

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ¹

И.Н. Крутова, В.М. Суханов

Рассмотрен подход к решению задачи адаптации алгоритма управления ориентацией крупногабаритного информационного спутника с изменяющимся спектром частот упругих колебаний конструкции. При синтезе закона перестройки параметров алгоритма приняты во внимание требования к быстродействию системы при переориентации — часто повторяющегося режима для спутников рассматриваемого класса. Приведены примеры компьютерного моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенного адаптивного алгоритма.

Ключевые слова: деформируемый космический аппарат, математическая модель, адаптивное управление.

ВВЕДЕНИЕ

При управлении деформируемыми космическими аппаратами (ДКА), к классу которых относятся крупногабаритные информационные спутники, возникают дополнительные движения в виде многочастотного колебательного процесса, вызванного упругостью конструкции. Эти движения, накладываясь на основное («жесткое») движение ДКА, ухудшают точность ориентации, а в отдельных случаях могут стать причиной неустойчивости системы из-за захвата регулятора упругими колебаниями [1]. Характерные для крупногабаритных спутников низкочастотные слабозатухающие колебания конструкции, возникающие в процессе переориентации, увеличивают время переходного процесса, существенно сокращая срок полезной работы информационного спутника. Поэтому при проектировании системы управления ДКА рассматриваемого класса важно минимизировать время переходного процесса, зависящее от скорости гашения упругих колебаний конструкции.

Для обеспечения вибрационной устойчивости (т. е. устойчивости замкнутой системы по отноше-

нию к упругим колебаниям [1]) и желаемой динамики ДКА при наличии низкочастотных колебаний в работах [2, 3] были предложены алгоритмы

управления, использующие оценки $\hat{x}_i(t)$ модально-физических координат ДКА [1], получаемые в реальном времени с помощью фильтра Калмана [4]. Если бы частоты упругих колебаний не изменялись, то выбранные значения коэффициентов указанных алгоритмов, оставаясь постоянными, обеспечивали бы требуемые показатели качества управления. Однако наличие в рассматриваемом классе крупногабаритных ДКА нежестких панелей солнечных батарей, поворачивающихся в процессе слежения за Солнцем относительно осей связанной с космическим аппаратом системы координат, приводит к периодическому изменению собственных частот математической модели ДКА в каждом из трех каналов управления (по курсу, крену и тангажу). Требование сохранения установленных показателей качества управления в этом случае приводит к необходимости целенаправленного изменения некоторых из параметров используемого алгоритма ориентации ДКА, который в соответствии с этим становится адаптивным.

Основная задача данной работы заключается в формировании структуры системы ориентации ДКА, обладающей свойствами адаптации по отношению к изменяющимся частотам упругих коле-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-08-01037).



баний конструкции, и синтез закона настройки коэффициентов алгоритма, обеспечивающего желаемую динамику процессов управления. В качестве основного показателя настройки коэффициентов алгоритма принимается выполнение требования ограниченного сверху времени гашения доминирующей упругой моды.

1. УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДКА

Динамика углового движения механических систем рассматриваемого типа обычно описывается уравнениями Лагранжа второго рода, приведенными, например, к форме конечно-элементной модели известного вида [5]

$$A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Bq = M, \quad (1)$$

где q — $(n' \times 1)$ -мерный вектор обобщенных координат, определяющий положение и конфигурацию деформируемого объекта, $n' = n + 3$, n — учетное число упругих степеней свободы ДКА; $A(q)$, B — симметрические $(n' \times n')$ -матрицы масс и упругостей; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ — вектор кориолисовых и центробежных сил; $M = (M_x, M_y, M_z)^T$ — вектор управляющих моментов, прикладываемых к несущему телу ДКА со стороны исполнительных органов.

Для определенности в качестве исполнительных органов в системе управления ориентацией ДКА будем рассматривать двигатели-маховики с регулируемой скоростью вращения ротора [6].

При низких скоростях угловых движений корпуса ДКА его пространственное движение в первом приближении можно рассматривать в виде трех независимых движений (по курсу, крену и тангажу). В этом случае система уравнений (1) может быть приведена к трем независимым модально-физическим моделям [7], описывающим плоские вращения ДКА относительно любой из трех осей базовой системы координат в виде

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

Здесь: x — измеряемая и регулируемая угловая координата ДКА в рассматриваемой плоскости движения; $\bar{x}$ — координата углового движения условно «отвердевшего» ДКА; $\tilde{x}$ — дополнительные изменения угловых координат несущего тела ДКА, вызываемые воздействием на него упругих колебаний присоединенных элементов; $\tilde{\omega}_i$ и $\tilde{k}_i$ — соб-

ственные частоты и коэффициенты возбудимости упругих колебаний конструкции ДКА; I_Σ — суммарный осевой момент инерции ДКА, содержащий и момент инерции маховика J ; $M(u)$ — управляющее воздействие; $u = u(u_0, \lambda, t)$ — закон управления; u_0 — базовый алгоритм, получаемый в предположении, что ДКА жесткий; λ — варьируемый параметр.

