УДК 517.977.5:629.78

АДАПТИВНЫЕ ДЕКОМПОЗИРУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУАКТИВНОЙ СВЯЗКОЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ[1]

В. М. Суханов, Е. М. Фирсова

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

Рассмотрена задача формирования адаптивных алгоритмов управления, обеспечивающих декомпозицию модели космического роботизированного модуля (КРМ), являющегося многосвязной нестационарной механической системой. Предложена методика синтеза алгоритма перестройки параметров регулятора на основе принципов беспоисковой адаптации с эталонной моделью, обеспечивающего желаемую динамику функционирования подсистем модуля. Исследована возможность демпфирования упругих колебаний транспортируемого модулем груза путем нестандартного применения штатных приводов манипулятора КРМ.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемый в работе космический робототехнический модуль (КРМ) является свободнолетающим маневрирующим транспортным средством, способным одновременно решать задачи поиска, захвата, транспортировки и установки полезного (не обязательно жесткого) груза в окрестности пилотируемой орбитальной станции. Как видно из рис. 1, механическая система КРМ представляет собой связку нескольких подсистем, состоящую из жесткого несущего тела (корпуса) и шарнирно присоединенной к нему подсистемы носимых тел, включающей в себя один или несколько трехзвенных манипуляторов с концевым схватом, удерживающим нежесткий полезный груз (Г), который рассматривается как третий компонент связки. Идеализированная модель манипулятора может быть определена в виде системы шарнирно связанных между собой жестких звеньев длиной r_1 и r_2. Образованную указанным способом механическую структуру для краткости обозначим КРМ-Г. Кроме того, на рис. 1 обозначено: CXY — базовая система координат, ox_0y_0 — система координат, связанная с корпусом КРМ; $oX'Y'$ — базовая система координат, смещенная в центр масс («o») несущего тела КРМ. Остальные обозначения на рисунке определены в тексте статьи ниже.

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 03-01-00062) и Программы фундаментальных исследований № 16 Отделения ЭММПУ РАН.

Полученная в работе [1] математическая модель свободнолетающего космического робототехнического модуля в режиме транспортировки нежесткого груза имеет вид

$$A(q)\ddot{q} + H\dot{q} + Bq = F_u(t) - \sum_{s=1}^{n} [\dot{q}^T D_k(q)\dot{q}]e_k, \qquad (1)$$

где $q = (q_1 = X_0,\ q_2 = Y_0,\ q_3 = \vartheta,\ q_4 = \alpha_1,\ q_5 = \alpha_2,\ q_6 = \alpha_3,\ q_7 = \lambda_3,\ q_8 = \lambda_4)$ — вектор обобщенных координат КРМ-Г; первые три компоненты вектора q, т. е. сово-

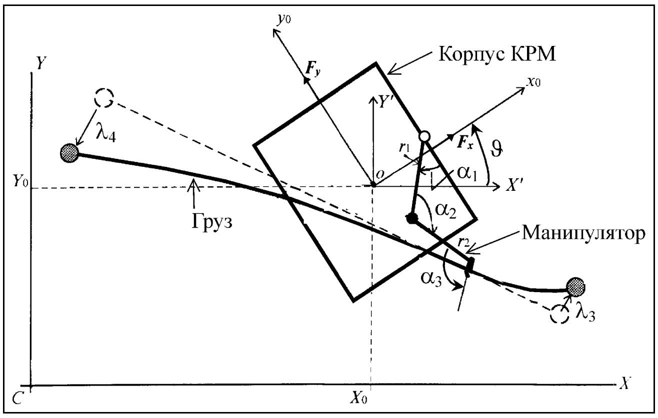

Рис. 1. Конфигурация связки «КРМ — нежесткий груз»

купность $q^0 = (X_0, Y_0, \vartheta)$, будем рассматривать как независимые обобщенные координаты, определяющие положение несущего тела (корпуса робота) в инерциальной системе координат *CXY*. Остальные пять компонент $q_4, ..., q_8$, которые обозначим $q^{\text{М}-\Gamma} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \lambda_3, \lambda_4)$, определяют положение носимых тел относительно осей, связанных с несущим телом модуля; $A(q)$ — квадратная $(n \times n)$ симметричная матрица коэффициентов инерции, являющихся функциями обобщенных координат; H, B — постоянные $(n \times n)$ матрицы, элементы которых определяются известным образом на основе диссипативной и потенциальной функций, зависящих чаще всего от физических свойств транспортируемого нежесткого груза; $F_u(t)$ — вектор управляющих сил; второе слагаемое в правой части уравнения (1) — матрица обобщенных кориолисовых и центробежных сил, порождаемых относительными (вращательными и поступательными) движениями несущего и носимых тел КРМ-Г; e_k — n-мерный единичный вектор с k-й ненулевой строкой.

