



# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ<sup>1</sup>

В. Ф. Филаретов

Рассмотрена проблема управления сложными нелинейными динамическими объектами с переменными, а также неопределенными параметрами и воздействиями со стороны внешней среды. Предложен единый подход и несколько оригинальных методов синтеза многоуровневых самонастраивающихся, адаптивных и робастных систем управления, позволяющих обеспечивать высокое качество управления указанными объектами. Результаты моделирования подтверждены работоспособность и высокая эффективность синтезированных систем при работе в условиях неопределенности и существенной переменности параметров сложных динамических объектов.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена рассмотрению и решению проблемы управления сложными нелинейными динамическими объектами с несколькими степенями свободы (СС). При перемещении таких объектов по сложным пространственным траекториям возникают значительные взаимовлияния между всеми их СС, а также изменяющиеся взаимодействия с окружающей средой. Эти особенности приводят к существенному, быстрому и неконтролируемому изменению динамических свойств и параметров объектов. Проблема управления такими нестационарными объектами решалась многими авторами. Однако окончательного решения этой проблемы пока не найдено, и требуются новые эффективные пути и методы ее решения.

На примере управления высокоскоростным автономным подводным роботом (АПР) далее рассмотрен новый единый подход и предложено несколько оригинальных методов синтеза многоуровневых самонастраивающихся, адаптивных и робастных систем управления (СУ), позволяющих обеспечивать высокое качество (динамическую точность) управления объектами указанного типа. Синтезированные СУ, работая в реальном масш-

табе времени, обеспечивают этим сложным динамическим объектам высокое качество управления в условиях неопределенности и существенной переменности их параметров.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ АПР

Наиболее полная динамическая модель пространственного движения АПР представляется в виде шести сложных взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений с переменными параметрами, записанных в системе координат, связанной с корпусом АПР [1, 2]. Эти уравнения учитывают перекрестные связи и взаимовлияния между всеми степенями свободы АПР, присоединенные массы и моменты инерции жидкости, а также гидродинамические и гидростатические силы и моменты, действующие на него со стороны окружающей вязкой среды. В матричной форме указанная система шести уравнений записывается следующим образом:

$$\mathbf{M}(t)\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}, t)\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}, t)\mathbf{v} + \mathbf{F}_v = \boldsymbol{\tau}_d, \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}(t) = \mathbf{M}(\xi(t)) \in R^{6 \times 6}$  — матрица инерции АПР;  $\mathbf{C}(\mathbf{v}, t) = \mathbf{C}(\mathbf{v}, \xi(t)) \in R^{6 \times 6}$  — матрица кориолисовых и центробежных сил;  $\mathbf{D}(\mathbf{v}, t) = \mathbf{D}(\mathbf{v}, \xi(t)) \in R^{6 \times 6}$  — матрица сил и моментов вязкого трения;  $\mathbf{v} = (v_x, v_y,$

<sup>1</sup> Работа поддержана грантами РФФИ.

$v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \in R^6$  — вектор проекций линейной и угловой скоростей АПР на оси связанной с ним системы координат;  $\tau_d = (\tau_{dx}, \tau_{dy}, \tau_{dz}, M_{dx}, M_{dy}, M_{dz})^T \in R^6$  — вектор сил и моментов, создаваемых движителями АПР;  $F_v = F_v(t) \in R^6$  — вектор внешних возмущений;  $\xi \forall = \xi(t)$  — вектор ограниченной размерности, элементы которого содержат параметры АПР, изменяющиеся в процессе его движения (в частности, присоединенные массы и моменты инерции жидкости, коэффициенты вязкого трения и др.).

Поскольку движение АПР по пространственным траекториям происходит в абсолютной системе координат, то к уравнениям (1) добавляются кинематические соотношения, обеспечивающие преобразование из связанной в абсолютную систему координат [2, 3]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{v}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{x} = (x, y, z, \varphi, \psi, \theta)^T \in R^6$  — вектор положения и ориентации АПР в абсолютной системе координат;  $\varphi, \psi$  и  $\theta$  — углы курса, дифферента и крена;  $\mathbf{J}(\mathbf{x}) \in R^{6 \times 6}$  — матрица преобразования системы координат, элементами которой являются комбинации тригонометрических функций углов  $\varphi, \psi$  и  $\theta$ .