Входящие в уравнения (2) управляющие воздействия $M(u)$ представляют собой моменты сил динамической реакции, которые появляются при разгоне или торможении маховика и прикладываются к корпусу ДКА:

$$M = -M_D + M_F, \quad (3)$$

где M_D — электромагнитный момент, развиваемый двигателем, $M_F = F(\Omega)$ — момент сил сопротивления и нагрузки на валу двигателя, нелинейно зависящий от угловой скорости маховика.

Для электродвигателей постоянного и переменного токов [6]:

$$M_D = k_u u - k_\Omega \Omega, \quad (4)$$

где $k_u, k_\Omega > 0$ — постоянные электромеханические параметры двигателя, $\Omega(t)$ — приращение скорости маховика при изменении управляющего напряжения $u(t)$.

Структурная схема базовой системы ориентации ДКА с двигателем-маховиком, принимаемая далее в качестве исходной при решении задачи синтеза закона адаптации коэффициентов алгоритма управления при изменяющихся частотах $\tilde{\omega}_i$, представлена на рис. 1, где p — переменная преобразования Лапласа.

На основании закона сохранения момента количества движения для механической системы типа «ДКА — маховик» справедливо соотношение

$$\Omega = -IJ^{-1}\dot{x}, \quad (5)$$

где I и J — моменты инерции ДКА и маховика соответственно.

Подставляя соотношение (5) в формулу (4), получаем выражение для разгонного момента электродвигателя $M_D(u) = k_\omega \dot{x} + k_u u$, $k_\omega = IJ^{-1}k_\Omega > 0$. Теперь управляющий момент $M(u)$, действующий на ДКА со стороны двигателя-маховика, на основании соотношения (3) можно определить выражением $M(u) = (k_\omega \dot{x} + k_u u) + M_F$, подставляя которое в уравнения (2) и, пренебрегая моментом сил сопротивления по сравнению с разгонным моментом, после ряда несложных преобразований получим модально-физическую модель плоского углового

