

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЖЕСТКИМИ СПУТНИКАМИ С АКТИВНЫМИ МАХОВИКАМИ

В.М. Суханов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: suhv@ipu.ru

И.Н. Крутова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: suhv@ipu.ru

Ключевые слова: нежесткий спутник, управление ориентацией, двигатель-маховик, переменные параметры, адаптация

Аннотация. Рассмотрен подход к решению задачи адаптации алгоритма гиросилового управления ориентацией нежесткого спутника с изменяющимися частотами упругих колебаний конструкции. При синтезе закона перестройки параметров алгоритма управления двигателями-маховиками, являющимися исполнительными органами системы ориентации, принимаются во внимание требования к ограничению времени регулирования при изменениях углового положения нежесткого спутника. Приводятся примеры компьютерного моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенного адаптивного алгоритма.

1. Введение

При широтно-импульсном управлении деформируемыми космическими аппаратами (ДКА), к классу которых относятся и малые информационные спутники с выносными панелями солнечных батарей, выполняющими одновременно роль солнечного паруса [1], 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 явиться причиной неустойчивости системы из-за захвата регулятора упругими колебаниями [2]. Наличие низкочастотных слабозатухающих колебаний конструкции, возникающих в процессе переориентации, увеличивают время переходного процесса, существенно сокращая срок полезной работы информационного спутника. Поэтому при проектировании системы управления ДКА рассматриваемого класса важной задачей является минимизация времени переходного процесса, зависящего от скорости гашения упругих колебаний конструкции.

Для обеспечения устойчивости замкнутой системы по отношению к упругим колебаниям [2] и желаемой динамики ДКА в [3] был предложен алгоритм управления, ис-

пользующий оценки модально-физических (МФ) координат ДКА $\hat{x}_i(t)$ [4], получаемые в реальном времени с помощью фильтра Калмана [5]. Если бы частоты упругих колебаний не изменялись, то выбранные значения коэффициентов указанных алгоритмов, оставаясь постоянными, обеспечивали бы требуемые показатели качества управления. Однако, из-за вращения нежестких панелей солнечных батарей относительно корпуса спутника при отслеживании направления на Солнце происходит периодическое изменение собственных частот в каждом из трех каналов управления ДКА (курс, крен, тангаж). Условие сохранения требуемых показателей качества управления в этом случае приводит к необходимости коррекции параметров используемого алгоритма ориентации ДКА. В связи с этим, основной задачей работы является формирование структуры системы ориентации ДКА, обладающей свойствами адаптации по отношению к изменяющимся частотам упругих колебаний 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.

2. Уравнения углового движения ДКА с маховиками

При низких скоростях угловых движений корпуса ДКА его пространственное движение в первом приближении можно рассматривать в виде трех независимых движений (крен, курс, тангаж). В этом случае обычно используемые уравнения Лагранжа могут быть приведены к трем независимым модально-физическим моделям [4], описывающим плоские вращения ДКА относительно любой из трех осей базовой системы координат в виде

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

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; $\tilde{\omega}_i, \tilde{k}_i$ – собственные 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 является жестким; λ – варьируемый параметр.

Далее будем предполагать, что в качестве управляющих органов используются двигатели-маховики. В этом случае момент $M_r(u)$ в (1) есть момент сил динамической реакции ($M_r(u) \approx -M_d$), которая появляется при разгоне или торможении двигателя-маховика.

Для обычно используемых электродвигателей постоянного тока справедливо [6]

$$(2) \quad \Delta M_d = k_u \Delta u - k_{\Omega} \Delta \Omega$$

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

На основании закона сохранения момента количества движения имеем

$$(3) \quad \Delta\Omega = -IJ^{-1}\dot{x},$$

где I – момент инерции ДКА без маховика.