Модель (1), (2) чрезвычайно сложна. Поэтому при синтезе СУ для рассматриваемого типа АПР можно применить два возможных подхода: разработать такие методы, которые позволят выполнять синтез системы управления АПР сразу на основе обобщенной модели (1), (2); для упрощения процедуры синтеза применять метод декомпозиции [4], согласно которому уравнения динамики (1) разбиваются на шесть сепаратных (локальных) систем, соответствующих отдельным степеням свободы АПР. Причем это не будет упрощением полной модели АПР, поскольку в каждой локальной системе полностью сохраняются и учитываются все взаимосвязи между всеми остальными пятью локальными системами, которые имеют место в процессе произвольного пространственного движения робота, а также все воздействия со стороны окружающей вязкой среды. В результате любая из трех локальных систем, соответствующих линейным степеням свободы АПР, может быть описана следующей системой уравнений (здесь индексы проекций на оси координат для простоты опущены):

$$\begin{aligned} \tau_d &= f(\omega_d, v_j), \\ m\dot{v} + d_1 v \sigma + d_2 v |v| \sigma' + f_v &= \tau_d, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $v$  — любая из проекций линейной скорости движения АПР на оси связанной системы координат;  $\tau_d$  — тяга, создаваемая движительным комп-

лексом по соответствующей СС;  $f(\omega_d, v_j)$  — нелинейная функция переменных  $\omega_d$  и  $v_j$ , вид которой зависит от компоновки и параметров движительного комплекса;  $\omega_d$  — угловая скорость вращения вала движителя;  $v_j$  — скорость перемещения окружающей жидкости вдоль оси винта;  $f_v$  — обобщенная функция, включающая в себя все внешние воздействия на соответствующую локальную систему и воздействия со стороны других СС;  $m$  — масса робота с учетом присоединенной массы жидкости по соответствующей СС;  $d_1$  и  $d_2$  — гидродинамические коэффициенты, соответствующие линейной и квадратичной зависимостям сил вязкого трения от скорости движения АПР по каждой СС;  $\sigma$  и  $\sigma' = (1 - \sigma)$  — вспомогательные коэффициенты, зависящие от режима обтекания жидкостью движущегося АПР ( $\sigma = 1$ , если  $|v| < v_{кр}$ , и  $\sigma = 0$ , если  $|v| > v_{кр}$ ,  $v_{кр}$  — граничное значение скорости).

Аналогичные уравнения (с точностью до обозначений) получаются и для любой из трех локальных систем, соответствующей вращательной степени свободы АПР.

Как показали многочисленные исследования, существенное влияние на динамику всего АПР в целом оказывает динамика его движительного комплекса. Поэтому при синтезе высокоточной системы управления АПР необходимо обязательно включать динамику этого комплекса в общую математическую модель, описывающую движение робота по пространственной траектории. В качестве базовой модели каждого движителя была принята система уравнений, полученная в работе [5], которая учитывает наиболее важные особенности взаимодействия винта с окружающей вязкой жидкостью:

$$\begin{aligned} J_d \dot{\omega}_d + (K_m K_w / R_d) \omega_d + M_B &= (K_m K_y / R_d) u, \\ \tau_d &= F_\tau |\omega_d| s_\tau(\omega_d, v_p), \\ M_B &= F_m |\omega_d| (s_\tau(\omega_d, v_p) + H_{гд} C_r \omega_d), \\ s_\tau(\omega_d, v_p) &= (K_s + H_{гд}) \omega_d - v_p / 2 - \\ &- \text{sign}(\omega_d) \sqrt{(K_s \omega_d - v_p / 2)^2 + 2 H_{гд} K_s \omega_d^2}, \\ H_{гд} &= H + \delta_H \text{sign} \omega_d, \\ v_p &= \begin{cases} v_j, & \text{если } \text{sign} \omega_d = \text{sign} v_j, \\ 0, & \text{если } \text{sign} \omega_d \neq \text{sign} v_j, \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $K_s = F_\tau / (4 \rho_j S_d)$  — постоянный коэффициент;  $H_{гд}$  — гидродинамический шаг винта;  $H$  — геометрический шаг винта;  $\delta_H$  — гидродинамическая поправка на шаг винта;  $F_\tau, F_m$  — обобщенные коэффициенты упора и момента;  $C_r$  — коэффициент