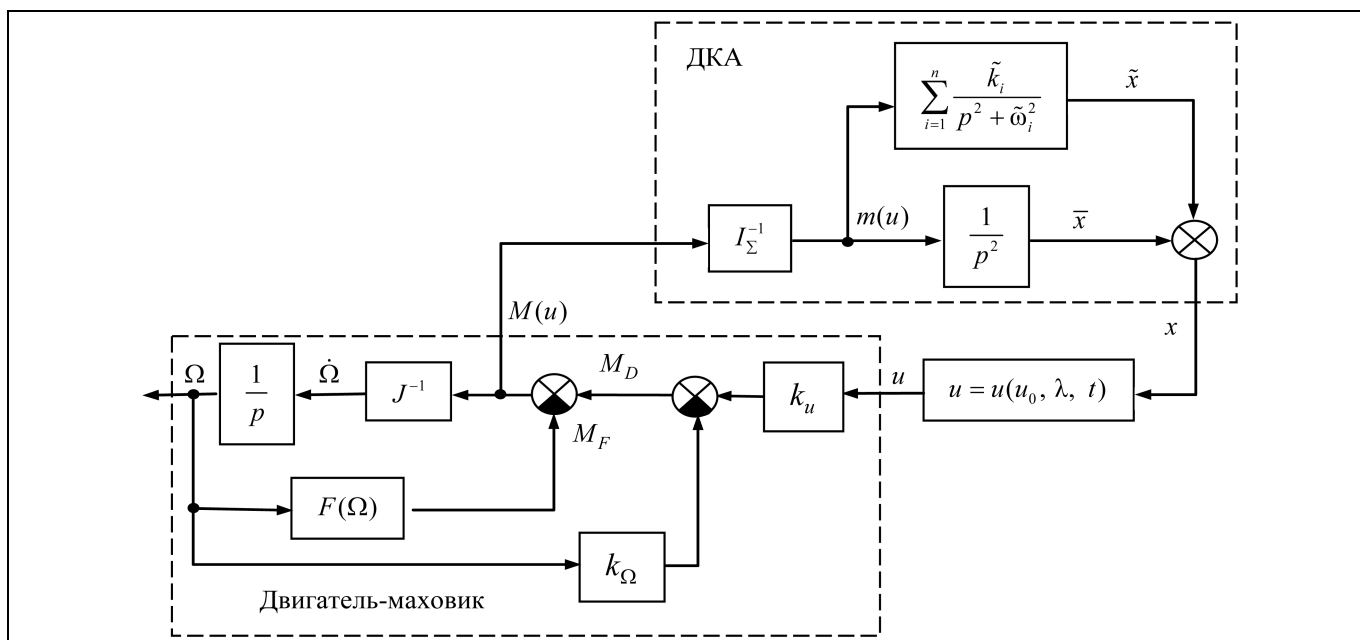


Рис. 1. Базовая система ориентации ДКА с двигателем-маховиком

движения ДКА, управляемого двигателем-маховиком, следующего вида:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{x}} + k'_\omega \dot{\bar{x}} &= k'_u u - k'_\omega \dot{\bar{x}}, \\ \ddot{\tilde{x}} + \tilde{k}_i k'_\omega \dot{\tilde{x}} + \tilde{\omega}_i^2 \tilde{x}_i &= \\ &= \tilde{k}_i k'_u u - \tilde{k}_i k'_\omega \left(\dot{\bar{x}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{\tilde{x}}_j \right), \\ x = \bar{x} + \tilde{x}, \quad \tilde{x} = \sum \tilde{x}_i, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k'_{\omega} = k_{\omega} I_{\Sigma}^{-1} > 0$, $k'_y = -k_y I_{\Sigma}^{-1}$.

2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДКА С ДВИГАТЕЛЯМИ-МАХОВИКАМИ

Как видно из модели (6), двигатель-маховик в качестве исполнительного органа системы ориентации ДКА привносит в уравнения его движения определенный эффект демпфирования, определяемый зависимостью момента M_D от угловой скорости маховика. Однако поскольку коэффициент $k'_\omega = k_\omega I_\Sigma^{-1}$ достаточно мал, то это демпфирование незначительно и устойчивость при замыкании системы (6) может быть потеряна из-за разрывного характера управляющих воздействий, формируемых дискретным базовым ПД-алгоритмом системы ориентации

$$\begin{aligned} u_0(t_k) = u_{0k} = & -[k_1 x(t_k) + k_2 \Delta x(t_k)], \\ & k = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

с периодом дискретности T_0 , на котором управляющее воздействие $m(u)$ сохраняет постоянное значение $m_k = m(u_k)$.

В работе [8] показано, что дискретный характер управления служит причиной существования на плоскости параметров системы $(\tilde{\omega}_i, T_0)$ области неустойчивой динамики, в которой при управлении ДКА появляются расходящиеся колебания. Для некоторого фиксированного значения $T_0 = \text{const}$ указанная область определяется минимальным и максимальным значениями собственных частот ДКА $(\tilde{\omega}_{\min} \div \tilde{\omega}_{\max})$. В области относительно высоких частот $(\tilde{\omega}_1 \geq \tilde{\omega}_{\max})$ базовый алгоритм (7) обеспечивает устойчивость и требуемое время регулирования $(T_\gamma \leq T_{r\max})$ в системе (6) с двигателями-маховиками в качестве исполнительных органов.

В примере на рис. 2 приведена динамика процесса переориентации ДКА, для которого были определены ограничения вида [8]: $\tilde{\omega}_{\min} = 0,1 \text{ c}^{-1}$, $\tilde{\omega}_{\max} = 0,15 \text{ c}^{-1}$, $T_{r\max} = 200 \text{ c}$.

Из анализа осциллограмм видно, что для рассмотренного в примере случая $\tilde{\omega}_1 = 0,2 \text{ с}^{-1} > \tilde{\omega}_{\max}$ (естественно, $\tilde{\omega}_i > \tilde{\omega}_1$ для любого $i = \overline{2, 5}$) система устойчива и время переходного процесса не превышает установленного ограничения $T_{r\max} = 200 \text{ с}$.

Для ДКА с модальными частотами, расположенными ниже границы $\tilde{\omega}_{\min}$, и при том же приборно-алгоритмическом обеспечении управления

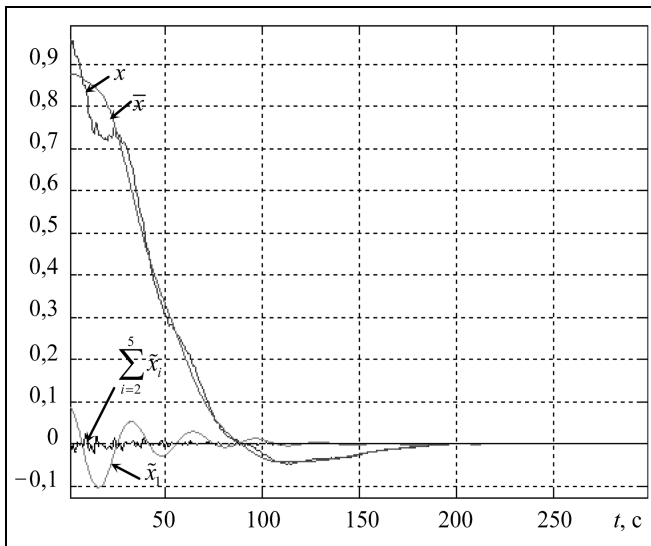


Рис. 2. Переходные процессы при развороте ДКА ($\tilde{\omega}_1 = 0,2$)