С учетом (2) и (3) модально-физическая модель движения ДКА (1) при использовании в качестве исполнительного органа двигателя-маховика записывается в виде:

$$(4) \quad \begin{aligned} \ddot{\bar{x}} + k'_\omega \dot{\bar{x}} &= k'_u u - k'_\omega \dot{\bar{x}}, \\ \ddot{\tilde{x}}_i + \tilde{k}_i k'_\omega \dot{\tilde{x}}_i + \tilde{\omega}_i^2 \tilde{x}_i &= \tilde{k}_i k'_u u - \tilde{k}_i k'_\omega (\dot{\bar{x}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{\tilde{x}}_j), \\ x &= \bar{x} + \tilde{x}, \quad \tilde{x} = \sum \tilde{x}_i, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned}$$

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

3. Некоторые особенности динамики ДКА с маховиками

Из (4) видно, что использование двигателя-маховика в качестве исполнительного органа привносит в уравнения ДКА определенный эффект демпфирования движений, 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 (4) может быть потеряна из-за разрывного характера управляющих воздействий, формируемых дискретным базовым PD-алгоритмом системы ориентации

$$(5) \quad u_0(t_k) = u_{0k} = -[k_1 x(t_k) + k_2 \Delta x(t_k)], \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

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

В [7] показано, что дискретный характер управления является причиной существования на плоскости параметров системы $(\tilde{\omega}_1, T_0)$ области неустойчивой динамики, в которой при управлении ДКА появляются расходящиеся колебания. Для некоторого фиксированного значения $T_0 = \text{const}$ границы указанной области определяются 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 (5) обеспечивает устойчивость и требуемое время регулирования $(T_r \leq T_{r\max})$ в системе (4) с двигателями-маховиками в качестве исполнительных органов. Для определенности можно принять $\tilde{\omega}_{\min} = 0,1 \text{ с}^{-1}$, $\tilde{\omega}_{\max} = 0,15 \text{ с}^{-1}$, $T_{r\max} = 200 \text{ с}$.

Для ДКА с модальными частотами, расположенными ниже границы $\tilde{\omega}_{\min}$, и при том же приборно-алгоритмическом обеспечении управления переходные процессы являются устойчивыми, но медленно затухающими, что в общем случае существенно увеличивает время регулирования.

Из примера числового моделирования динамики ДКА при пониженной частоте первой моды $(\tilde{\omega}_1 = 0,05 \text{ с}^{-1} < \tilde{\omega}_{\min} = 0,1 \text{ с}^{-1})$, приведенного на рис. 1, видно, что базовый алгоритм (5) с фиксированными коэффициентами k_1, k_2 не обеспечивает требуемое качество процесса $(T_r > T_{r\max})$.

Попытки ускорить процесс демпфирования моды $\tilde{x}_1(t)$ путем изменения весового соотношения коэффициентов алгоритма (5) привели к увеличению времени регулирования по координате «жесткого» движения $\bar{x}(t)$, т.е. к ухудшению качества управления ориентацией ДКА в целом.

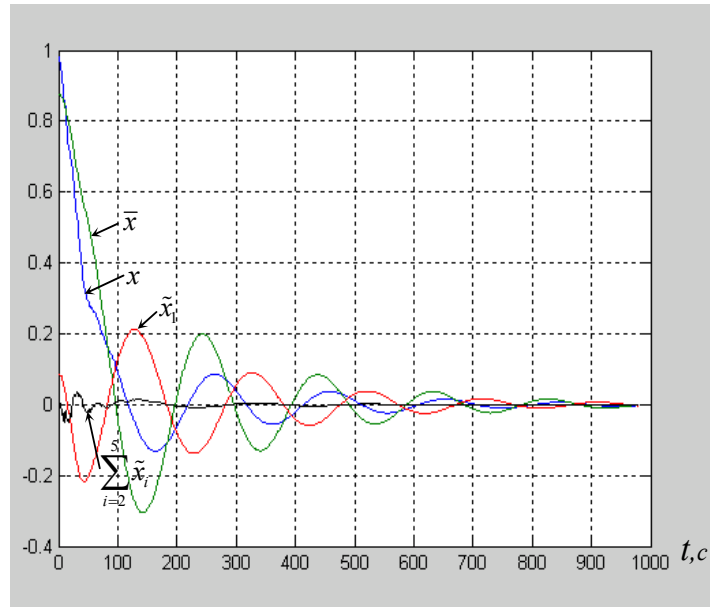


Рис. 1. Переходные процессы при развороте ДКА ($\tilde{\omega}_1 = 0,05$).