профильных потерь винта;  $\rho_{ж}$  — плотность окружающей жидкости;  $S_d$  — площадь диска винта;  $J_d$  — момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенного момента инерции жидкости;  $R_d$  — активное сопротивление якорной цепи электродвигателя;  $K_m$  и  $K_w$  — коэффициенты момента и противо-ЭДС электродвигателя постоянного тока;  $K_y$  — коэффициент усиления усилителя мощности;  $u$  — сигнал управления движителем соответствующей СС;  $s_\tau$  — абсолютное скольжение винта;  $M_B$  — момент на валу движителя;  $v_p$  — вспомогательная переменная.

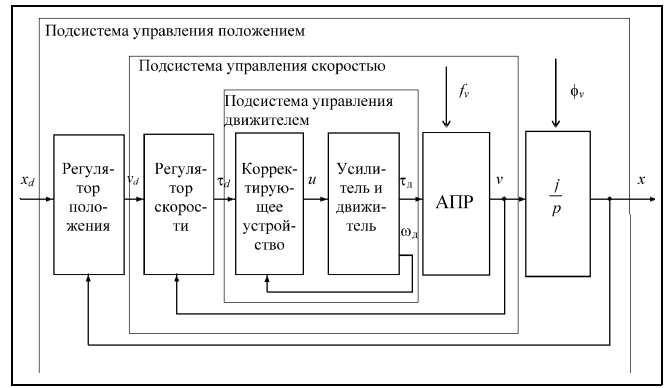
Диапазоны возможных изменений параметров движителей и АПР определяются неравенствами:  $J_{d\min} \leq J_d \leq J_{d\max}$ ,  $F_{m\min} \leq F_m \leq F_{m\max}$ ,  $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$ ,  $d_{1\min} \leq d_1 \leq d_{1\max}$ ,  $d_{2\min} \leq d_2 \leq d_{2\max}$ , где индексами min и max обозначены наименьшие и наибольшие значения соответствующих параметров.

Поскольку для рассматриваемых кинематических схем АПР тяги  $\tau_{dx}$ ,  $\tau_{dy}$  и  $\tau_{dz}$  по каждой поступательной СС создаются отдельными движителями, то введенная ранее функция  $f_\tau(\omega_d, v_{ж})$  для каждого движителя полностью определяется правой частью второго уравнения системы (4). При иной схеме расположения движителей, а также для определения моментов  $M_{dx}$ ,  $M_{dy}$  и  $M_{dz}$ , создаваемых движительным комплексом по вращательным СС, достаточно несложного геометрического пересчета, никак не влияющего на предлагаемые и исследуемые ниже методы синтеза высококачественных СУ.

Математическая модель (1)–(4) представляет собой сложную нелинейную многомерную систему дифференциальных и алгебраических уравнений с переменными коэффициентами. Непосредственное использование этой модели (даже с учетом возможной декомпозиции на основе второго подхода) при синтезе СУ весьма затруднительно. Далее будут рассмотрены оба указанных выше подхода, использующих несколько оригинальных методов синтеза и несколько иерархических уровней управления в структуре единой СУ движением АПР.

