УДК 62-50

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОГО КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ[1]

В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков, В.М. Суханов, В.М. Глумов

Рассмотрены истоки возникновения принципов адаптивного и координатно-параметрического управлений. Объяснена сущность этих принципов. Проанализированы теоретические подходы к решению проблем адаптивного координатно-параметрического управления. Названы причины появления новых проблем в рассматриваемом классе современных систем управления и приведены некоторые результаты их решения.

1. ИСТОКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРИНЦИПОВ АДАПТИВНОГО И КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЙ

При построении систем управления основное внимание уделяется принципу обратной связи. Структурную схему системы управления можно представить в виде, показанном на рис. 1, где $g(t)$ — вектор управляющих воздействий, подаваемых на систему; $f(t)$, $\xi(t)$ — векторы возмущений, действующих, соответственно, на объект и регулятор. Знак вопроса означает, что регулятор необходимо синтезировать так, чтобы в системе выполнялись заданные требования на движение объекта, например, чтобы между выходом объекта $y(t)$ и управляющим воздействием $g(t)$ поддерживалось соотношение вида

$$y(t) = F(g(t), t) \qquad (1)$$

с заданной степенью точности, несмотря на действие неизмеряемых возмущений $f(t)$, $\xi(t)$. Для решения этой задачи требуется знание математической модели (ММ) объекта.

Математические модели объектов управления составляются в соответствии с физическими законами их движения и, как правило, являются нелинейными и нестационарными. Например, в форме дифференциальных уравнений ММ объекта можно представить в виде

$$\frac{dx}{dt} = X(x, u, t),$$
$$y = Y(x, u, t), \quad x(t_0) = x_0, \qquad (2)$$

где t — время; $x \in R^n$ — вектор состояния; $u \in R^m$ — вектор управления движением объекта; t_0 — начало рассмотрения ММ вида (2); $X(\cdot)$, $Y(\cdot)$ — векторы, компоненты которых составляют, в общем случае, нелинейные нестационарные функции соответствующих аргументов.

Как правило, ММ объекта вида (2) слишком сложна для решения задачи. Объясняется это тем, что такой могучий инструмент, как принцип суперпозиции, теряет свою силу в нелинейной постановке. В таком случае в теории управления, зародившейся в 1930-х гг., было принято рассматривать ММ объекта «в малом» относительно некоторых характерных режимов его движения. И тогда с некоторой степенью точности ММ объекта при его движении с малыми отклонениями от характерных режимов $x = x^*(t)$, $u = u^*(t)$, $f = f^*(t)$, $y = y^*(t)$, $\xi = \xi^*(t)$ можно линеаризовать и представить, например, в виде

$$\begin{aligned} \Delta\dot{x} &= A(t)\Delta x + B(t)\Delta u(t) + H(t)\Delta f(t), \\ \Delta y &= C(t)\Delta x + D(t)\Delta u(t) + N(t)\Delta\xi(t), \end{aligned} \qquad (3)$$

где Δx, $\Delta u(t)$, $\Delta f(t)$, $\Delta y(t)$, $\Delta\xi(t)$ — малые отклонения от векторов x^*, $u^*(t)$, $f^*(t)$, $y^*(t)$, $\xi^*(t)$; $A(t)$, $B(t)$, $G(t)$, $C(t)$, $D(t)$, $N(t)$ — матрицы соответствующих размерностей.

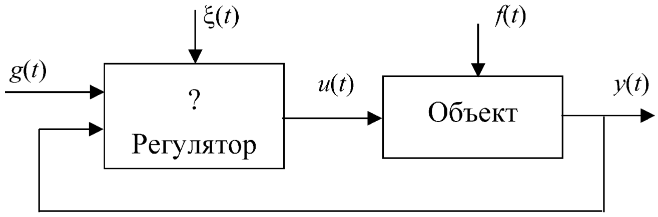

Рис. 1. Структурная схема системы управления

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-01-00062) и Программы фундаментальных исследований отделения ЭММПУ РАН (проект № 14).

Для удобства записи знак Δ в выражении (3) обычно опускается и ММ объекта записывается в виде

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B(t)u(t) + H(t)f(t), \\ y &= C(t)x + D(t)u(t) + N(t)\xi(t). \end{aligned} \qquad (4)$$

Данная модель наиболее распространена в теории управления. Подчеркнём, что она:

- справедлива, и то – приближённо, лишь при «малых» в каком-то смысле векторах x, $u(t)$, $f(t)$, $y(t)$, $\xi(t)$, например, при малых нормах этих векторов;
- нестационарна, т. е. элементы матриц $A(t)$, ..., $N(t)$ – функции времени.

В частности, для некоторых объектов управления матрицы $A(t)$, ..., $N(t)$ с достаточной степенью точности можно принять стационарными и работать с линейными стационарными ММ объектов управления вида

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu(t) + Hf(t), \\ y &= Cx + Du(t) + N\xi(t). \end{aligned} \qquad (5)$$

Интенсивное развитие теории управления, начиная с 1930-х гг., относилось, в основном, к ММ объектов вида (5), и к началу 1950-х гг. основные инженерные методы построения и расчёта систем автоматического регулирования стационарными объектами были разработаны и прекрасно изложены, например, в монографии [1].

Математическая модель объекта вида (5) позволила решить многие задачи автоматического управления в различных отраслях промышленности. Следует признать, что и в настоящее время такая упрощенная ММ остаётся актуальной и используется в задачах автоматизации многих технических систем и технологических процессов. Однако уже в военные и послевоенные годы появились объекты управления, для которых она оказалась далеко не адекватной. Речь идёт о развитии авиационной, а затем и космической техники. Разработанных к этому времени в теории автоматического регулирования приемов было недостаточно для обеспечения требуемой динамической точности работы бортовых систем управления летательными аппаратами. Причина простая: ММ летательных аппаратов, даже если их удавалось представить линеаризованными дифференциальными уравнениями, не были стационарными, а изменялись со временем при изменении высот и скоростей полёта. Для нестационарного объекта с ММ вида (4) требовался также нестационарный регулятор, т. е. регулятор, который по мере изменения свойств объекта и входных воздействий на систему управления был бы способен автоматически изменять свои параметры и, возможно, структуру закона регулирования с тем, чтобы динамические свойства системы управления в целом удовлетворяли заранее заданным требованиям. Другими словами, система управления должна обладать способностью адаптироваться, приспосабливаться к изменяющимся условиям работы. Можно достаточно обоснованно утверждать, что проблемы управления летательными аппаратами в 1950-х гг. привели к интенсивному развитию адаптивного управления, которое, в силу большей близости ММ вида (4) к исходному виду (1) по сравнению с ММ вида (5), получило применение и в других отраслях промышленности (электротехнической, нефтедобывающей, металлургической и др.).

