V. 70. No. 7. P. 1109–1119.
16. Rutkovsky V.Yu., Sukhanov V.M., Zemlyakov S.D., Glumov V.M. Models and methods of control of large space structures with discretely changing construction // Proceedings of International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace (ICNPAA-2008). Cambridge Scientific publishers. Ed. by S. Sivasundaram. 2009. Plenary paper, chapter 12. P. 115–142.
17. Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М. Адаптивная система управления на основе нечеткой логики для большой космической конструкции в процессе ее сборки на орбите // АиТ. 2004. № 10. С. 109–127.

- Glumov V.M., Krutova I.N., Sukhanov V.M.* Fuzzy Logic-based Adaptive Control System for In-orbit Assembly of Large Space Structures // *Autom. Remote Control*. 2004. V. 65. No. 10. P. 1618–1634.
18. *Rutkovsky V.Yu., Glumov V.M., Sukhanov V.M.* New Adaptive Algorithm of Flexible Spacecraft Control // *Complex Systems. Relationships between Control, Communications and Computing*. Dordrecht, The Netherlands: Springer International Publishing. 2016. P. 313–326.
 19. *Kalman R.E., Bucy R.* New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // *Trans. ASME. J. Basic Eng.* 1961. V. 83D. P. 95–108.
 20. *Ермилов А.С., Ермилова Т.В.* Оценивание ненаблюдаемых координат упругих колебаний больших космических конструкций с гиросиловым приводом // *АиТ*. 2013. № 9. С. 143–156.
Ermilov A.S., Ermilova T.V. Estimating Nonmeasurable Coordinates of Elastic Oscillations for Large Space Constructions with a Gyroforce Engine // *Autom. Remote Control*. 2013. V. 74. No. 9. P. 1545–1556.
 21. *Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М.* Метод построения математической модели дискретно развивающейся большой космической конструкции // *АиТ*. 2003. № 10. С. 15–33.
Glumov V.M., Krutova I.N., Sukhanov V.M. A Method of Constructing the Mathematical Model of a Discretely Developing Large Space Structure // *Autom. Remote Control*. 2003. V. 64. No. 10. P. 1527–1543.
 22. *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.
Glumov V.M., Krutova I.N., Sukhanov V.M. Some Features of Powered Gyrostabilization of a Large Space Structure Assembled in Orbit // *Autom. Remote Control*. 2017. V. 78. No. 12. P. 1345–1355.
 23. *Динамика и управление космическими объектами* / под ред. В.М. Матросова, М.Ф. Решетнева, Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние РАН, 1992.
 24. *Glumov V.M.* Adaptive Control of Free-Flying Space Manipulation Robot in the Working Area when Assembling a Large Space Structure in Orbit // *Proceedings of the 12th International Conference “Management of Large Space System Development” (MLSD)* M: IEEE. 2019. P. 1–4.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8911089>

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Матасовым.

Поступила в редакцию 12.10.2022

После доработки 06.02.2023

Принята к публикации 30.03.2023