Нелинейные дифференциальные уравнения (1) в рамках исследования плоского движения КРМ-Г являются наиболее общими и пригодны для описания большинства фаз (режимов) функционирования КРМ. В частности, модель (1) описывает траекторное и угловое движения связки КРМ-Г под действием реактивных сил F_x, F_y и моментов M_ϑ, M_{α_j} (создаваемых исполнительными органами системы ориентации и приводами звеньев манипулятора, соответственно) в плоскости системы координат *CXY*, связанной с орбитальной станцией и формируемой в пространстве ее радиотехническими средствами. Математическая модель (1) связки КРМ-Г представляет собой систему нелинейных уравнений с переменными коэффициентами и характеризуется наличием межсистемных связей, что существенно осложняет качественное решение задач управления на множестве режимов работы КРМ.

В связи с высокими требованиями к точности и безопасности функционирования КРМ вблизи поверхности орбитальной станции в условиях нестационарности и неопределенности изменения параметров КРМ в данной работе решается задача декомпозиции полной модели связки КРМ-Г на автономные подсистемы и обеспечения желаемой динамики изменения координат связки КРМ-Г на основе методов адаптивного управления.

Теория декомпозиции управляемых систем на отдельные подсистемы с последующим синтезом управлений для локальных подсистем является предметом исследований в течение ряда десятилетий [2]. В обширном списке публикаций по теории декомпозиции можно выделить два направления. В основу первого направления [3, 4], впервые сформулированного И. Н. Вознесенским, положена идея декомпозиции многосвязной системы путем формирования специальных компенсирующих обратных связей. В большинстве работ, относящихся к этому направлению, алгоритмы синтеза декомпозирующих обратных связей строятся на основе численных процедур, применение которых сопряжено с необходимостью иметь точную информацию о структуре и параметрах математических моделей управляемых систем, что делает такие процедуры малоэффективными.

Принципиально иной подход к решению задачи декомпозиции, осуществляемый не с помощью компенсирующих обратных связей, а за счет управляющих сигналов, формируемых с помощью нетрадиционных алгоритмов, учитывающих физические особенности объектов управления, развит в работе [5]. Такого типа алгоритмы придают системам свойства слабой чувствительности к изменениям параметров объекта управления, что делает их привлекательными для решения конкретных задач.

Особо актуальным как в теоретическом, так и в прикладном аспекте для осуществления декомпозиции нестационарных нелинейных систем управления, к которым относится и рассматриваемая в данной работе система управления свободнолетающим космическим роботизированным модулем, является развитие методов беспоисковой адаптации с эталонной моделью. В соответствии с этим в работе рассматривается задача формирования адаптивной системы управления КРМ-Г, которая позволяет реализовать декомпозицию системы на автономные подсистемы с желаемыми динамическими характеристиками движения.

1. УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КРМ-Г

Важнейшее условие безопасного функционирования роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции состоит в обеспечении предельно малых скоростей его перемещения при выполнении операций обслуживания. Выполнение этого требования позволяет упростить исходную модель (1), исключив из нее члены, содержащие произведения скоростей обобщенных координат, т. е. кориолисовы и центробежные силы как величины второго порядка малости. Кроме того, матрица H в уравнениях (1) из-за пренебрежимо малого естественного демпфирования при колебаниях упругого груза в условиях космоса считается нулевой ($H(h_{ik}) = [0]$).

В силу принятых допущений математическая модель (1) движения связки КРМ-Г принимает более простой вид

$$A(q)\ddot{q} + Bq = F_u(t), \qquad (2)$$

где $q = (q^0, q^m, q^r)^T$ — вектор обобщенных координат КРМ, в котором по сравнению с моделью (1) подвектор координат носимых тел разбит на два вектора, один из которых $q^{\text{М}} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_2)^T$ определяет конфигурацию манипулятора в осях корпуса КРМ, а второй, $q^{\Gamma} = (q_7 = \lambda_3, q_8 = \lambda_4)^T$ — упругие смещения концевых масс нежесткого груза относительно его исходного (недеформированного) состояния, определенного на рис. 1 пунктирным отображением; B — постоянная (8×8) матрица упругости вида

$$B = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} b_4 & 0 \\ 0 & b_8 \end{bmatrix} \end{bmatrix}; \qquad (3)$$

$F_u(t) = (F_{u1}, ..., F_{un})^T$, $n = 8$ — вектор-столбец управляющих сил. В рассматриваемой постановке задачи полезный груз, будучи пассивным элементом связки, не имеет собственного управления, что дает основание положить F_{u7}, $F_{u8} \equiv 0$. Коэффициенты $a_{ik}(q)$, являющиеся элементами матрицы $A(q)$, не одинаковы для различных режимов функционирования КРМ при обслуживании орбитальной станции; их выражения и основные характеристики этих режимов приведены в работе [1].