## 2. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВОЙ СУ

Для упрощения процедуры синтеза разрабатываемую обобщенную СУ пространственным движением АПР, синтезируемую на основе централизованной (1), (2) или децентрализованной (3) модели, целесообразно разделить на три отдельные подсистемы (уровня) управления. В результате эта СУ будет содержать три контура управления: движительным комплексом, скоростью движения и собственно положением (ориентацией) АПР. При



**Рис. 1. Обобщенная схема СУ по одной степени свободы АПР:**  
 $u$  — сигнал управления движителем;  $\phi_v$  — перекрестные связи между соответствующими степенями свободы АПР, определяемые кинематическим соотношением (2);  $x_d$ ,  $v_d$  и  $\tau_d$  — соответственно, задающее воздействие по линейной координате АПР, по скорости его перемещения и по силе тяги движителя

этом появляется возможность в каждой подсистеме применять наиболее эффективные методы синтеза управляющих устройств и регуляторов, в максимальной степени учитывающие особенности соответствующих динамических объектов (ДО). Кроме того, в процессе разработки подходов и методов для синтеза СУ каждого уровня (контура) основной упор будет делаться на то, чтобы синтезируемые системы формировали такие управляющие сигналы (воздействия), которые максимально учитывали бы реально существующие ограничения мощности усилительных и исполнительных элементов; т. е. качественное управление конкретными ДО (подсистемами) должно обеспечиваться не благодаря большой мощности управляющих сигналов (это имеет место в большинстве известных СУ, синтезированных традиционными методами), а благодаря правильному формированию и своевременной подаче соответствующих управляющих воздействий. Эти воздействия должны формироваться с помощью маломощных корректирующих устройств, максимально учитывающих свойства соответствующих ДО и параметры их движения. Обобщенная схема предлагаемой многоуровневой СУ по одной степени свободы АПР показана на рис. 1.

Для реализации предложенного подхода синтез обобщенной (многоуровневой) системы управления АПР осуществляется поэтапным решением следующих подзадач.

*На первом этапе* выполняется синтез самонастраивающихся подсистем нижнего уровня (внутреннего контура) для управления движительным комплексом АПР. Эти подсистемы обеспечивают каждому движителю постоянные желаемые динамические свойства при любых изменениях его па-

раметров в процессе произвольного движения робота.

На втором этапе разрабатывается единая адаптивная подсистема централизованного управления скоростью движения АПР (на основе централизованной модели (1), (2)) или отдельные адаптивные регуляторы для всех локальных систем децентрализованного управления скоростью его движения по каждой СС (на основе децентрализованных моделей (3)). На этом этапе (см. средний контур на рис. 1) предполагается не только гарантировать независимость динамических свойств контура скорости от переменных параметров АПР и параметров его взаимодействия с окружающей вязкой средой, но и обеспечить достижение максимальных показателей по быстродействию и точности управления.

И, наконец, на третьем этапе с учетом спроектированного среднего контура управления скоростью движения АПР синтезируется СУ его пространственным движением одновременно по всем шести СС. При этом создаваемый внешний контур управления с помощью ранее синтезированных внутренних контуров придает АПР в целом желаемые динамические свойства и позволяет добиваться высоких показателей качества (в том числе динамической точности) при обработке произвольных пространственных траекторий с высокой скоростью движения с учетом всех реально существующих взаимовлияний между СС, а также переменных и трудно идентифицируемых воздействий со стороны окружающей вязкой среды.

В рамках одной статьи нет возможности даже упомянуть все особенности и алгоритмы работы всех разрабатываемых оригинальных методов многоэтапного (многоуровневого) синтеза высококачественных самонастраивающихся, адаптивных и робастных систем управления АПР на основе рассмотренных ранее подходов. Поэтому отметим лишь основные особенности этих методов и рассмотрим получаемые с их помощью результаты.

### 3. СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯМИ АУТОНОМНЫХ АПР

Отметим, что система уравнений (4), описывающая динамику каждого движителя, весьма сложная, существенно нелинейная и нестационарная. Поэтому задачу синтеза адаптивной СУ движительным комплексом АПР с целью формирования ограниченных по мощности сигналов управления следует решать в два этапа [6–8]. Вначале синтезируется специальный нелинейный регулятор, предназначенный для компенсации нелинейностей при некоторых фиксированных значениях переменных параметров  $J_d$  и  $F_m$ . Затем на основе

эталонной модели формируется дополнительный контур самонастройки, позволяющий исключить отрицательное влияние отклонений параметров движителей от номиналов на качество процесса управления. На основе указанного двухэтапного метода синтеза формируется адаптивная СУ, позволяющая нелинейному движителю с существенно переменными параметрами (см. выражение (4)) придать свойства простого линейного периодического звена с постоянными желаемыми параметрами вида:

$$\dot{\tau}_d = (K_d \tau_d - \tau_d) / T_d, \quad (5)$$

где  $K_d$  и  $T_d$  — желаемые коэффициент усиления и постоянная времени.