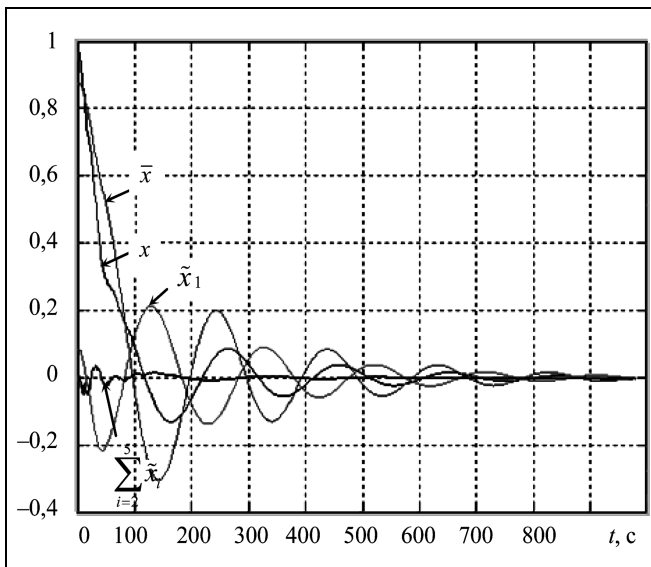


Рис. 3. Переходные процессы при развороте ДКА ($\tilde{\omega}_1 = 0,5$)

переходные процессы устойчивые, но медленно затухающие, что в общем случае существенно увеличивает время регулирования.

Из примера, приведенного на рис. 3, видно, что при пониженной частоте первой моды ($\tilde{\omega}_1 = 0,05 \text{ с}^{-1} < \tilde{\omega}_{\min} = 0,1 \text{ с}^{-1}$) базовый алгоритм (7) с фиксированными коэффициентами k_1 и k_2 не обеспечивает требуемого качества процесса ($T_r \gg T_{r\max}$).

Предпринятые попытки ускорить процесс демпфирования моды $\tilde{x}_1(t)$ путем изменения весового соотношения коэффициентов алгоритма (7)

привели к увеличению времени регулирования по координате «жесткого» движения $\bar{x}(t)$, т. е. к ухудшению качества управления ориентацией ДКА в целом.

Предварительные исследования динамики ДКА с изменяющимся (по указанным во Введении причинам) спектром частот упругих колебаний конструкции показали, что системы ориентации с двигателями-маховиками и с фиксированными параметрами алгоритмов не обеспечивают требуемого качества управления в реальном диапазоне изменения частот, зависящем как от параметров орбиты, так и от конструктивных особенностей объекта.

3. ФОРМИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ ДКА ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ЧАСТОТАХ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ

Для решения задачи формирования желаемой динамики ($T_r \leq T_{r\max}$) процессов при управлении ориентацией ДКА с изменяющимися во времени частотами упругих колебаний воспользуемся предложенным в работе [9] подходом к идентификации нестационарных параметров упругих мод ДКА. С этими целями в базовую систему ориентации ДКА (см. рис. 1) введем расширенный фильтр Калмана, выходом которого является вектор оценок упругих мод $\hat{\tilde{x}}_i(t)$ и соответствующих им идентифицированных значений частот $\hat{\tilde{\omega}}_i(t)$.

Предположим, что доминирующая мода $\hat{\tilde{x}}_d(t)$, $d \in i = \overline{1, n}$, определяющая в итоге длительность переходного процесса T_r , выявлена, например, путем обработки сигнала датчика угла ориентации по методике, изложенной в работе [10]. Достаточно часто доминирует мода с низшей частотой $\tilde{\omega}_1(t)$.

Рассмотрим простейший алгоритм стабилизации доминирующей моды, заключающийся в добавлении сигнала оценки $\hat{\tilde{x}}_d(t)$, пропущенного через усилительное звено с переменным (настраиваемым) коэффициентом $k_d = k_d(\tilde{\omega}_d)$, к сигналу датчика углового положения ДКА $x(t)$ так, что входом для базового ПД-алгоритма служит сигнал

$$y(t) = x(t) + \hat{y}_d, \quad (8)$$

где $\hat{y}_d = k_d \hat{\tilde{x}}_d(t)$.

Структурная схема, сформированной таким образом (в общем случае адаптивной) системы управления ориентацией ДКА, представлена на рис. 4.