Переменные, определяемые векторами $q^0 = (X_0, Y_0, \vartheta)$, $q^{\text{М}} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_2)^T$, $q^{\Gamma} = (\lambda_3, \lambda_4)^T$, следует рассматривать как группы координат подсистем КРМ-Г, отличающихся как их функциональным назначением, так и по способам управления ими. Особенностью объектов, описываемых уравнениями (2), является взаимовлияние движений по различным группам координат, проявляющееся через недиагональные элементы матрицы $A(q)$, т. е. через коэффициенты $a_{ik}(q)$, $i \neq j$, что существенно осложняет управление движением различных подсистем КРМ-Г, снижая точность и безопасность работы модуля вблизи орбитальной станции. Далее для краткости переменные элементы матрицы $A(q)$ будем записывать в виде $a_{ij}(q)$ □ a_{ij}.

2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ СВЯЗКИ КРМ-Г НА АВТОНОМНЫЕ ПОДСИСТЕМЫ

Синтез структуры адаптивной системы управления проводится в два этапа. На первом из них в предположении, что коэффициенты математической модели объекта известны и постоянны (гипотеза квазистационарности), формируется структура основного контура, т. е. определяется базовый алгоритм управления, обеспечивающий достижение цели управления на рассматриваемом режиме функционирования КРМ; определяется количество и места введения перестраиваемых параметров регулятора. На втором этапе осуществляется синтез алгоритмов адаптации, обеспечивающих выполнение требуемого качества управления для любого $t > 0$ [6]. Для определенности рассмотрим режим, введенный в работе [1] как фаза транспортировки груза. В этом режиме математическая модель движения системы КРМ-Г (2) с учетом структуры матриц (3) и $A(q)$ может быть переписана в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{gathered} a_{ii}\ddot{q}_i + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8} a_{ik}\ddot{q}_k = F_{u_i}(t), \quad i = \overline{1,6} \\ a_{77}\ddot{q}_7 + b_7 q_7 + \sum_{k=1,\,k\neq 7}^{8} a_{7k}\ddot{q}_k = 0 \qquad (4) \\ a_{88}(q)\ddot{q}_8 + b_8 q_8 + \sum_{k=1,\,k\neq 8}^{8} a_{8k}\ddot{q}_k = 0, \end{gathered}$$

где $a_{78} = a_{87} = 0$. Коэффициенты a_{ik} характеризуют взаимовлияние координат связки КРМ-Г.

Для придания свойства автономности подсистемам управления координатами q^0, $q^{\text{М}}$, q^{Γ}, обеспечения желаемой динамики изменения координат q^0, $q^{\text{М}}$ и стабилизации колебаний упругого груза q^{Γ} с помощью манипулятора, сформируем закон управления в виде

$$F_{ui}^{Add2} = K_{1i}\dot{q}_i + K_{2i}q_i + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8} k_{ik}\hat{\ddot{q}}_k, \quad i = \overline{1,6}, \qquad (5)$$

где $\hat{\ddot{q}}_k$ — оценки вторых производных от обобщенных координат, полученные с помощью наблюдающего устройства, вопросы реализации которого пока не обсуждаются. Предполагается, что оценки $\hat{\ddot{q}}_k$ получены с достаточной степенью точности, вследствие чего $\hat{\ddot{q}}_k \cong \ddot{q}_k$.

С учетом выражения (5) и в предположении, что $a_{ii}(q) \neq 0$, уравнения движения (4) по координатам q_i, $i = \overline{1,6}$, в замкнутой системе примут следующий вид

$$\begin{gathered} \ddot{q}_i + (K_{2i}\tilde{a}_{ii})q_i + (K_{1i}\tilde{a}_{ii})\dot{q}_i + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8} (\tilde{a}_{ik}\ddot{q}_k + k_{ik}\hat{\ddot{q}}_k) = \\ = (K_{i0}\tilde{a}_{ii})F_{u_i}(t), \qquad (6) \end{gathered}$$

где $\tilde{a}_{ik}(q) = \dfrac{a_{ik}(q)}{a_{ii}(q)}$, $\tilde{a}_{ik}(q) = \dfrac{1}{a_{ii}(q)}$, $\hat{\ddot{q}}_k \cong \ddot{q}_k$.