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

4. 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 [8] подходом к идентификации нестационарных параметров упругих мод ДКА. С этой целью в базовую систему ориентации ДКА введем расширенный фильтр Калмана (ФК), выходом которого является вектор оценок упругих мод $\hat{x}_i(t)$ и соответствующих им идентифицированных значений частот $\hat{\omega}_i(t)$.

Предположим, что доминирующая мода $\hat{x}_d(t)$, $d \in i = \overline{1, n}$, определяющая в итоге длительность переходного процесса T_r , выявлена, например, путем обработки сигнала датчика угла ориентации по методике, изложенной в [9]. Достаточно часто доминирующей является 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 $k_d = k(\tilde{\omega}_d)$, к сигналу датчика углового положения ДКА $x(t)$ так, что входом для базового PD-алгоритма является сигнал

$$(6) \quad y(t) = x(t) + \hat{y}_d,$$

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. 2.

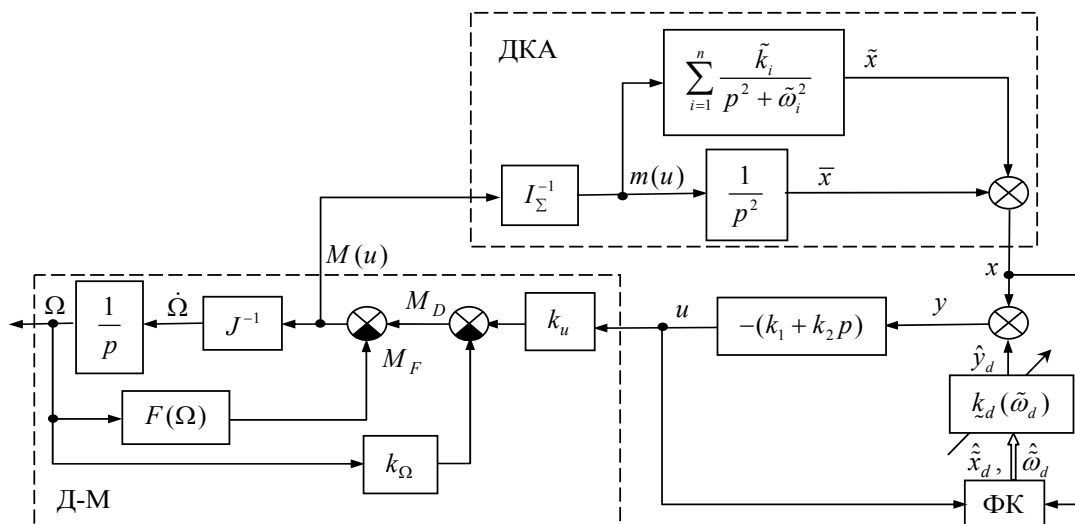


Рис. 2. Адаптивная система ориентации ДКА с двигателем-маховиком (Д-М).

Из структурной схемы видно, что

$$(7) \quad u = -(k_1 + k_2 p)y,$$

где p – символ дифференцирования.

Подставляя в (7) соотношения (6), в итоге получим, что управляющее напряжение на входе двигателя-маховика представляет собой двухкомпонентный сигнал вида

$$(8) \quad u = -(k_1 x + k_2 \dot{x}) - k_d (k_1 \hat{\tilde{x}}_d + k_2 \dot{\hat{\tilde{x}}}_d) = u_x + u_{\tilde{x}_d}$$

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

$$(9) \quad u_{\tilde{x}_d} = -k_d (k_1 \hat{\tilde{x}}_d + k_2 \dot{\hat{\tilde{x}}}_d)$$

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 k_d от изменяющейся во времени частоты доминирующей моды $\tilde{\omega}_d(t)$, предполагая, что реализация указанной зависимости в качестве алгоритма адаптации коэффициента 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 $k_d = k_d(\tilde{\omega}_d)$ бу-

дем решать методами компьютерного моделирования, приняв за основу структуру системы, представленную на рис. 2.