Структурная схема адаптивной СУ каждым движителем АПР, реализующей синтезированный закон управления, представлена на рис. 2 [9–12]. Исследования этой СУ подтвердили ее высокую работоспособность и эффективность при различных движениях АПР.

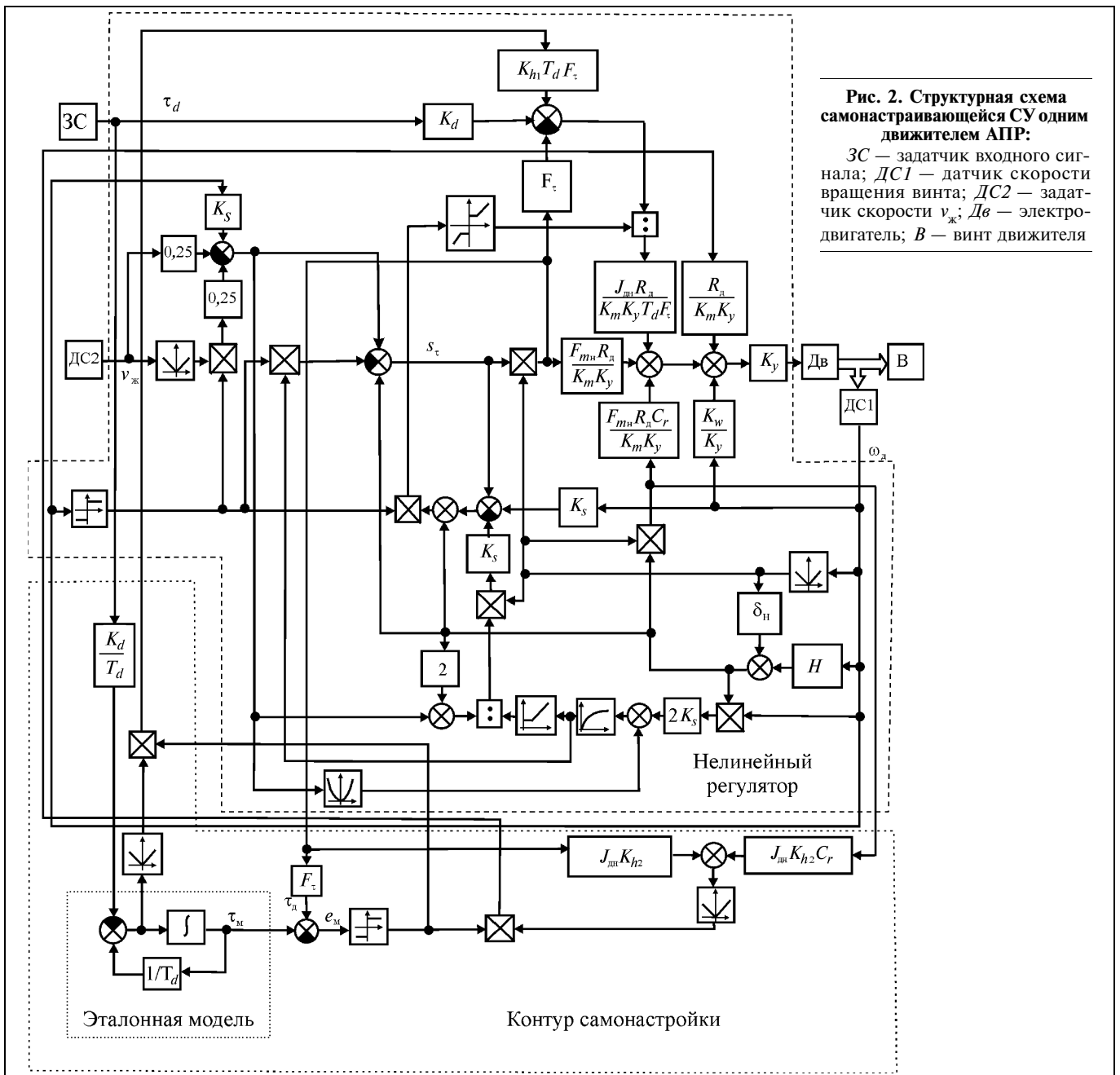
Очевидно, что описание вида (5), в соответствие с которым приводится движитель АПР с помощью первого (внутреннего) контура управления (см. рис. 1), гораздо проще описания (4). Поэтому именно описание (5) на втором этапе синтеза (это будет показано далее) позволяет получить относительно простое и качественное управление скоростью движения АПР.