Структурную схему адаптивной системы управления можно представить в виде, показанном на рис. 2, где, в отличие от схемы, представленной на рис. 1, добавлено

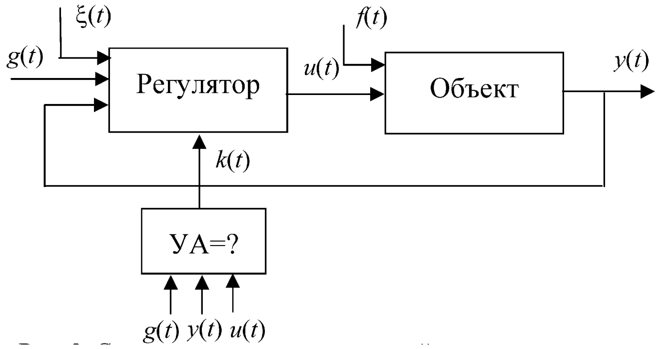

Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы управления

устройство адаптации *УА*, которое призвано на основе априорной и текущей доступной информации о векторах $y(t)$, $g(t)$ и $u(t)$ изменять вектор настраиваемых параметров регулятора $k(t)$, а возможно, и структуру регулятора с целью обеспечения заданных динамических свойств системы управления объектом с ММ вида (4).

Принципиальная проблема адаптивного управления заключается в отыскании алгоритма работы устройства адаптации, способного по текущей информации о движении системы в условиях отсутствия априорной информации об изменении матриц $A(t)$, ..., $N(t)$ в ММ (4) таким образом изменять регулятор, чтобы скомпенсировать влияние неизвестного изменения объекта во времени на движение замкнутой системы. Проблема усложняется тем, что, несмотря на линейную ММ (4), адаптивная система с учётом работы устройства адаптации является принципиально нелинейной и нестационарной.

Написаны тысячи статей и сотни монографий на тему адаптивного управления. Укажем только некоторые работы [2, 3], связанные с темой настоящей статьи или близкие к ней. К сожалению, опубликованные работы с примерами практического внедрения конкретных адаптивных систем управления не столь многочисленны. С некоторыми практическими приложениями адаптивного управления можно ознакомиться в работах [4, 5].

Как отмечалось выше, ММ объекта (4) имеет место лишь для малых норм векторов x, $u(t)$, $f(t)$, $y(t)$, $\xi(t)$, при которых её приближённо можно считать линейной. Линейная модель объекта, как правило, позволяет синтезировать линейный регулятор (см. рис. 1). Более того, типичный приём синтеза адаптивной системы управления для объекта с ММ (4) заключается в синтезе линейного регулятора для объекта с замороженными коэффициентами для некоторого момента времени $t = t^*$ и затем изменении параметров этого регулятора со временем по мере изменения параметров объекта. Грубо говоря, для линейной модели объекта синтезируется линейная модель регулятора. Однако в объекте управления и регуляторе имеются типичные нелинейности, присущие любой конкретной конструкции. Так, органы управления объектом, как правило, имеют ограничения на диапазоны изменения своих параметров. Исполнительные устройства регулятора имеют ограничения на скорость и (или) ускорение изменения координат органов управления и т. д. При выходе координат объекта или регулятора на нелинейный режим работы компенсация нестационарного характера объекта изменением коэф-

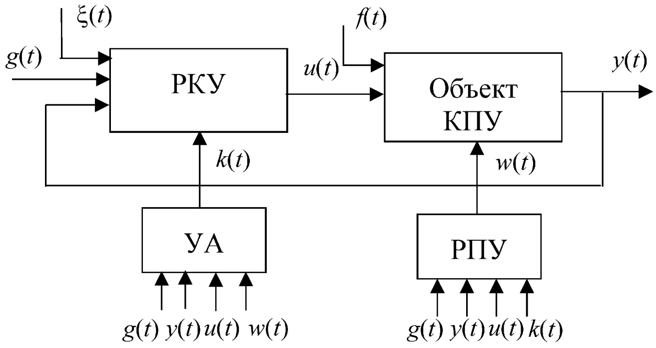

Рис. 3. Структурная схема системы адаптивного координатно-параметрического управления

фициентов и (или) структуры регулятора оказывается недостаточной. Такие случаи описаны в работе [2]. В своё время академик Б.Н. Петров высказал соображение, что для задачи адаптивного управления необходимым может оказаться не только изменение регулятора, но и целенаправленное изменение конструктивных параметров самого объекта в процессе его функционирования. В такой постановке возникает возможность управления объектом не только органами управления (координатное управление), но и изменением самого объекта с помощью целенаправленного изменения его конструктивных параметров (параметрическое управление).

Структурная схема системы адаптивного координатно-параметрического управления (КПУ) объектом представлена на рис. 3. Задача синтеза системы управления объектом с ММ вида (4) остаётся аналогичной: необходимо синтезировать алгоритмы работы регулятора координатного управления *РКУ*; устройства адаптации *УА* и регулятора параметрического управления *РПУ* ($w(t)$ — вектор настраиваемых конструктивных параметров объекта).

После монографии [2] авторами настоящей статьи получены некоторые результаты по развитию принципов построения, синтезу и анализу адаптивных и координатно-параметрических систем управления. Ряд результатов по этой тематике изложен в работах [6, 7].