На первом этапе будем считать, что контур автоматической настройки k_d отключен, однако обеспечена возможность внешнего (принудительного) изменения этого параметра, т.е. $k_d = \text{var}$. Модель ДКА определена уравнениями (4), в которых принято $n = 4$, и коэффициентами \tilde{k}_i , $\tilde{\omega}_i$, значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Числовые значения параметров ДКА.

| i | $I_{\Sigma} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ | $I_0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ | \tilde{k}_i | $\tilde{\omega}_i(0) \text{ с}^{-1} \quad t_{\omega} = 200 \text{ с}$ | $\tilde{\mu}_i^{(1)} = \tilde{k}_i \tilde{\omega}_i^{-2} \text{ с}^2$ |
|-----|--|---------------------------------|---------------|---|---|
| 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 |

Кроме того, в таблице обозначено: I_0 – момент инерции корпуса ДКА, $\tilde{\omega}_i(0)$ – начальные значения изменяющихся во времени собственных частот ДКА, $\tilde{\mu}_i^{(1)} = \tilde{k}_i \tilde{\omega}_i^{-2}$ – 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 [2]. В частности, для объекта, параметры которого приведены в таблице, роль доминирующей соответствует моде с индексом $i=1$, поскольку $\tilde{\mu}_1^{(1)} > \tilde{\mu}_i^{(1)} \forall i > 1$. Параметры базового PD-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 $\tilde{\omega}_d(t)$) считается известной. Для определенности при моделировании множества отдельных процессов предполагается, что нижняя граница частотного спектра, совпадающая с частотой низшей (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 указанном образом системе ориентации ДКА были приняты: 1 – неизменные для каждого процесса начальные условия $\tilde{x}(0) = 0,06 \text{ рад}$; $\tilde{x}_i(0) \leq 0,1\tilde{x}(0)$; $\dot{\tilde{x}}(0), \dot{\tilde{x}}_i(0) = 0$; 2 – дискретно изменяющаяся от опыта (j) к опыту ($j+1$) частота доминирующей моды $\tilde{\omega}_{d_j} = \tilde{\omega}_d(j)$, $j = 0, 1, 2, \dots$; 3 – частоты остальных мод изменялись по принятому (линейному) закону изменения частоты доминирующей моды на том же интервале времени $t_{\omega} = 200 \text{ с}$.

Каждый из опытов содержит ряд компьютерных повторов процесса переориентации ДКА с различными значениями коэффициента $k_d = \text{var}$, участвующего в формировании сигнала $u_{\tilde{x}_d}$ (9). Целью каждого j -го опыта ($j = 0, 1, 2, \dots$) является отыскание области значений $(\overline{k_{d \min}, k_{d \max}})_j$, в которой при данном значении параметра $(\tilde{\omega}_d)_j = \text{const}$ удовлетворяются установленные требования к длительности переходного процесса $T_{r_j} \leq T_{r \max}$.

Результатом реализации полного цикла моделирования является сформированная на плоскости параметров $\underline{k}_d, \tilde{\omega}_d$ область значений, гарантирующих выполнение условия ограниченности времени регулирования в системе ориентации $T_r \leq T_{r\max}$ независимо от допустимого изменения частот упругих мод. Верхней и нижней границей указанной области являются построенные компьютерным способом две дискретные функции $\underline{k}_{d\max}(\tilde{\omega}_{dj}), \underline{k}_{d\min}(\tilde{\omega}_{dj})$, позволяющие вычислять требуемое значение настраиваемого параметра $\underline{k}_d(\tilde{\omega}_d)$ в контуре адаптации по следующей, понятной без дополнительных объяснений, формуле:

$$(10) \quad \underline{k}_d(\tilde{\omega}_d) = \frac{1}{2}[\underline{k}_{d\max}(\hat{\omega}_d) + \underline{k}_{d\min}(\hat{\omega}_d)],$$