Желаемую динамику изменения координат $q_i(t)$ определим в виде полученной из уравнений (4) следующей системы независимых уравнений второго порядка:

$$\begin{gathered} \ddot{q}_i^0 + \mu_{1i}\dot{q}_i^0 + \mu_{2i}q_i^0 = F_{ui}(t), \\ \mu_{1i}, \mu_{2i} = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1,6}. \qquad (7) \end{gathered}$$

Принципиальный вопрос синтеза основного контура беспоисковой адаптивной системы заключается в отыскании условий, обеспечивающих тождественность уравнений движения координат $q_i(t)$ замкнутой системы и уравнений желаемых движений координат $q_i^0(t)$.

Необходимым и достаточным условием тождественности уравнений (6) и уравнений (7) является выполнение следующих соотношений:

$$\tilde{a}_{ik}(q) + k_{ik} = 0,\ i = \overline{1,6},\ k = \overline{1,8}, \qquad (8)$$

$$(K_{1i}\tilde{a}_{ii}) = \mu_{1i},\ (K_{2i}\tilde{a}_{ii}) = \mu_{2i},\ (K_{0i}\tilde{a}_{ii}) = 1. \qquad (9)$$

Действительно, подставляя эти соотношения в уравнения (6), получим систему независимых уравнений (7). Это доказывает, что условия (8) являются условиями автономности координат $q_i(t)$, а условия (9) обеспечивают желаемые динамические характеристики движений координат $q_i(t)$, т. е. система уравнений (6) декомпозируется на $n = 6$ автономных уравнений движения (7) с заданными динамическими характеристиками.

Таким образом показано, что на основе предложенного закона управления (5) и реализации условий (8) и (9) имеется возможность сформировать структуру регулятора, определить количество и места введения перестраиваемых параметров, целенаправленное изменение которых в соответствии с требованиями к качеству про-

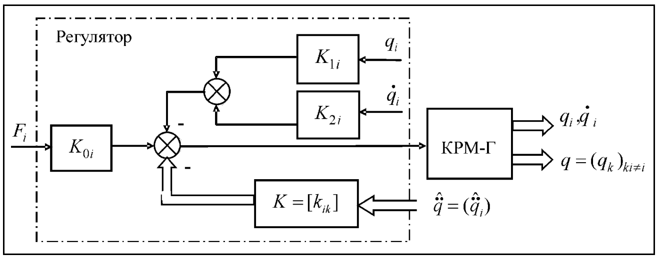

Рис. 2. Структурная схема основного контура беспоисковой адаптивной системы

цессов управления обеспечивает декомпозицию связки КРМ-Г на автономные подсистемы по координатам q_i.

Структурная схема основного контура беспоисковой адаптивной системы, реализующая алгоритм (5), приведена на рис. 2, из которого видно, что обратные перекрестные связи с коэффициентами $k_{ik} \in K$, $i \neq k$, обеспечивают компенсацию взаимовлияния между каналами управления координатами q_i и q_k, а обратные связи с коэффициентами K_{1i}, K_{2i} и коэффициент K_{0i} в прямой цепи обеспечивают желаемую динамку изменения координат $q_i(t)$.

3. СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ БЕСПОИСКОВЫХ АЛГОРИТМОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ АВТОНОМНОСТЬ И ЖЕЛАЕМУЮ ДИНАМИКУ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КРМ-Г

Для синтеза алгоритмов беспоисковой перестройки коэффициентов регулятора применяется процедура, основанная на прямом методе Ляпунова [6]. Физически реализуемые эталонные модели автономного движения КРМ-Г по координатам q_i в рассматриваемом режиме транспортировки упругого груза описываются уравнениями

$$\ddot{q}_{i\mathrm{M}} + \mu_{1i}\dot{q}_{i\mathrm{M}} + \mu_{2i}q_{i\mathrm{M}} = F_{ui}(t), \quad i = \overline{1,6}. \qquad (10)$$

Для синтеза алгоритмов беспоисковой перестройки коэффициентов регулятора рассмотрим уравнение, описывающее изменение координат q_i в замкнутой системе

$$\ddot{q}_i + (K_{1i}\tilde{a}_{ii})\dot{q}_i + (K_{2i}\tilde{a}_{ii})q_i + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8}[\tilde{a}_{ik}\ddot{q}_k + k_{ik}\hat{\hat{q}}_k] = (K_{0i}\tilde{a}_{ii})F_{u_i}(t), \qquad (11)$$

где $k_{ik}(t)$, $K_{1i}(t)$, $K_{2i}(t)$ и $K_{0i}(t)$ — коэффициенты, перестраиваемые по алгоритмам беспоисковой адаптации, обеспечивающим выполнение соотношений (8) и (9) для любого $t > 0$.