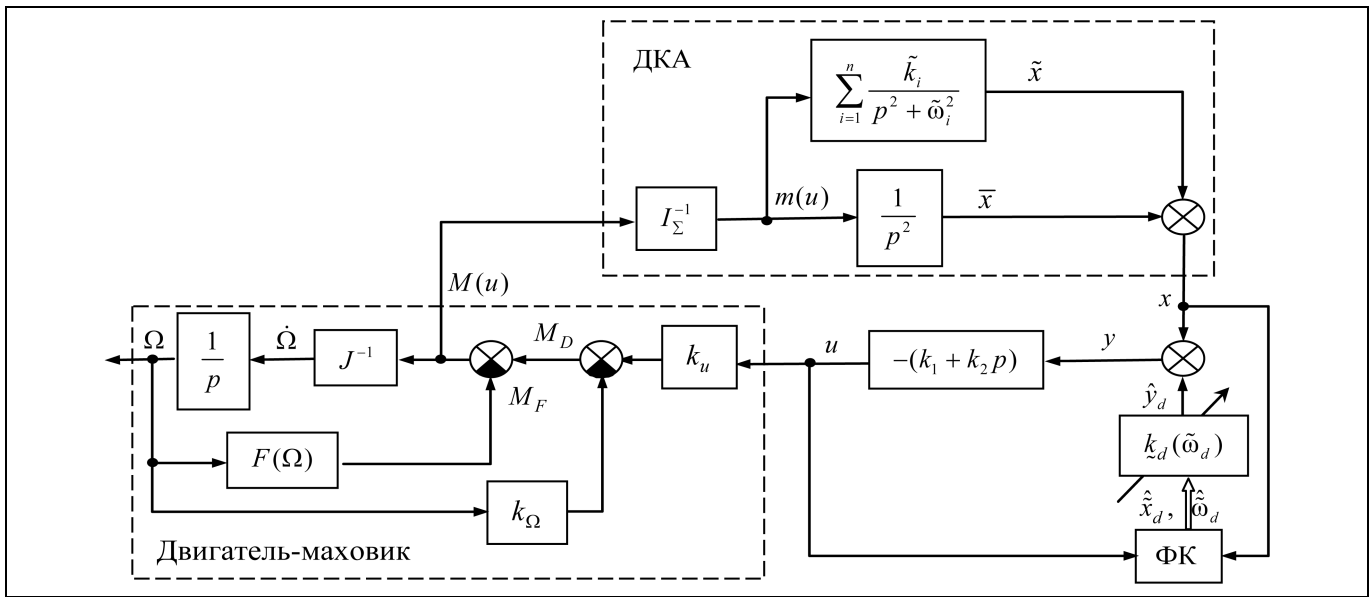


Рис. 4. Адаптивная система ориентации ДКА с двигателем-маховиком: ФК — фильтр Калмана

Видно, что

$$u = -(k_1 + k_2 p)y, \quad (9)$$

где p — оператор дифференцирования.

Подставляя в выражение (9) соотношения (8), в итоге получим, что управляющее напряжение на входе двигателя-маховика представляет собой двухкомпонентный сигнал вида

$$u = -(k_1 x + k_2 \dot{x}) - \tilde{k}_d(k_1 \hat{\tilde{x}}_d + k_2 \hat{\tilde{x}}_d) = u_x + u_{\tilde{x}_d}, \quad (10)$$

где $u_x = -(k_1 x + k_2 \dot{x})$ — сигнал базового алгоритма, а

$$u_{\tilde{x}_d} = -\tilde{k}_d(k_1 \hat{\tilde{x}}_d + k_2 \hat{\tilde{x}}_d) \quad (11)$$

— дополнительный сигнал, предназначенный для гашения доминирующей моды $\tilde{x}_d(t)$ за конечное время $T_r \leq T_{r\max}$.

Для обеспечения желаемой динамики системы, связанной с ограничением времени регулирования при переориентации ДКА проведем исследование, направленное на выявление зависимости параметра $\tilde{k}_d$ от изменяющейся во времени частоты доминирующей моды $\tilde{\omega}_d(t)$, предполагая, что реализация указанной зависимости в качестве алгоритма адаптации коэффициента $\tilde{k}_d$ позволит обеспечить выполнение условия $T_r \leq T_{r\max}$ при любом текущем значении $\tilde{\omega}_d(t)$.

Учитывая нелинейный характер дискретного по уровню способа управления и высокий порядок модели ДКА, указанную задачу отыскания зависимости $\tilde{k}_d = \tilde{k}_d(\tilde{\omega}_d)$ будем решать методами компьютерного моделирования, приняв за основу структуру системы, представленную на рис. 4.

На первом этапе будем считать, что контур автоматической настройки $\tilde{k}_d$ отключен, однако обеспечена возможность внешнего (принудительного) изменения этого параметра, т. е. $\tilde{k}_d = \text{var}$. Модель ДКА определена уравнениями (6), в которых принято $n = 4$, и коэффициентами $\tilde{k}_i$, $\tilde{\omega}_i$, значения которых приведены в таблице. Обозначим в таблице: I_0 — момент инерции несущего тела, $\tilde{\omega}_i(0)$ — начальные значения изменяющихся во времени собственных частот ДКА, $\tilde{\mu}_i^{(1)} = \tilde{k}_i \tilde{\omega}_i^{-2}$ —

Параметры ДКА

i	I_Σ , кг · м ²	I_0 , кг · м ²	$\tilde{k}_i$	$\tilde{\omega}_i(0)$ с ⁻¹ , $t_\omega = 200$ с	$\tilde{\mu}_i^{(1)} = \tilde{k}_i \tilde{\omega}_i^{-2}$, с ²
0	10^4	2830	—		
1	—	—	1,44	0,3	16,0
2			0,21	0,8	0,33
3			0,165	1,0	0,165
4			0,72	2,0	0,18