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

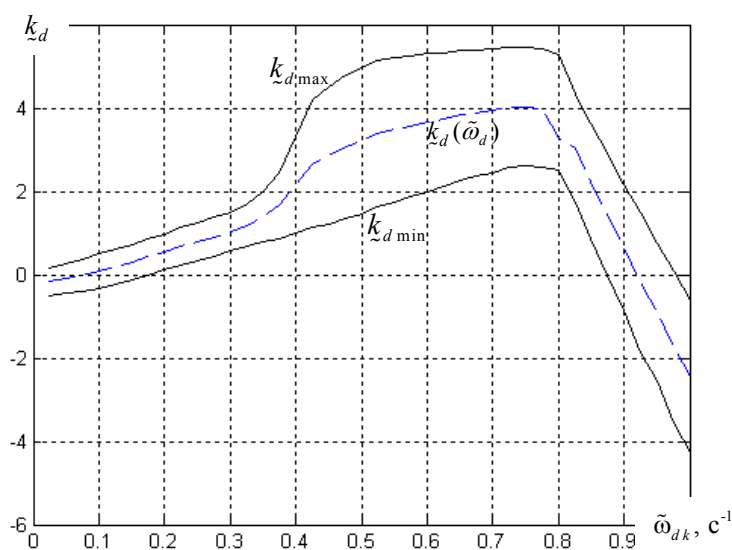


Рис. 3. Область параметров, реализующих желаемую динамику ДКА.

В качестве примера на рис. 3 приведен вариант компьютерного построения графиков верхней $\underline{k}_{d\max}(\tilde{\omega}_{dj})$ и нижней $\underline{k}_{d\min}(\tilde{\omega}_{dj})$ границ области желаемых значений параметров системы ориентации ДКА при изменении частоты доминирующей (первой) моды в интервале $\tilde{\omega}_1(t) = (0,05 \div 1) \text{ c}^{-1}$. Пунктиром выделена рассчитанная по формуле (10) 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 (8), учитывая третье уравнение в модели ДКА (4), можно переписать в виде

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

откуда в частности видно, что, по крайней мере при $\underline{k}_d = -1$, знак сигнала обратной связи не меняется. Присутствие в составе сигнала дополнительных компонентов, не зависящих от \underline{k}_d дополнительно расширяет область допустимых отрицательных значений коэффициента \underline{k}_d .

5. Пример компьютерного моделирования адаптивной системы ориентации ДКА

Пусть в рассмотренной выше системе управления ДКА низшая мода $\tilde{x}_1(t)$ имеет изменяющуюся во времени частоту $\tilde{\omega}_1(t)$, которая в процесс 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 величиной $T_{r\text{max}} = 200 \text{ с}$.

На рис. 4 представлены осциллограммы процесса переориентации ДКА при отсутствии адаптации, т.е. при $k_d(\tilde{\omega}_1) = 1,2 = \text{const}$, настроенном в соответствии с (10) только в начальной точке ($\tilde{\omega}_1(0) = 0,3 \text{ с}^{-1}$).

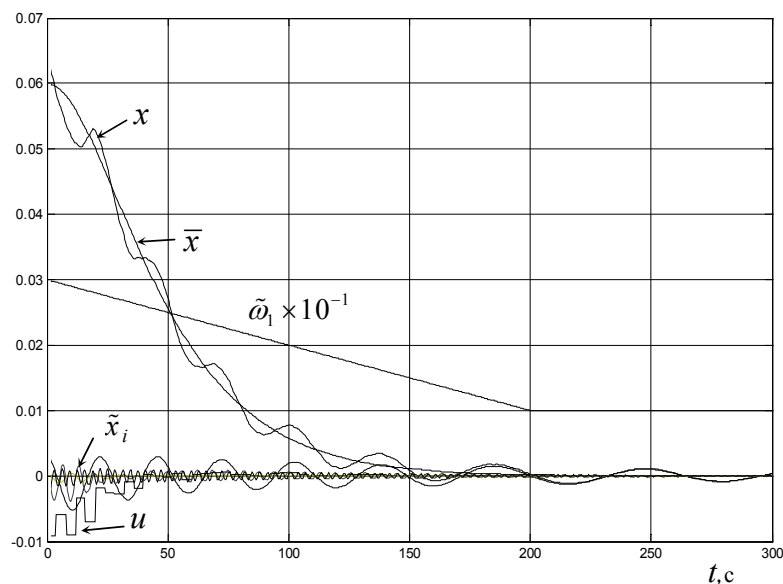


Рис. 4. Переходные процессы переориентации ДКА при фиксированном алгоритме.