На режиме, отличном от номинального, уравнение (11) примет вид:

$$\ddot{q}_i + (K_{1i} + \Delta K_{1i})[\tilde{a}_{ii} + \Delta\tilde{a}_{ii}]\dot{q}_i + (K_{2i} + \Delta K_{2i})[\tilde{a}_{ii} + \Delta\tilde{a}_{ii}]q_i + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8}[\tilde{a}_{ii}(q) + \Delta\tilde{a}_{ik}(q)]\ddot{q}_k + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8}(k_{ik} + \Delta k_{ik})\hat{\hat{q}}_k = (K_{0i} + \Delta K_{0i})[\tilde{a}_{ii}(q) + \Delta\tilde{a}_{ik}(q)]F_{u_i}(t), \qquad (12)$$

где $\Delta\tilde{a}_{ik}(q)$ и $\tilde{a}_{ii}(q)$ — параметрические возмущения, $\Delta k_{ik}(t)$, $\Delta K_{1i}(t)$, $\Delta K_{2i}(t)$ и $\Delta K_{0i}(t)$ — приращения перестраиваемых коэффициентов регулятора.

Пренебрегая произведениями $\Delta\tilde{a}_{ii}\Delta K_{0i}$, $\Delta\tilde{a}_{ii}\Delta K_{1i}$, $\Delta\tilde{a}_{ii}\Delta K_{2i}$, $\Delta\tilde{a}_{ik}\Delta k_{ik}$ как величинами второго порядка малости, из сравнения уравнений (10) и (12) с учетом условий (8) и (9) получим уравнение относительно координатной ошибки ε_i:

$$\ddot{\varepsilon}_i + \mu_{1i}\dot{\varepsilon}_i + \mu_{2i}\varepsilon_i = Y_{1i}\dot{q}_i + Y_{2i}q_i + Z_{0i}F_{ui} + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8} y_{ik}\hat{\hat{q}}_k, \qquad (13)$$

где $Z_{0i} = k_{0i}\Delta\tilde{a}_{ii}\Delta k_{0i}$; $y_{ik} = k_{ik}\Delta\tilde{a}_{ik} + \tilde{a}_{ik}\Delta k_{ik}$; $Y_{1i} = K_{1i}\Delta\tilde{a}_{ii} + \tilde{a}_{ii}\Delta K_{1i}$; Z_{0i}, Y_{1i}, Y_{2i}, y_{ik} — параметрические рассогласования; $\varepsilon_i = q - q_{\mathrm{M}}$ — отклонения координат системы от модели (ошибки).

Обозначив $\varepsilon_i = x_{1i}$, $\dot{\varepsilon}_i = x_{2i}$, представим уравнение (13) в матричной форме

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \rho_i, \qquad (14)$$

где $x_i = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \end{bmatrix}$, $A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\mu_{2i} & -\mu_{1i} \end{bmatrix}$, $\rho_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_{2i} \end{bmatrix}$, $\rho_{2i} = Y_{1i}\dot{q}_i + Y_{2i}q_i + Z_{0i}F_{ui} + \sum_{k=1,\,k\neq i}^{8} y_{ik}\hat{\hat{q}}_k$.

Зададим алгоритмы адаптации в неявном виде:

$$\frac{d}{dt}\Delta k_{ik} = \Psi_{ik}, \quad \frac{d}{dt}\Delta K_{1i} = \Psi_{1i}, \quad \frac{d}{dt}\Delta K_{2i} = \Psi_{2i}, \quad \frac{d}{dt}\Delta K_{0i} = \Psi_{0i}. \qquad (15)$$

С учетом принятых обозначений получим:

$$\dot{y}_{ik} = \psi_{ik} + r_{\mathrm{ik}}, \quad \dot{Y}_{1i} = \Psi_{1i} + r_{1i}; \quad \dot{Y}_{2i} = \Psi_{2i} + r_{2i}, \quad \dot{Z}_{0i} = \Psi_{0i} + r_{ii},$$

где ψ_{ik}, Ψ_{1i}, Ψ_{2i}, Ψ_{0i} — искомые алгоритмы адаптации; $r_{1i} = \frac{d}{dt}(K_{1i}\Delta\tilde{a}_{ii})$, $r_{2i} = \frac{d}{dt}(K_{2i}\Delta\tilde{a}_{ii})$ — скорости изменения параметрических возмущений.

Для рассматриваемого класса объектов можно считать, что параметрические возмущения при $t \geqslant t_0$ неопределенные, но постоянные, т. е.

$$r_{ik} = 0, \quad r_{0i} = 0, \quad r_{1i} = 0, \quad r_{2i} = 0. \qquad (16)$$

Из уравнения (14) с учетом условий (15) и (16) получим систему:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \rho_i, \;\; \dot{Y}_{ik} = \Psi_{yik}, \;\; \dot{Y}_i = \Psi_Y, \;\; \dot{Z}_i = \Psi_Z, \qquad (17)$$

где $Y_{ik} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_{ik} \end{bmatrix}$, $Y_i = \begin{bmatrix} Y_{1i} \\ Y_{2i} \end{bmatrix}$, $Z_i = \begin{bmatrix} 0 \\ Z_{0i} \end{bmatrix}$, $\Psi_{yik} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_{yik} \end{bmatrix}$, $\Psi_Y = \begin{bmatrix} \Psi_{1i} \\ \Psi_{2i} \end{bmatrix}$, $\Psi_Z = \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_z \end{bmatrix}$.