В настоящей работе авторы ставят своей задачей ознакомить читателя с новыми проблемами, возникающими при адаптивном и координатно-параметрическом управлении современными объектами авиационной и космической техники. Некоторые из этих проблем решены теоретически и методически, другие требуют основательных исследований.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим ММ объекта не столь общую, как уравнение (1), но и не столь упрощенную, как ММ (4), в виде

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(t, w)x + B(t, w)u(t) + H(t, w)f(t),\\ y &= C(t, w)x + D(t, w)u(t) + N(t, w)\xi(t),\end{aligned}\qquad(6)$$

где под вектором w введено некоторое множество конструктивных параметров объекта, допускающих целенаправленное изменение в процессе функционирования. В работе [2] рассматривается вопрос о переходе от ММ (1) к ММ вида (6). С точки зрения модели общего вида (1) в модели (6) векторы $u(t)$ и $w = w(t)$ — составляющие единого вектора управления, поскольку изменение этих векторов влияет на вектор состояния $x = x(t)$ и вектор выхода $y = y(t)$. Однако в ММ (6) интересен различный характер влияния управлений $u(t)$ и $w(t)$ на движение объекта: $u(t)$ осуществляет аддитивное или координатное управление, $w(t)$ — мультипликативное или параметрическое управление. В дополнение к традиционному способу управления объектом с помощью вектора $u(t)$ в ММ (6) появляется возможность управления с помощью изменения оператора влияния вектора $u(t)$ на вектор выхода $y(t)$.

В работе [6] рассматривается частный случай ММ объекта КПУ в виде

$$\begin{aligned}\dot{x} = {}&[A(t) + K(x, t)]x + [B(t) + N(x, t)]u(t) +\\ &+ [H(t) + R(x, t)]f(t)\end{aligned}\qquad(7)$$

в предположении о возможности измерения полного вектора состояния x, т. е. $y = x$, при $C(t, w) = E$, где E — единичная матрица, $D(t, w) = N(t, w) = 0$. В ММ (7) предполагается, что элементы матриц $K(x, t)$, $N(x, t)$ и $R(x, t)$ допускают целенаправленное изменение в процессе функционирования объекта и, следовательно, являются средствами параметрического управления объектом. Объект КПУ (7) обладает «богатым» параметрическим управлением. В частности, можно мыслить объекты с более «бедным» параметрическим управлением. Например, возможно $K(x, t) \equiv 0$, или $K(x, t) \equiv 0$ и $N(x, t) \equiv 0$, или, наконец, $K(x, t) \equiv N(x, t) \equiv R(x, t) \equiv 0$, когда у ММ объекта полностью отсутствуют средства параметрического управления и его ММ представляется системой (4).

Для ММ объекта КПУ (7) в работах [6, 7] получены алгоритмы решения различных задач управления в классе адаптивных систем КПУ. Однако ММ вида (7) — это частный случай ММ более общего вида (6). Далеко не каждый конкретный объект с возможными средствами параметрического управления можно привести к ММ вида (7). Рассмотрим, например, объект типа космического робототехнического модуля (КРМ) [8] с точки зрения возможности его представления объектом КПУ.

Космический робототехнический модуль является механической системой, состоящей из несущего тела — корпуса и одного или нескольких манипуляторов с концевыми схватами и предназначен для обслуживания орбитальной станции. Свободно летающий КРМ служит для перемещения грузов из одной точки станции в другую, сборки или разборки различных конструкций на станции или вблизи неё, вынесения за пределы станции малых космических объектов для проведения различных экспериментов и др.

Уравнения движения КРМ удобно вывести на основе уравнений Лагранжа второго рода в виде [8—10]

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} = Q,\qquad(8)$$

где $T = T(q, \dot{q})$ — кинетическая энергия механической системы; $q \in R^m$ — вектор обобщенных координат; Q — вектор обобщенных сил.

Будем рассматривать КРМ как совокупность нескольких связанных тел: корпуса с шестью степенями свободы и γp_γ звеньев, где γ — число манипуляторов, p_γ — число звеньев γ-го манипулятора.

Определив кинетическую энергию в виде $T(q, \dot q) = \dot q^T A(q)\dot q/2$ и проделав необходимые в соответствии с уравнением (8) операции дифференцирования, получим уравнение

$$A(q)\ddot q + \sum_{s=1}^{m}[\dot q^T D_s(q)\dot q]e_s = Q, \qquad (9)$$

где e_s — вектор-столбец размерности $(m \times 1)$ с нулевыми компонентами кроме единственной s-ой по порядку единичной компоненты; $D_s = (d_{it}^s(q)$ — матрицы с элементами

$$d_{it}^s(q) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial a_{si}(q)}{\partial q_t} + \frac{\partial a_{st}(q)}{\partial q_i} - \frac{\partial a_{it}(q)}{\partial q_s}\right),$$

где $a_{it}(q)$ — элементы матрицы $A(q)$, s, i, $t = \overline{1, m}$.

Для упрощения дальнейших рассуждений примем, что КРМ обладает лишь одним манипулятором с n степенями свободы, т. е. $\gamma = 1$, $m = 6 + n$. В таком случае уравнение (9) удобно представить в виде

$$\begin{pmatrix} A_{11}(q) & A_{12}(q) \\ A_{21}(q) & A_{22}(q)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\ddot q_{\text{к}} \\ \ddot q_{\text{м}}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix} N_{\text{к}}(q, \dot q) \\ N_{\text{м}}(q, \dot q)\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}(q) & R_{12}(q) \\ R_{21}(q) & R_{22}(q)\end{pmatrix}\begin{pmatrix} S_{\text{к}} \\ S_{\text{м}}\end{pmatrix}, \qquad (10)$$

где $q_{\text{к}} \in R^6$ — вектор шести обобщённых координат положения корпуса КРМ в пространстве, принятом за инерциальное; $q_{\text{м}} \in R^n$ — вектор обобщённых координат, определяющих положение звеньев манипулятора; $S_{\text{к}} \in R^6$ — вектор шести действующих сил и моментов относительно строительных осей корпуса, предназначенных для управления движением КРМ; $S_{\text{м}} \in R^n$ — вектор действующих сил и моментов, предназначенных для управления положением звеньев манипулятора; $q^T = (q_{\text{к}}^T, q_{\text{м}}^T)$; $N_{\text{к}}(q, \dot q)$ и $N_{\text{м}}(q, \dot q)$ — векторы, компонентами которых являются квадратичные формы относительно компонент вектора q.