Таким образом, на первом этапе синтеза удалось разработать такую СУ, которая позволяет придать каждому движителю АПР, реально имеющему сложное описание вида (4), динамические свойства простейшего звена с постоянными параметрами вида (5). После решения этой задачи можно приступить ко второму этапу — синтезу подсистемы управления скоростью движения АПР (см. средний контур на рис. 1).

### 4. СИНТЕЗ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ АПР НА ОСНОВЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим различные методы синтеза СУ скоростью движения АПР на основе локальных децентрализованных систем (2), соответствующих всем шести степеням свободы АПР.

Методы синтеза системы децентрализованного управления скоростью движения по каждой степени свободы АПР будут разрабатываться с учетом того, что после введения внутренних контуров управления движителями они описываются уравнениями вида (5) с постоянными параметрами. При этом полная СУ скоростью движения АПР представляется в виде совокупности локальных подсистем управления по каждой отдельной СС (без



**Рис. 2. Структурная схема самонастраивающейся СУ одним двигателем АПР:**

ЗС — задатчик входного сигнала; ДС1 — датчик скорости вращения винта; ДС2 — задатчик скорости  $v_ж$ ; Дв — электродвигатель; В — винт двигателя

какого-либо упрощения или пренебрежения реально существующими силами и моментами, действующими на АПР в процессе его перемещения в вязкой среде). Как показали результаты исследований, для разработки методов синтеза регуляторов для локальных подсистем управления скоростями движения АПР по каждой СС можно использовать обобщенные подходы построения систем с переменной структурой (СПС), работающих в скользящем режиме, и систем с эталонными моделями, настраиваемыми в соответствии с методом Ляпунова. Вначале рассмотрим методы синтеза СПС.

Отметим, что в отличие от известных методов вновь созданные методы позволяют синтезировать не только робастные, но и адаптивные системы, обладающие повышенной скоростью обнуления ошибок управления в пределах заданной мощности исполнительных элементов. При этом для синтеза регуляторов в качестве исходной математической модели объекта управления в каждом контуре управления скоростью движения АПР используются уравнения вида (3) и (5). Подчеркнем, что в дальнейшем при исследовании полного пространственного движения АПР по сложным траекториям все подсистемы, синтезированные для каждой от-

дельной СС, будут объединены в одну глобальную СУ, которая в итоге и будет обеспечивать заданную динамическую точность управления роботом.

Для повышения быстродействия синтезируемых СПС был применен подход, согласно которому на основе косвенной оценки удалось непрерывно подстраивать расположение зоны высокочастотных переключений структуры регуляторов без непосредственного измерения трудно идентифицируемых и непрерывно изменяющихся параметров АПР [13—18]. Был разработан новый закон изменения структуры, позволяющий сохранять самонастройку режима высокочастотных переключений и для вынужденного движения объекта управления с учетом влияния окружающей вязкой среды [19, 20], а также были определены параметры зоны этих переключений и доказаны условия возникновения, существования и устойчивости режима переключений при любом значении входного сигнала и изменяющихся параметрах АПР. Указанный закон гарантирует качественную работу самонастраивающейся СУ только в том случае, когда на ее вход поступает ступенчато изменяющийся сигнал. На сам же деле в процессе движения АПР этот сигнал изменяется произвольно и непрерывно. Поэтому в работе [21] был предложен метод и получено аналитическое выражение для расчета размера шага квантования непрерывного входного сигнала, которые, с одной стороны, сохраняют синтезированный алгоритм самонастройки регулятора, а с другой — обеспечивают достаточно высокую точность аппроксимации непрерывного входного сигнала. Для реализации указанной аппроксимации было разработано специальное устройство, преобразующее непрерывные функции в последовательность ступенчатых сигналов с настраиваемым шагом квантования. В результате применения разработанных самонастраивающихся регуляторов динамика всех локальных подсистем управления скоростями движения АПР при их работе в режиме высокочастотных переключений в задаваемой малой зоне этих переключений уже может быть описана линейным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{v} + Cv = Cv_d, \quad (6)$$