Идеальной работе контуров адаптации соответствуют тождества

$$\varepsilon_i^{(\nu)} \equiv 0, \quad (\nu = 0, 1), \quad y_{ik} = 0, \quad Y_{1i} = 0, \quad Y_{2i} = 0, \quad Z_{0i} = 0. \qquad (18)$$

Если движение, определяемое системой (17), ограничить пространством $\{x_i, Y_{ik}, Y_i, Z_i\}$, то выражения (18) сводятся к тождествам вида

$$x_i \equiv 0, \quad Y_{ik} \equiv 0, \quad Y_i \equiv 0, \quad Z_i \equiv 0, \qquad (19)$$

которые являются нулевым решением матричного уравнения (14).

Определим алгоритмы перестройки параметров регулятора из условия устойчивости нулевого решения (19) уравнения (14). Для этого, воспользовавшись вторым

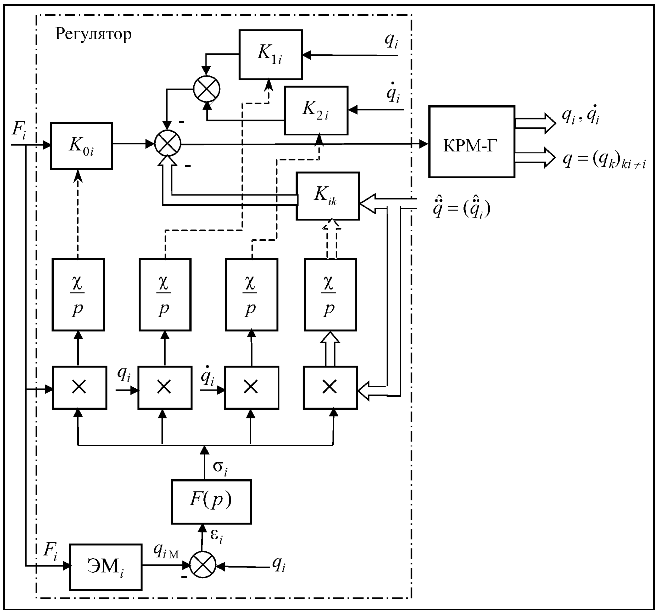

Рис. 3. Структурная схема декомпозирующей адаптивной системы с эталонной моделью *ЭМ$_i$*

методом Ляпунова [6], выберем квадратичную форму V_i в следующем виде:

$$V_i = \chi x_i^T P_i x_i + \sum_{k=1,\, k \ne i}^{8} Y_{ik}^T E Y_{ik} + Y_i^T E_2 Y_i + Z_i^T E_3 Z_i, \quad (20)$$

где P_i — симметричная (2×2) матрица; E_1, E_2 и E_3 — единичные (2×2) матрицы; $\chi = \mathrm{const} > 0$.

Воспользовавшись уравнением (14), запишем производную функции Ляпунова

$$\dot V_i = \chi x_i^T Q_i x_i + 2\xi x_i^T P_i \rho_i + 2 \sum_{k=1,\, k \ne i}^{8} Y_{ik}^T E \Psi_{yik} + $$
$$+ 2 Y_i^T E_2 \Psi_Y + 2 Z_i^T E_3 \Psi_Z, \quad (21)$$

где Q_i — отрицательно определенная матрица (2×2) вида $Q_i = A_i^T P_i + P_i A_i$. Матрица A_i является неособой матрицей с отрицательными действительными частями корней характеристического уравнения. В этом случае отрицательно определенной квадратичной форме $x_i^T Q_i x_i$ в выражении (21) соответствует заведомо положительно определенная квадратичная форма $x_i^T P_i x_i$ в уравнении (20). Алгоритмы адаптации ищутся из условия неположительности величины

$$\chi x_i^T P_i \rho_i + \sum_{k=1,\, k \ne i}^{8} Y_{ik}^T E_1 \psi_{ik} + Y_i^T E_2 \Psi_Y + Z_i^T E_3 \Psi_z \leqslant 0. \quad (22)$$

Поскольку при выполнении условия (22) имеет место $\dot V_i < 0$, а функция V_i при этом является положительно определенной, то нулевое решение (19) уравнения (14) устойчиво.