Зафиксировав положение звеньев манипулятора, из выражения (10) получим уравнение движения КРМ в виде

$$A_{11}(q)\ddot q_{\text{к}} + N_{\text{к}}(q, \dot q) = R_{11}(q)S_{\text{к}}, \qquad (11)$$

в котором постоянные координаты вектора $q_{\text{м}}$ играют роль параметров; зафиксировав положение корпуса, т. е. сделав его неподвижным, получим традиционную систему уравнений движения манипуляционного робота [9, 11]

$$A_{22}(q)\ddot q_{\text{м}} + N_{\text{м}}(q, \dot q) = R_{22}(q)S_{\text{м}}. \qquad (12)$$

Однако заметим, что матрицы $A_{11}(q)$, $R_{11}(q)$ и компоненты вектора $N_{\text{к}}(q, \dot q)$ зависят от полного вектора q, т. е. компоненты вектора $q_{\text{к}}$ в уравнении (11) выступают в качестве параметров, от которых существенно зависит движение корпуса. Изменяя вектор $q_{\text{м}}$ целенаправленным образом, можно существенно изменять эффективность управления положением КРМ в пространстве.

Таким образом, КРМ с моделью вида (10) относится к классу объектов КПУ, причём модель (10) существенно отличается от модели объекта КПУ вида (7).

Математическая модель объекта КПУ вида (6) позволяет сформулировать следующие проблемы.

Проблема 1 — вывод уравнений движения объекта КПУ с большим числом степеней свободы.

Вывод таких уравнений без активного привлечения современных вычислительных средств не представляется возможным, поэтому проблема 1 включает в себя разработку математических основ её решения, удобных для применения вычислительных средств, и программных методов её решения с помощью вычислительных средств.

Проблема 2 — разработка математических методов анализа влияния конструктивных параметров объекта КПУ на его ММ и разработка программных средств анализа такого влияния.

Проблема 2 очевидна. Действительно, ММ объекта КПУ, даже в случае модели (10), зависит от конструктивных параметров весьма сложно. Провести указанный анализ без вычислительных средств и удобных как математических методов, так и эффективных программных алгоритмов, не представляется возможным.

Рассмотрим вновь ММ (10) движения КРМ. Выше получены её частные случаи (11) и (12), соответственно, для постоянных векторов $q_{\text{к}}$ и $q_{\text{м}}$, причём ММ (11) и (12) соответствуют различным структурам КРМ с различными числами степеней свободы. Но зафиксированы могут быть не все компоненты вектора $q_{\text{м}}$ или $q_{\text{к}}$. Например, в векторе $q_{\text{м}}$ могут быть зафиксированы от одной до n компонент. Таким образом, ММ (11) может вырождаться в большое число промежуточных ММ, которые соответствуют различным структурам КРМ. Естественно, что управление движением КРМ зависит и от текущей структуры КРМ, и от текущих компонент вектора состояния, и от текущих значений конкретных параметров. Если ещё учесть, что КРМ может переносить грузы с разными масс-инерционными характеристиками, то становится очевидной следующая проблема.

Проблема 3 — разработка методов программного обеспечения для решения задачи получения текущей ММ объекта КПУ в процессе его функционирования с учётом изменяющейся структуры объекта, методов и программного обеспечения оперативного решения задачи анализа ММ объекта КПУ от конструктивных параметров.

Сформулированные проблемы, естественно, актуальны и для многих других типов подвижных объектов общетехнического назначения.

3. О НЕКОТОРЫХ НОВЫХ ПРОБЛЕМАХ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Основное назначение адаптивных систем КПУ, как уже отмечалось, заключается в компенсации отрицательного влияния изменения динамических свойств объекта на динамические свойства системы управления в целом, для чего изменяется структура и (или) параметры регулятора. Для этого регулятор необходимо выбрать так, чтобы такая компенсация была принципиально возможна и, если это удаётся сделать, то необходимо синтезировать алгоритмы работы устройства адаптации *УА* и регулятора параметрического управления *РПУ* (см. рис. 3), которые позволяли бы осуществлять желаемую компенсацию изменения динамических свойств объекта соответствующим изменением регулятора и самого объекта. Наиболее удобна для получения алгоритмов адаптации ММ системы управления в виде (7). Предполагается, что элементы матриц $A(t)$, $B(t)$ и $H(t)$ изменяются заранее неизвестным образом, а элементы матриц $K(x, t)$, $N(x, t)$ и $R(x, t)$ допускают целенаправленное изменение. Алгоритмы адаптации и параметрического управления синтезируются из условия, например, выполнения равенств

$$A(t) + K(x, t) = A_0, \qquad B(t) + N(x, t) = B_0,$$
$$H(t) + R(x, t) = H_0,$$

где матрицы A_0, B_0 и H_0 заранее заданы, например, постоянны, причём такие, что с ними выполняются технические требования на движение системы.

Различные варианты задач, возникающих в такой постановке, рассмотрены в работах [6, 7], где приводится методика вывода алгоритмов адаптации и параметрического управления для многих конкретных задач.

В рассмотренной, условно говоря, «компенсационной» логике построения адаптивных систем КПУ остаётся ещё немало проблем. Например, приведение ММ замкнутой системы управления к виду (7) — весьма непростая задача. Методы синтеза алгоритмов адаптации и алгоритмов работы регулятора параметрического управления (см. рис. 3) далеки от своего завершения. Однако новые актуальные задачи, требующие применения адаптивных систем КПУ, выдвигают новые проблемы. Так, для управления объектом с ММ вида (10) на первый план выдвигаются проблемы его нелинейной природы, многосвязности, дискретно изменяющейся структуры в процессе функционирования. В связи с этим сформулируем ещё одну проблему управления, возникающую в классе адаптивных систем КПУ.

Проблема 4 — разработка алгоритмов адаптации и алгоритмов работы регулятора параметрического управления в задачах, где на первый план выдвигаются проблемы нелинейного вида и многосвязности ММ объектов КПУ.

Выделим в отдельную проблему задачу управления объектами КПУ с изменяющейся структурой в процессе функционирования. Как видим, традиционные подходы к синтезу алгоритмов управления подобными объектами, даже в классе адаптивных систем КПУ, являются недостаточными. Необходима разработка таких методов управления, которые для неизменной структуры объекта обеспечивали бы заданные свойства системы управления, но, кроме этого, они должны обеспечивать оперативное реагирование и на непредвидимые заранее структурные изменения в объекте.