где  $C$  — переменный положительный коэффициент. В результате свойства этих подсистем становятся зависимыми только от значений коэффициента  $C$  и практически не зависят от переменных параметров АПР. Уравнение (6) на следующем этапе проектирования обобщенной (иерархической) СУ будет использоваться в качестве описания динамического объекта для синтезируемой подсистемы управления пространственным движением АПР.

Как показали результаты математического моделирования, при различных законах изменения скоростей движения АПР системы управления, синтезированные на основе предложенного подхода, обеспечивают непрерывную и высококачественную самонастройку параметров зоны высокочастотных переключений и тем самым гарантируют высокую скорость обнуления ошибки (высокую динамическую точность) управления скоростью движения АПР при любых его параметрах и любой форме задающего сигнала скорости. Законы изменения ошибки при отработке ступенчатых входных сигналов скорости по одной из степеней свободы АПР при различных значениях его параметров приведены на рис. 3. Кривые 1 и 3 соответствуют наименее нагруженному, а кривые 2 и 4 — наиболее нагруженному режиму движения АПР. Видно, что для типовых СПС (кривые 3 и 4) независимо от параметров АПР время переходного процесса системы остается практически постоянным (даже в тех случаях, когда параметры АПР допускают увеличение быстродействия). Самонастраивающиеся СПС позволяют почти в полтора раза увеличить быстродействие системы в благоприятных режимах работы робота (см. кривую 1).

Высокоточные адаптивные локальные подсистемы управления скоростями движения по отдельным степеням свободы АПР можно синтезировать и на основе метода, в соответствии с которым предусматривается применение эталонных моделей и сигнальной самонастройки [22]. В системах управления, синтезированных на основе этого метода, обеспечивается компенсация динамического взаимовлияния движений по всем степеням свободы АПР, а также воздействий внешней среды.

Синтез адаптивных регуляторов по данному методу выполняется также в два этапа. На первом этапе благодаря нелинейной коррекции нелинейному объекту придаются желаемые динамические свойства простого линейного звена с постоянными

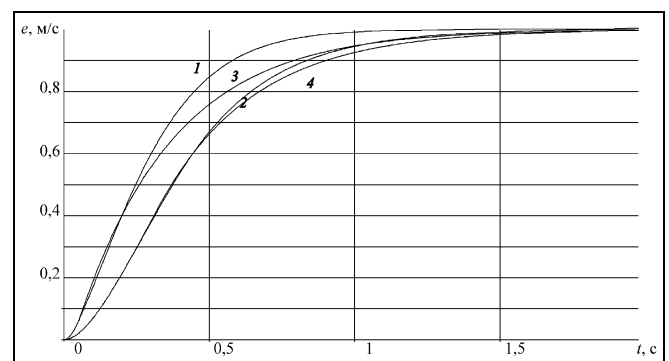
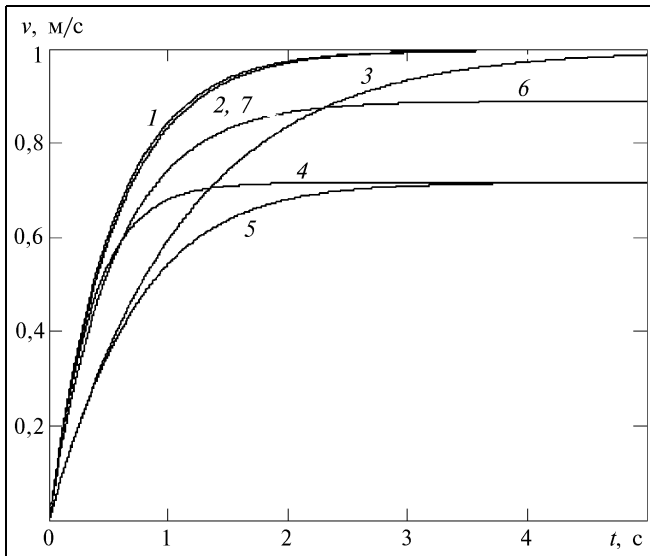