Раскрывая неравенство (22), в результате получим:

$$\chi\sigma_i \left(Y_{1i} \dot q_i + Y_{2i} q_i + Z_{0i} F_{ui} + \sum_{k=1,\, k \ne i}^{8} y_{ik} \hat{\hat{q}}_k \right) +$$
$$+ \left(Y_{1i} \Psi_{1i} + Y_{2i} \Psi_{2i} + Z_{0i} \Psi_{0i} + \sum_{k=1,\, k \ne i}^{8} y_{ik} \psi_{ik} \right) \leqslant 0, \quad (23)$$

где $\sigma_i = p_{22} \dot\varepsilon_i + p_{21} \varepsilon_i$, p_{21} и p_{22} — элементы матрицы P, которые определяются при решении матричного уравнения $A_i^T P_i + P_i A_i = Q_i$.

Неравенство (23) выполняется, если алгоритмы адаптации принять в виде

$$\frac{d}{dt} \Delta k_{ik} = \psi_{ik} = \chi \sigma_i \hat{\hat{q}}_i, \quad \frac{d}{dt} \Delta K_{1i} = \Psi_{1i} = \chi \sigma_i \dot q_i,$$
$$\frac{d}{dt} \Delta K_{2i} = \Psi_{2i} = \chi \sigma_i q_i, \ \frac{d}{dt} \Delta K_{0i} = \Psi_{0i} = \chi \sigma_i F_{ui}, \quad (24)$$

что теоретически завершает задачу синтеза беспоисковой адаптивной системы с эталонной моделью.

Структурная схема синтезированной таким образом системы, которая реализует автономность и желаемое качество движения по координатам q_i в соответствии с законом управления (5) и алгоритмами беспоисковой перестройки параметров регулятора (24), приведена на рис. 3, где пунктирными стрелками выделены цепи настройки соответствующих коэффициентов регулятора.

4. ДЕМПФИРОВАНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА С ПОМОЩЬЮ ПРИВОДОВ МАНИПУЛЯТОРА

Декомпозиция связки трех механических систем КРМ-Г на автономные подсистемы с желаемой динамикой позволяет решить задачу демпфирования упругих колебаний транспортируемого пассивного полезного груза с помощью управляющих воздействий, создаваемых исполнительными органами манипулятора.

Закон управления (5) и алгоритмы беспоисковой перестройки параметров регулятора (24) позволяют декомпозировать движение связки КРМ-Г на автономные подсистемы, описываемые уравнениями

$$\ddot q_i + \mu_{1i} \dot q_i + \mu_{2i} q_i = F_{ui}(t), \ \mu_{1i}, \mu_{2i} = \mathrm{const} > 0,$$
$$i = \overline{1, 6}, \quad (25)$$

$$a_{77}(q) \ddot q_7 + b_7 q_7 + \sum_{i=1}^{6} a_{7i} \ddot q_i = 0,$$
$$a_{88}(q) \ddot q_8 + b_8 q_8 + \sum_{i=1}^{6} a_{8i} \ddot q_i = 0, \quad (26)$$

где $q = (q_1 = X_0,\ q_2 = Y_0,\ q_3 = \vartheta,\ q_4 = \alpha_1,\ q_5 = \alpha_2,\ q_6 = \alpha_3,\ q_7 = \lambda_3,\ q_8 = \lambda_4)^T$ — вектор обобщенных координат связки КРМ-Г. Напомним, что координаты X_0, Y_0 и ϑ определяют положение корпуса робота в базовой системе координат, координаты α_1, α_2 и α_3 — положение звеньев манипулятора относительно корпуса КРМ; координаты $q_7 = \lambda_3$ и $q_8 = \lambda_4$ — упругие смещения нежесткого полезного груза относительно его недеформированного состояния, заданного в системе координат схвата манипулятора; $F_{ui}(t)$, $i = \overline{1, 6}$ — элементы вектора-столбца управляющих сил, причем $F_{u7}(t) = 0$, $F_{u8}(t) = 0$, в силу пассивности транспортируемого груза.

Из уравнений (26) видно, что движения по координатам $q_7 = \lambda_3$ и $q_8 = \lambda_4$ представляют собой незатухающие колебания.

Ставится задача формирования демпфирующей составляющей в уравнениях (26) в условиях отсутствия собственных управляющих воздействий по координатам $q_7 = \lambda_3$ и $q_8 = \lambda_4$. Предлагается следующий подход к решению этой задачи.