Проблема 5 — разработка методов управления объектами КПУ с дискретным изменением структуры объекта с заранее непредсказуемым существенным изменением ММ объекта в процессе его функционирования.

Обратим внимание, что в задачах управления объектами, для которых актуальна необходимость решения проблемы 5, особо остры проблемы 1—3.

Нельзя сказать, что сформулированные проблемы не ставились до настоящего времени. Так, проблема 1 поставлена и найдено достаточно сильное её решение в работе [9]. С учётом существенного развития вычислительных средств данная работа может послужить основой решения проблемы 1 для такого актуального объекта КПУ, как КРМ.

Проблема 2 нашла своё отражение в задачах, решаемых в работе [12]. Остановимся подробнее на этой работе.

4. ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕФОРМИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Математическая модель углового движения деформируемого космического аппарата (ДКА) при малых отклонениях от некоторого характерного режима его движения, подобно системе уравнений (5), можно представить в линейном стационарном виде

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M \\ 0 \end{pmatrix}, \qquad (13)$$

где $x^T = (x_1, x_2, x_3)$ — вектор наблюдаемых угловых координат ДКА; $q^T = (q_1, q_2, ..., q_n)$ — вектор ненаблюдаемых упругих координат; $M^T = (M_1, M_2, M_3)$ — вектор управляющих моментов, восстанавливающих заданное угловое положение ДКА; A_{ij} $(i, j = 1, 2)$, B_{22} — постоянные матрицы, определяемые механической структурой ДКА.

Математическая модель рассматриваемого объекта в виде (13) неудобна для его анализа как объекта управления и для определения зависимости динамических свойств ДКА от его конструктивных параметров. В работе [13] авторы предложили от ММ вида (13) переходить к другой эквивалентной ММ, которую они назвали «модально-физической». Для ДКА такая модель имеет вид

$$\ddot{\bar{x}}_i = n_i m; \; \ddot{s}_i + \omega^2 s_i = K^i m; \; s_i^T = (\tilde{x}_{i1}, \tilde{x}_{i2}, ..., \tilde{x}_{in});$$
$$\tilde{x}_i = \sum_{j=1}^{n} \tilde{x}_{ij}; \; x_i = \bar{x}_i + \tilde{x}_i \; (i = 1, 2, 3), \qquad (14)$$

где $m = J^{-1}M$; $J = \text{diag}(J_{11}, J_{22}, J_{33})$; J_{ii} — диагональные элементы матрицы A_{11}; $\omega^2 = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, ..., \omega_n^2)$; $K^i = (k_{jr}^i)$ $(i, r = 1, 2, 3; j = \overline{1, n})$ — матрица коэффициентов возбудимости; $n_i = (n_{i1}, n_{i2}, n_{i3})$ — вектор-строка коэффициентов эффективности управления.

В системе уравнений (14), в отличие от ММ (13), собственные частоты ω_j $(j = \overline{1, n})$, коэффициенты n_{ir} $(i, r = 1, 2, 3)$, k_{jr}^i $(i, r = 1, 2, 3; j = \overline{1, n})$ имеют вполне понятный физический смысл. Получив графики зависимости собственных частот, коэффициентов эффективности управления и коэффициентов возбудимости от конструктивных параметров объекта, можно решать задачу конструкторского формирования ДКА ещё на этапе проектирования или, если в этом возникает необходимость, параметрического управления объектом на

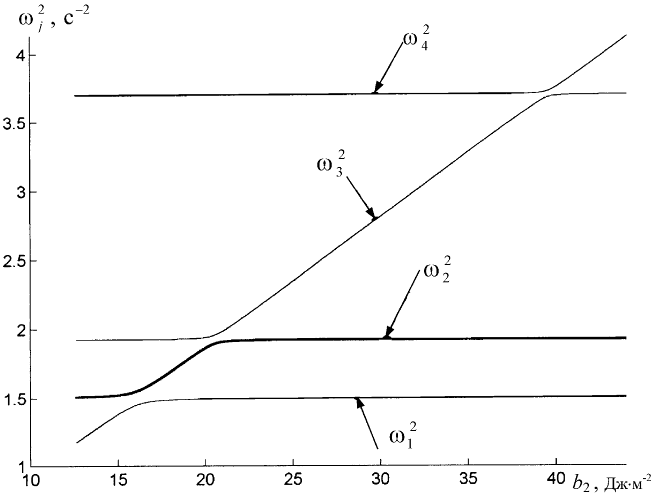

Рис. 4. Зависимости собственных частот ДКА от коэффициента приведенной жесткости упругой штанги

этапе его функционирования. В работе [12] приведены графики зависимости собственных частот ω_j ($j = \overline{1, 4}$) и коэффициентов возбудимости k_{jr}^1 ($r = 1, 2, 3$; $j = \overline{1, 4}$) от такого конструктивного параметра, как жёсткость несущих необходимые приборы штанг. Другие конструктивные параметры ДКА задавались конкретными значениями.

На рис. 4 представлены графики зависимостей собственных частот ω_j ($j = \overline{1, 4}$) от жёсткости штанг для примера ДКА, рассмотренного в [12].

Проблема 3, по-видимому, ещё ждёт своего решения.

Проблема 4 созвучна общей непростой проблеме теории управления: отысканию алгоритмов управления нелинейными многосвязными объектами. Естественно, что при её решении применительно к классу адаптивных систем КПУ необходимо воспользоваться всем накопленным в теории управления опытом.

Рассмотрим один из возможных достаточно общих подходов к решению проблемы 4.

5. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМ МНОГОСВЯЗНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ОГРАНИЧЕННЫМИ УПРАВЛЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ УПРАВЛЯЕМОСТИ

Рассмотрим ММ объекта КПУ в виде (9), записав её в более удобном представлении, аналогичном виду (10),

$$A(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = R(q)S, \qquad (15)$$

где $q \in R^n$, $S^T = (S_1, S_2, ..., S_n)$ — вектор действующих сил и моментов, призванных для управления движением вектора $q = q(t)$.