единичная степень возбудимости i -й моды, т. е. такой параметр динамики конструкции, который с высокой степенью вероятности позволяет прогнозировать, какая из упругих мод может быть доминирующей [1]. В частности, для объекта, параметры которого приведены в таблице, роль доминирующей соответствует моде с индексом $i = 1$, поскольку $\tilde{\mu}_1^{(1)} \gg \tilde{\mu}_i^{(1)} \forall i > 1$. Параметры базового ПД-алгоритма $k_1 = 7,5$ и $k_2 = 275$ выбраны, исходя из обычных условий реализации оптимального по времени переходного процесса при переориентации условно отвердевшего ДКА с приведенным в таблице моментом инерции I_Σ . Область возможного изменения частот (в том числе частоты доминирующей моды $\tilde{\omega}_d(t)$) предполагается известной. Для определенности при моделировании множества отдельных процессов предполагается, что нижняя граница частотного спектра, совпадающая с частотой нижней (первой) моды, изменяется в пределах от $\tilde{\omega}_1(0) = 0,3 \text{ с}^{-1}$ до $\tilde{\omega}_1(t_\omega) = 0,1 \text{ с}^{-1}$, где t_ω — интервал времени изменения частоты $\tilde{\omega}_1$.

При компьютерном моделировании множества процессов в сформированной указанным ранее образом системе ориентации ДКА были приняты:

- неизменные для каждого процесса начальные условия $\bar{x}(0) = 0,06 \text{ рад}$; $\dot{\bar{x}}_i(0) \leq 0,1 \dot{\bar{x}}(0)$; $\ddot{\bar{x}}(0) = 0$;

- дискретно изменяющаяся от опыта (k) к опыту ($k + 1$) частота доминирующей моды $\tilde{\omega}_{dk} = \tilde{\omega}_d(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$;

- частоты остальных мод изменялись по принятому (линейному) закону изменения частоты доминирующей моды на том же интервале времени t_ω .

Каждый из опытов содержит ряд компьютерных повторов процесса переориентации ДКА с различными значениями коэффициента $\underline{k}_d = \text{var}$, участвующего в формировании сигнала $u_{\tilde{x}_d}$ (11). Цель каждого k -го опыта ($k = 0, 1, 2, \dots$) — отыскание области значений $(\underline{k}_{d \min}, \underline{k}_{d \max})_k$, в которой при данном значении параметра $(\tilde{\omega}_d)_k = \text{const}$ удовлетворяются установленные требования к длительности переходного процесса $T_r \leq T_{r \max}$.

В результате реализации полного цикла моделирования на плоскости параметров $(\underline{k}_d, \tilde{\omega}_d)$ сформирована область значений, гарантирующих выполнение условия ограниченности времени регулирования в системе ориентации $T_r \leq T_{r \max}$

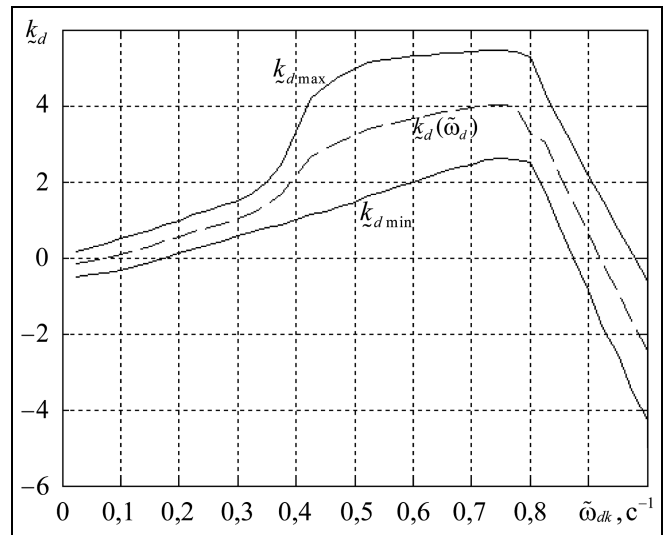


Рис. 5. Область параметров, реализующих желаемую динамику ДКА

независимо от допустимого изменения частот упругих мод. Верхней и нижней границами указанной области служат построенные компьютерным способом две дискретные функции $\underline{k}_{d \max}(\tilde{\omega}_{dk})$ и $\underline{k}_{d \min}(\tilde{\omega}_{dk})$, позволяющие вычислять требуемое значение настраиваемого параметра $\underline{k}_d, (\tilde{\omega}_d)$ в контуре адаптации по следующей, понятной без дополнительных объяснений, формуле:

$$\underline{k}_d(\tilde{\omega}_d) = \frac{1}{2} [\underline{k}_{d \max}(\hat{\tilde{\omega}}_d) + \underline{k}_{d \min}(\hat{\tilde{\omega}}_d)], \quad (12)$$

где $\hat{\tilde{\omega}}_d$ — идентифицируемое текущее значение частоты доминирующей моды.