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 является устойчивой, однако гашение колебаний $\tilde{x}_1(t)$ осуществляется недостаточно эффективно, что является причиной превышения допустимой длительности переходного процесса в целом ($T_r > 300 \text{ с}$ при $T_{r\text{max}} = 200 \text{ с}$).

На рис. 5 аналогичная задача управления переориентацией ДКА повторена 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 ($T_r < T_{r\text{max}} = 200 \text{ с}$).

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

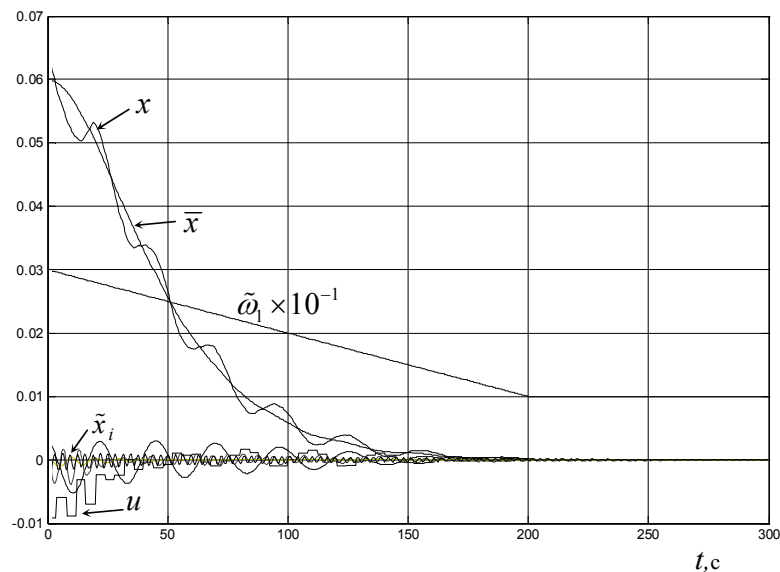


Рис. 5. Процессы при адаптивном алгоритме управления.

6. Заключение

Рассмотренная в работе адаптивная система управления ориентацией деформируемых космических аппаратов с изменяющимися во времени частотами упругих колебаний конструкции позволяет обеспечить не только устойчивость системы по упругим колебаниям, но и требуемое время переориентации ДКА, ограниченное сверху временем переориентации эквивалентного жесткого объекта. Предложенный вычислительный метод решения задачи настройки контура стабилизации доминирующей упругой моды с изменяющейся частотой может использоваться и при решении других схожих задач управления движением объектов с нежесткой конструкцией.

Представленная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (Проект 14-08-01091).

Список литературы

1. Gorbunova I., Starinova O., Salmanova O. Complex simulation of the solar sail spacecraft // Proceedings of the 6th IEEE/AIAA International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul, Turkey. 2013. P. 285-290.
2. Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Особенности релейного управления деформируемыми спутниками // Труды 5-го Международного симпозиума ИФАК по автоматическому управлению в пространстве. Сб. Управление в пространстве. М.: Наука, 1975. Т. 1. С. 174-183.
3. Крутова И.Н., Суханов В.М. Синтез модифицированного РД-алгоритма управления угловым движением большой космической конструкции // Автоматика и телемеханика. 2009. № 1. С. 39-49.
4. Глузов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Модально-физическая модель пространственного углового движения деформируемого космического аппарата и ее свойства // Автоматика и телемеханика. 1998. № 12. С. 38-50.

5. Ермилова Т.В., Суханов В.М., Ермилов А.С. Совместное оценивание модально-физических координат и параметров при управлении ориентацией большемерных объектов космической техники с жесткой конструкцией // *Авиакосмическое приборостроение*. 2006. № 3. С. 58-64.
6. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическим летательным аппаратом. М.: Машиностроение, 1964. 402 с.
7. 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.
8. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Идентификация нестационарных параметров мод упругих колебаний деформируемых космических аппаратов // *Труды 11-й Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления»*. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. С. 121-123.
9. Глузов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Использование методов интеллектуальной диагностики в задаче управления подвижными объектами с жесткой конструкцией // *Автоматика и телемеханика*. 2006. № 12. С. 3-20.