Допустим, что алгоритм управления (5) и алгоритмы беспоисковой адаптации (24) обеспечивают выполнение условий декомпозиции связки КРМ-Г на автономные подсистемы. При отсутствии упругости в шарнирах и звеньях манипулятора КРМ в уравнениях (25) можно положить μ_{1i}, $\mu_{2i} \cong 0$. Это позволяет записать:

$$\ddot{q}_i = F_{ui}(t), \quad i = \overline{1, 6}. \tag{27}$$

Подставляя соотношения (27) в уравнения колебаний груза (26), получим

$$\begin{gathered} a_{77}(q)\ddot{q}_7 + b_7 q_7 = -\sum_{i=1}^{6} a_{7i} F_{ui}(t), \\ a_{88}(q)\ddot{q}_8 + b_8 q_8 = -\sum_{i=1}^{6} a_{8i} F_{ui}(t). \end{gathered} \tag{28}$$

Перепишем уравнения (28) следующим образом:

$$\begin{gathered} a_{77}(q)\ddot{q}_7 + b_7 q_7 = -\sum_{i=1}^{3} a_{7i} F_{ui}(t) - \sum_{i=4}^{6} a_{7i} F_{ui}(t), \\ a_{88}(q)\ddot{q}_8 + b_8 q_8 = -\sum_{i=1}^{3} a_{8i} F_{ui}(t) - \sum_{i=4}^{6} a_{7i} F_{ui}(t). \end{gathered}$$

Предполагая, что $a_{jj} \neq 0$, и вводя обозначения $\tilde{b}_j = b_j a_{jj}^{-1}$, $\tilde{a}_{ji} = a_{ji} a_{jj}^{-1}$, $i = \overline{1, 6}$; $j = 7, 8$, перепишем последние уравнения в общем виде

$$\ddot{q}_j + \tilde{b}_j q_j = -(F_\text{Т} + F_\text{М})_j, \tag{29}$$

где $F_{\text{Т}j} = -\sum_{1}^{3} \tilde{a}_{ji} F_{ui}(t)$ — управляющие воздействия по координатам X_0, Y_0 и ϑ, определяющим траекторное и угловое движение связки КРМ-Г; $F_{\text{М}j} = -\sum_{4}^{6} \tilde{a}_{ji} F_{ui}(t)$ — силовые воздействия, создаваемые приводами манипулятора.

В режиме транспортировки имеется возможность переопределить управляющие силы приводов манипулятора $F_{\text{М}j}$ в соответствии с задачей стабилизации колебаний упругого груза, формируя воздействия $F_{\text{М}j}$ из условия введения в уравнения движения (29) демпфирующей компоненты по модальным координатам $q_7 = \lambda_3$, $q_8 = \lambda_4$:

$$(F_\text{Т} + F_\text{М})_j = 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j. \tag{30}$$

Из условия (30) получим алгоритм формирования управляющих воздействий $(F_\text{М})_j$ в виде

$$(F_\text{М})_j = 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j - (F_\text{Т})_j, \quad \xi_j = \text{const} > 0, \quad \omega_j = \sqrt{\tilde{b}_j}. \tag{31}$$

Подставляя соотношения (31) в уравнения (29), получим уравнения, описывающие поведение координат упругого груза $q_7 = \lambda_3$, $q_8 = \lambda_4$ под действием сформированного указанным выше способом управления

$$\ddot{q}_j = 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = 0, \quad j = 7, 8.$$

Это — уравнения колебательного звена с затуханием, что позволяет считать решение задачи демпфирования упругих колебаний пассивного груза с помощью приводов манипулятора завершенной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что применение принципа беспоисковой адаптации теоретически позволяет решить задачу высокоточного и безопасного управления нестационарной нелинейной механической системой типа «управляемая платформа — манипулятор — упругий груз», минуя процедуру определения нестационарных параметров математической модели объекта управления.

Последующие исследования должны быть направлены на выявление условий практической реализуемости предложенных алгоритмов адаптации, позволяющих декомпозировать математическую модель рассмотренного в работе роботизированного космического модуля на ряд независимых подсистем управления с желаемой динамикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рутковский В. Ю., Суханов В. М.* Динамическая модель свободнолетающего космического робототехнического модуля // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 5.
2. *Шильяк Д.* Децентрализованное управление сложными системами. — М.: Мир, 1994.
3. *Вознесенский И. Н.* О регулировании машин с большим числом регулируемых параметров // Автоматика и телемеханика. — 1938. — № 4.
4. *Крутько П. Д.* Аналитическое решение задачи Вознесенского для стационарных и нестационарных линейных систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 1995. — № 4.
5. *Крутько П. Д., Черноусько Ф. Л.* Декомпозирующие алгоритмы управления движением нелинейных динамических систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2001. — № 4.
6. *Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Крутова И. Н., Земляков С. Д.* Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. — М.: Машиностроение, 1972.

☎ *(095) 334-87-79*

E-mail: suhv@ipu.ru ❑