Действующие управляющие воздействия ограничены, т. е.

$$|S_i| \leqslant S_i^{\max}, \quad S_i^{\max} = \text{const} > 0. \qquad (16)$$

Как видим, ММ (15) соответствует такому объекту, как КРМ, рассмотренному в п. 3. Очевидно, что объект типа КРМ требует предсказуемого высокоточного управления для безопасности других космических объектов, с которыми он взаимодействует: с космической станцией, если он её обслуживает; другими космическими объектами, если он манипулирует в их окрестности, и др.

Возникает вопрос, что нужно понимать под высокоточным управлением объектом с ММ вида (15), например, объектом типа КРМ? Сформулируем качественно понятие такого управления следующим образом. Пусть для каждой координаты q_i ($i = \overline{1, n}$) тем или иным способом, который мы пока не затрагиваем, определяется задающее воздействие $q_i^*(t)$ и требуется, чтобы координата $q_i = q_i(t)$ следила за своим управляющим воздействием $q_i^*(t)$ с такими показателями:

1) если

$$|q_i^*(t) - q_i(t)| > \varepsilon_i, \qquad (17)$$

где ε_i = const > 0 — наперёд заданная величина, то $q_i(t)$ устраняет рассогласование (17) и остаётся в трубке

$$|q_i^*(t) - q_i(t)| \leqslant \varepsilon_i \qquad (18)$$

при первом же её достижении, причём рассогласование устраняется по вполне предсказуемому желаемому закону изменения $q_i(t)$;

2) если неравенство (17) устранено при $t = t^*$, то неравенство (18) имеет место при $t \geqslant t^*$;

3) условия 1 и 2 должны выполняться для каждой координаты q_i ($i = \overline{1, n}$) независимо от того, присутствуют или не присутствуют управления $S_i = S_i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) по другим координатам q_j ($j = \overline{1, n}$; $j \neq i$).

Известны трудности управления линейными многосвязными объектами и, конечно, трудно представить удовлетворительное решение задачи управления нелинейным многосвязным объектом с ограниченными управлениями и сформулированными выше требованиями на динамическую точность движения. Тем не менее, такое управление именно в таких условиях возможно. Прежде чем перейти к нему, зададимся вопросом: является ли объект с ММ вида (15) с ограничениями (16) управляемым вообще, например, в смысле управляемости по Калману, т. е. возможности перевода объекта из любой начальной точки пространства $\{q, \dot{q}\}$ в любую другую точку этого пространства? Е.С. Пятницкий в работе [14] даёт на это ответ, который качественно звучит таким образом: да, объект с ММ вида (15) и ограничениями (16) управляем в смысле Калмана, если:

- число независимых управлений не меньше числа степеней свободы;
- управляющие силы превосходят возможные значения соответствующих обобщённых сил, зависящих от внешнего возмущения.

В соответствии с этими условиями в ММ (15) размерности векторов q и S принимаются одинаковыми. Однако понятно, что от управляемости по Калману до высокоточного управления необходимо решить немало проблем.

Не останавливаясь подробно на рассматриваемой задаче, дадим основные этапы её решения [15].

В работе [16] сформулировано понятие технической управляемости объекта с ММ вида (15) и понятие области технической управляемости в пространстве $\{t, q, \dot{q}\}$. Физически эти понятия означают следующее: если движение объекта принадлежит области технической управляемости, то при подаче максимального по модулю управления $|S_i(t^*)| = S_i^{\max}$ по координате $q_i(t)$ при $t = t^*$ возникает ускорение $\ddot{q}_i(t^*)$, которое не менее определённого уровня $|\ddot{q}_i(t^*)| \geqslant \rho_i^0$, $\rho_i^0 = \text{const} > 0$.

Доказано [15], что если движение объекта с ММ вида (15) находится в области технической управляемости, то на законах релейного управления вида

$$S_i(q, \dot{q}, t) = S_i^{\max}\operatorname{sign}(u_i(q, \dot{q}, t)) \quad (i = \overline{1, n}),$$

где $u_i(q, \dot{q}, t)$ функция переключения формируется регулятором, ММ вида (18) декомпозируется в эквивалентную систему

$$\ddot{q}_i = \rho_i(t)\operatorname{sign}(u_i(q, \dot{q}, t)),\ \rho_i(t) \geqslant \rho_i^0 \quad (i = \overline{1, n}). \quad (19)$$

Понятно, что с ММ объекта вида (19) уже проще решать задачу высокоточного управления, чем с ММ вида (15). Действительно, в ММ (19) объекта появляется возможность синтезировать закон управления, который обеспечивал бы заданные показатели 1—3 по каждой обобщённой координате q_i $(i = \overline{1, n})$ в отдельности.

Например, описан следующий подход к такому синтезу [15]. Предположим, что для некоторого $i \in [1, n]$ в ММ (19) имеет место

$$\rho_i(t) \equiv \rho_i^0, \quad \rho_i^0 = \text{const} > 0. \quad (20)$$

Пусть требуется перевести координату $q_i(t)$ из одного положения $q_i(t_0) = \text{const}$, $\dot{q}_i(t_0) = 0$ в другое положение $q_i(t_1) = \text{const}$, $\dot{q}_i(t_1) = 0$, т. е. $q_i^*(t) = \text{const}$. Известно [17], что исходя из принципа максимума Понтрягина, такой переход можно осуществить оптимальным по быстродействию способом, если функцию переключения $u_i(q, \dot{q}, t)$ в ММ (19) выбрать в виде

$$u_i = x_i + \frac{(\dot{x}_i)^2}{2\rho_i^2}\operatorname{sign}(\dot{x}_i), \quad (21)$$

где введено обозначение $x_i = q_i(t_1) - q_i(t)$. Очевидно, что в данном частном случае все три требования высокоточного управления соблюдаются, причём время переходного процесса определяется соотношением

$$T_i^0(|\Delta q_i|) = \sqrt{\frac{4|\Delta q_i|}{\rho_i^0}}, \quad (22)$$

где $\Delta q_i = q_i(t_1) - q_i(t_0)$.