В качестве примера на рис. 5 приведен вариант компьютерного построения графиков верхней $\underline{k}_{d \max}(\tilde{\omega}_{dk})$ и нижней $\underline{k}_{d \min}(\tilde{\omega}_{dk})$ границ области желаемых значений параметров системы ориентации ДКА при изменении частоты доминирующей (первой) моды в интервале $\tilde{\omega}_1(t) = (0,05 \div 1) \text{ с}^{-1}$. Штриховой линией выделена рассчитанная по формуле (12) функция настройки коэффициента $\underline{k}_d(\tilde{\omega}_d)$ контура стабилизации доминирующей моды.

Заметим, что присутствие на графиках $\underline{k}_d(\tilde{\omega}_d)$ области отрицательных значений настраиваемого коэффициента $\underline{k}_d$ совсем не обязательно соответствует изменению знака в цепи обратной связи системы. Действительно, сигнал обратной связи (10),

учитывая третье уравнение в модели (6), можно переписать в виде

$$u = - \left\{ k_1 \left[(\bar{x} + \tilde{x}_d(k_d + 1) + \sum_{i=1, i \neq d}^n \tilde{x}_i) + \right. \right. \\ \left. \left. + k_2 \left[\dot{\bar{x}} + \dot{\tilde{x}}_d(k_d + 1) + \sum_{i=1, i \neq d}^n \dot{\tilde{x}}_i \right] \right\},$$

откуда, в частности, видно, что, по крайней мере при $k_d = -1$, знак сигнала обратной связи не меняется. Присутствие в составе сигнала дополнительных компонентов, не зависящих от k_d , дополнительно расширяет допустимую область отрицательных значений коэффициента k_d .

4. ПРИМЕР КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ ДКА

Пусть в рассмотренной системе управления ДКА низшая мода $\tilde{x}_1(t)$ имеет изменяющуюся во времени частоту $\tilde{\omega}_1(t)$, которая в процессе слежения солнечных батарей за Солнцем уменьшается, начиная с некоторого значения $\tilde{\omega}_1(0) = 0,3 \text{ с}^{-1}$, до конечного $\tilde{\omega}_1(t_k) = 0,1 \text{ с}^{-1}$ на интервале времени 200 с. Время переходного процесса T_r ограничено сверху значением $T_{r\max} = 200 \text{ с}$.

На рис. 6 представлены осциллограммы процесса переориентации ДКА при отсутствии адаптации, т. е. при коэффициенте $k_d(\tilde{\omega}_1) = 1,2 = \text{const}$, настроенном в соответствии с формулой (12) только в начальной точке ($\tilde{\omega}_1(0) = 0,3 \text{ с}^{-1}$).

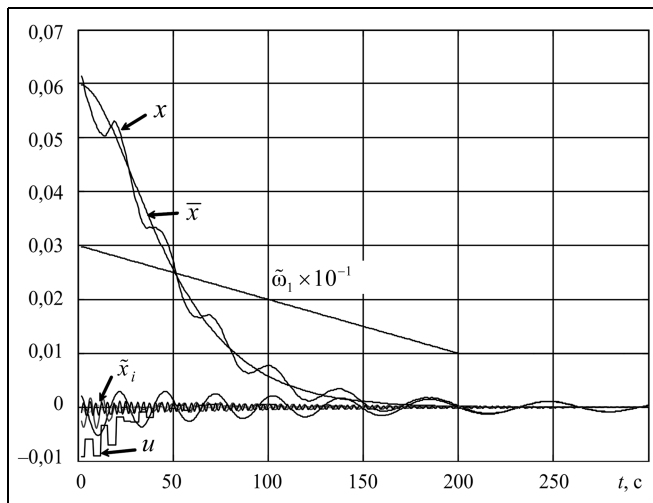


Рис. 6. Переходные процессы переориентации ДКА при фиксированном алгоритме

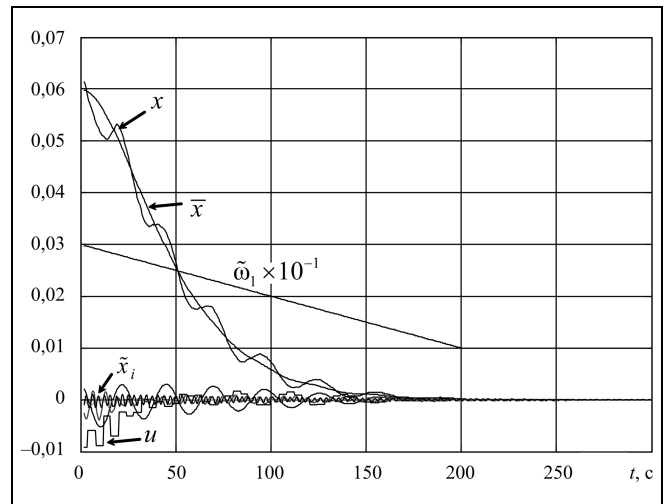


Рис. 7. Процессы при адаптации алгоритма управления

Поскольку адаптация коэффициента k_d при изменении частоты $\tilde{\omega}_1(t)$ в рассматриваемом случае не реализуется, то, как видно из осциллограмм, система хотя и устойчива, однако колебания $\tilde{x}_1(t)$ гасятся недостаточно эффективно, что служит причиной превышения допустимой длительности переходного процесса в целом ($T_r > 300 \text{ с}$ при $T_{r\max} = 200 \text{ с}$).