На основе прямого метода Ляпунова можно показать [15], что в данном частном случае требования 1—3 высокоточного управления сохраняются не только при условии (20), но и в случае

$$\rho_i(t) \geqslant \rho_i^0. \quad (23)$$

Однако рассмотренная задача высокоточного управления решена лишь для частного случая $q_i^*(t) = \text{const}$. Если наложить на управляющее воздействие $q_i^*(t)$ ограничение по скорости его изменения, которое вполне естественно в силу ограничений (16), то незначительная модификация закона управления (21) приводит к выполнению требований 1—3 высокоточного управления для любого управляющего воздействия $q_i^*(t)$, учитывающего такие ограничения [18].

В рассмотренной постановке задача высокоточного гарантированного управления решается на основе оптимального по быстродействию алгоритма управления, но, если так можно выразиться, неоптимальным образом. Действительно, чем меньше значение ρ_i^0 в неравенствах (19) и (23), тем медленнее протекают процессы в системе (19) с законами управления (21). Это видно из соотношения (22). Возникает задача адаптивного высокоточного гарантированного управления: отыскание текущего значения ρ_i^0 в неравенствах (22) и (26), наиболее близкого к равенству, например, по соотношению $\rho_i = \rho_i^0(t) + \varepsilon$, где $\varepsilon = \text{const} > 0$ — заданная постоянная величина. В таком случае использование значения $\rho_i^0(t)$ в законах управления вида (21) вместо постоянного значения ρ_i^0 может дать значительный выигрыш в быстродействии при управлении нелинейным многосвязным объектом. Однако высказанные соображения по поводу адаптивного высокоточного гарантированного управления ещё ждут своего теоретического обоснования и алгоритмического решения.

6. ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА В ОБЪЕКТЕ ТИПА КОСМИЧЕСКОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ КАК СРЕДСТВА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В работе [8] получены уравнения движения КРМ вида (10), состоящего из корпуса и одного манипулятора с тремя звеньями, причём для движения КРМ в одной плоскости получены аналитические зависимости элементов матриц $A_{ij}(q)$ и $R_{ij}(q)$ $(i, j = 1, 2)$ и компонент векторов $N_к(q, \dot{q})$ и $N_м(q, \dot{q})$ от конструктивных параметров КРМ и компонент векторов q и $\dot{q}$.

Рассмотрим такую упрощенную задачу: концевым схватом последнего третьего звена манипулятор КРМ захватывает жёсткий точечный груз и далее КРМ должен перенести этот груз на значительное расстояние. Очевидно, что в процессе перелёта для КРМ как механической системы может существовать некоторая конфигурация, определяемая, например, расположением звеньев манипулятора, которая оптимальна в том или ином смысле. Например, если перелёт осуществляется с одновременной стабилизацией углового положения КРМ, то возникает проблема для объектов космического типа, связанная с минимизацией энергетических затрат на управление. В таком случае можно рассмотреть две интересные возможности: 1) поддерживать в процессе перелёта конфигурацию звеньев манипулятора, при которой энергетические затраты на управление минимальны; 2) использовать звенья манипулятора как дополнительные средства управления КРМ из условия минимизации общих энергетических затрат на управление.

Первая возможность описана в работе [19]. Показано, что существует некоторое оптимальное положение звеньев манипулятора при переносе груза в рассматриваемой задаче, минимизирующее энергетические затраты на управление. Это положение определяется фактом совпадения центра масс КРМ в целом с центром масс корпуса. Этот факт, в свою очередь, соответствует минимальному значению момента инерции КРМ относительно оси, проходящей через центр масс КРМ перпендикулярно плоскости движения. Для конфигурации КРМ, принятой в работе [19], момент инерции КРМ относительно его центра масс определяется соотношением

$$J = J_0 + (m_1 + m_{\text{гр}})[x_a^2 + y_a^2 - r_1^2 - 2r_1(x_a\sin\alpha_1 + y_a\sin\alpha_2)] + (m_1 + m_{\text{гр}})[r_2^2 + 2r_2(x_a\sin(\alpha_1 + \alpha_2) + y_a\cos(\alpha_2 + \alpha_2)) - r_1\cos\alpha_2], \quad (24)$$

где углы α_1 и α_2 определяют положение звеньев манипулятора, $m_{\text{гр}}$ – масса переносимого груза, остальные величины определяются значениями конструктивных параметров КРМ. Минимизируя момент инерции J в выражении (24) по аргументам α_1 и α_2, отыскивают значения

$$\alpha_1 = \alpha_1^{\text{opt}}, \quad \alpha_2 = \alpha_2^{\text{opt}}, \quad (25)$$

определяющие оптимальную конфигурацию КРМ при переносе груза. Далее стоит задача управления: тем или иным способом поддерживать равенства (25) с желаемой степенью точности.

Вторая возможность используется в работе [20]. Рассмотрим вновь уравнения движения КРМ в виде (10). Выше отмечалось, что подобные объекты управления выдвигают жёсткие требования к энергетическим затратам на управление. Особенно это относится к топливу реактивных двигателей, доставляемого с Земли, и в меньшей степени к электроэнергии, восполняемой с помощью солнечных батарей. Отсюда возникает следующее соображение: поскольку система (10) взаимосвязана по управляющим векторам $S_{\text{к}}$ и $S_{\text{м}}$, нельзя ли управление и стабилизацию КРМ в процессе длительного перелёта перенести с компонент вектора $S_{\text{к}}$, требующих затрат дорогостоящего реактивного топлива, на компоненты вектора $S_{\text{м}}$, требующих, как правило, менее дефицитной электрической энергии? Показано, что такая возможность существует [20]. Действительно, рассмотрим вновь уравнения движения КРМ в плоскости, где из трёх координат вектора $q_{\text{к}}$ две будут определять расположение начала связанных осей КРМ в пространстве, принимаемом за инерциальное, а третья координата, назовём её υ, угловое положение корпуса. По-прежнему, α_1, α_2 и α_3 – координаты вектора $q_{\text{м}}$, определяющие положение трёх звеньев манипулятора относительно корпуса. Для упрощения решения задачи при аналитическом (а не экспериментальном) исследовании пренебрежём векторами $N_{\text{к}}(q, \dot q)$ и $N_{\text{м}}(q, \dot q)$, считая норму вектора $\dot q$ относительно малой. Из трёх координат α_i ($i = 1, 2, 3$) две зафиксируем, приняв их постоянными, а одну, например, α_1, оставим в качестве обобщённой координаты. Из упростившейся при этом системы (10) выпишем уравнение относительно координаты υ в виде

$$\ddot\upsilon = r_{\upsilon\upsilon}(q)M_\upsilon + r_{\upsilon\alpha}(q)M_\alpha + r_{\upsilon x}(q)F_x + r_{\upsilon y}(q)F_y, \quad (26)$$

где $r_{\upsilon\upsilon}(q)$, $r_{\upsilon\alpha}(q)$, $r_{\upsilon x}(q)$ и $r_{\upsilon y}(q)$ – коэффициенты эффективности влияния управлений по соответствующим координатам на движение по координате υ. Уравнение (26) при условии $M_\upsilon = 0$ запишем в виде

$$\ddot\upsilon = r_{\upsilon\alpha}(q)M_\alpha + M_b(q, t), \quad (27)$$

где $M_b(q, t) = r_{\upsilon x}(q)F_x + r_{\upsilon y}(q)F_y$.

В данном случае воздействие M_α, предназначенное для управления положением звена манипулятора, используется для управления угловым положением КРМ, т. е. углом υ. Для этого, например, можно выбрать закон регулирования в виде $M_\alpha = -k_0(k_\upsilon\dot\upsilon + \upsilon)$, с которым уравнение (27) преобразуется к виду

$$\ddot\upsilon + r_{\upsilon\alpha}(q)k_0k_\upsilon\dot\upsilon + r_{\upsilon\alpha}(q)k_0\upsilon = M_b(q, t). \quad (28)$$

Полученное уравнение (28) нелинейно, однако, если к нему применить адаптивный подход и теми или иными методами адаптации путем целенаправленного изменения коэффициента k_0 обеспечить с заданной степенью точности выполнение равенства $r_{\upsilon\alpha}(q)k_0 = k_{\text{а}}$, $k_{\text{а}} = \text{const}$, то динамику изменения координаты υ можно оценить по уравнению (28), считая его линейным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере развития динамических технических объектов и усложнения решаемых ими задач с одновременным ужесточением требований к точности их движения становятся всё более востребованными методы адаптивного и координатно-параметрического управлений. К ещё неполностью решённым проблемам такого управления добавляются новые, актуальность решения которых диктуется необходимостью технического развития общества, экономическими и социальными соображениями. В настоящей статье сформулирован ряд новых актуальных проблем адаптивного и координатно-параметрического управлений. Приведённые в статье некоторые возможные направления их решения далеко не единственные. Можно ожидать, что читатели найдут свой интерес в решении сформулированных проблем, предложат и разовьют свои подходы к их решению. Возможно, статья натолкнёт читателя на формулировку других, близких к поставленным, не менее актуальных проблем. Авторы с удовлетворением встретят как печатную дискуссию (или критику) по поднимаемым проблемам, так и устную, лишь бы было продвижение в реализации необходимых технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Основы* автоматического регулирования: Теория / Под ред. В.В. Солодовникова. — М.: ГНТИ МАШЛИТ, 1954.
2. *Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д.* Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. — М.: Наука, 1980.
3. *Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Нелинейное и адаптивное управления сложными динамическими системами. — СПб.: Наука, 2000.
4. *Рутковский В.Ю.* Работы Института проблем управления в области беспоисковых адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 6. — С. 42—49.
5. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* О некоторых результатах развития теории и практического применения беспоисковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 7. — С. 103—121.
6. *Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами: некоторые результаты и направления развития // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 6. — С. 100—116.
7. *Рутковский В.Ю., Земляков С.Д., Глумов В.М.* О некоторых возможностях формирования самосовершенствующихся управляемых динамических систем // Тр. Института. — М.: Ин-т пробл. упр. им. В.А. Трапезникова РАН, 1999. — Т. 3. — С. 108—127.
8. *Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Динамическая модель свободнолетающего космического робототехнического модуля // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 5. — С. 38—57.
9. *Кулаков Ф.М.* Супервизорное управление манипуляционными роботами. — М.: Наука, 1980.
10. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961.
11. *Крутько П.Д.* Управление исполнительными системами роботов. — М.: Наука, 1991.
12. *Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Модально-физическая модель пространственного углового движения деформируемого космического аппарата и её свойства // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 12. — С. 38—50.
13. *Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Модель деформируемого космического аппарата и общие характеристики динамики его конструкции // Изв. РАН. Техн. кибернетика. — 1994. — № 1. — С. 198—206.
14. *Пятницкий Е.С.* Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями // Автоматика и телемеханика. — 1996. — № 12. — С. 29—37.
15. *Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* К вопросу о технической управляемости и декомпозиции лагранжевых систем с ограниченными управлениями // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 10. — С. 13—33.
16. *Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Техническая управляемость автоматизированного космического робота // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 3. — С. 31—44.
17. *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления. — М.: Наука, 1969.
18. *Рутковский В.Ю., Земляков С.Д.* Техническая управляемость и декомпозиция математической модели движения многосвязных нелинейных нестационарных объектов с ограниченными управлениями // Конф. по теории упр., посвящ. памяти акад. Бориса Николаевича Петрова / Ин-т пробл. упр. им. В.А. Трапезникова РАН: Тез. докл. — М., 2003. — С. 20—21.
19. *Богомолов В.П., Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта автоматического управления. I, II // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 5. — С. 27—40; № 6. — С. 75—88.
20. *Rutkovsky V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M., Zemlyakov S.D.* Nonlinear Combined Control by Space Robotic Module Motion with Using Manipulator's Mobility // Proceedings of the 15-th IFAC World Congress. Spain, Barcelona. July 21—26, 2002. CD-ROM.

☎ *(095) 336-87-30*

E-mail: rutkov@ipu.rssi.ru ❑

ABSTRACT

Rutkovsky V.Yu., Zemlyakov S.D., Sukhanov V.M., Glumov V.M.

NEW DIRECTIONS OF ADAPTIVE COORDINATE-PARAMETRIC CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

The paper discusses the origin of adaptive and coordinate-parametric control principles. The matter of these principles is clarified. Theoretical approaches to the solution of adaptive coordinate-parametric control problems are analyzed. The reasons of new problems emergence in the considered class of control systems are considered; some results of their solution are presented.