На рис. 7 представлено решение аналогичной задачи управления переориентацией ДКА для случая активного контура настройки коэффициента k_d .

Из осциллограмм видно, что, несмотря на изменение частоты доминирующей моды, система, оставаясь устойчивой на всем интервале наблюдения, обеспечила время переходного процесса ($T_r \approx 170 \text{ с}$), удовлетворяющее заданным требованиям ($T_r \leq T_{r\max} = 200 \text{ с}$).

Учитываемые при моделировании высшие моды (см. таблицу), оставались устойчивыми на всем интервале наблюдения как для адаптивного, так и для неадаптивных типов управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная адаптивная система управления ориентацией деформируемых космических аппаратов с изменяющимися во времени частотами упругих колебаний конструкции позволяет обеспечить не только устойчивость системы по упругим колебаниям (вибрационную устойчивость), но и требуемое время переориентации ДКА, ограниченное сверху временем переориентации эквивалентного жесткого объекта. Предложенный вы-



числительный метод решения задачи настройки контура стабилизации доминирующей упругой моды с изменяющейся частотой может применяться и для решения других схожих задач управления движением объектов с нежесткой конструкцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рутковский В.Ю. Управление объектами космической и авиационной техники // Проблемы управления. — 2009. — № 3.1. — С. 87—93.
2. Крутова И.Н., Суханов В.М. Синтез модифицированного PD-алгоритма управления угловым движением большой космической конструкции // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 1. — С. 39—49.
3. Ермилов А.С., Ермилова Т.В., Суханов В.М. Метод автономной стабилизации упругих колебаний деформируемых космических аппаратов при управлении ориентацией с использованием калмановского оценивания МФ-координат движения // Тр. VII междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO' 08) / ИПУ РАН. — М., 2008. — С. 2077—2093.
4. Ермилова Т.В., Суханов В.М., Ермилов А.С. Совместное оценивание модально-физических координат и параметров при управлении ориентацией большемерных объектов космической техники с нежесткой конструкцией // Авиакосмическое приборостроение. — 2006. — № 3. — С. 58—64.
5. Динамика больших космических конструкций и управление ими / Г.С. Нур, Р.С. Райан, Х.Н. Скофилд, Д.Л. Симс // Аэрокосмическая техника. — 1985. — Т. 3, № 6. — С. 71—80.
6. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическим летательным аппаратом. — М.: Машиностроение, 1964. — 402 с.
7. Модально-физическая модель пространственного углового движения деформируемого космического аппарата и ее свойства / В.М. Глузов, С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 12. — С. 38—50.
8. Крутова И.Н., Суханов В.М. Синтез дискретной системы управления деформируемым космическим аппаратом, обеспечивающей робастную устойчивость упругих колебаний // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 7. — С. 25—36.
9. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Идентификация нестационарных параметров мод упругих колебаний деформируемых космических аппаратов. // Тр. 11-й междунар. конф. «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» / ИПУ РАН. — М., 2010. — С. 121—123.
10. Глузов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Использование методов интеллектуальной диагностики в задаче управления подвижными объектами с нежесткой конструкцией // Автоматика и телемеханика. — 2006. — № 12. — С. 3—20.

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

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

Суханов Виктор Миньонович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ✉ suhv@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-87-79.



3-я Российская конференция с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ-12),

16—19 апреля 2012 г.

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

Тематика конференции

- Теория, методы исследования и проектирования технических средств автоматизации, опыт эксплуатации
- Алгоритмическое и программное обеспечение систем управления, контроля и измерения
- Методы компьютерного и физического моделирования отдельных технических и программных средств и в целом систем автоматизации

Принимаются предложения по пленарным докладам, по организации специальных заседаний конференции и тематике дискуссий за круглым столом.

Основные даты

28 ноября 2011 г. — завершение приема заявок на участие и кратких текстов докладов

20 января 2012 г. — результаты рассмотрения докладов; последний срок подачи пленарных докладов

10 марта 2012 г. — окончание приема финальных версий принятых докладов и внесения оргвзноса

16—19 апреля 2012 г. — проведение конференции.

Уважаемые коллеги, приглашаем вас принять участие в конференции. В качестве заявки на участие достаточно прислать по электронной почте stpm-conf@mail.ru краткую версию текста не менее 4-х страниц.

Подробности на официальном сайте конференции: <http://cmm.ipu.ru>.

ОРГКОМИТЕТ