Рис. 3. Ошибка по скорости движения АПР при отработке ступенчатого сигнала:

1 и 2 — случай синтезированной самонастраивающейся СПС; 3 и 4 — случай традиционной СПС



**Рис. 4. Переходные процессы в адаптивной локальной подсистеме управления скоростью движения по одной линейной степени свободы АПР:**

1 — желаемый процесс изменения скорости АПР; 2—6 — процессы в системе с нелинейной коррекцией без самонастройки при различных значениях параметров АПР; 7 — процесс в системе с самонастройкой по эталонной модели при любых параметрах АПР из заданного диапазона

ми параметрами. На втором этапе с помощью адаптивной сигнальной самонастройки по эталонной модели осуществляется компенсация вариаций всех параметров и внешних воздействий. Преимущество такого подхода, наряду с упрощением процедуры синтеза, состоит в значительном уменьшении амплитуды разрывной составляющей сигнала управления по сравнению с системой без предварительной нелинейной коррекции, поскольку в данном случае происходит настройка лишь по отклонениям параметров, а не по их абсолютным значениям. При этом исключается возможность входа усилительных и исполнительных элементов АПР в зону насыщения.

В результате применение указанных двухуровневых адаптивных СУ с эталонными моделями позволяет каждый внутренний контур скорости движения АПР (так же, как и в системах с адаптивными СПС) с достаточной степенью точности представить в виде апериодического звена первого порядка с постоянными желаемыми параметрами [23].

На рис. 4 показаны переходные процессы в локальной адаптивной подсистеме управления скоростью движения по одной линейной степени свободы АПР. Видно, что двухуровневая адаптивная СУ обеспечивает точное придание существенно нелинейному ДО желаемых свойств линейной эталонной модели (см. кривые 1 и 7).

Однако, когда взаимовлияние между степенями свободы АПР очень велико, децентрализованные

СУ, построенные с помощью метода декомпозиции, могут оказаться недостаточно точными. В этом случае следует применять многоканальные централизованные СУ скоростью движения АПР, способные обеспечить требуемую точность управления в указанных условиях. При этом следует воспользоваться наиболее общей моделью АПР вида (1).

## 5. СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ АПР НА ОСНОВЕ ИХ ПОЛНЫХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрим два метода синтеза, предполагающие применение СПС и эталонных моделей. Вначале решим задачу синтеза подсистемы управления скоростью движения АПР на основе разрывных сигналов управления и полной динамической модели (1). При этом в каждом канале управления АПР реализуем скользящий режим, обеспечивающий инвариантность синтезируемой подсистемы к изменениям параметров АПР, обусловленным взаимовлияниями между всеми шестью каналами управления, а также к внешним воздействиям со стороны окружающей вязкой среды. В процессе синтеза также будем полагать, что движительный комплекс после введения соответствующей коррекции (о ней говорилось выше) будет описываться дифференциальным уравнением с постоянными параметрами вида (5).

Существование согласованных скользящих режимов по каждой из шести степеней свободы АПР при любых текущих значениях их параметров и наличии взаимовлияний между этими СС обеспечивается путем надлежащего выбора и подстройки параметров переключающих устройств. При этом в условиях ограниченной мощности двигателей локальных подсистем управления АПР не допускается запаздывания режима скольжения в каком-либо канале управления, которое приводит к сходу АПР с программной траектории движения. Законы определения параметров переключающих устройств и синтезированная централизованная подсистема управления скоростью движения робота детально описаны в работах [24—26].

Переходные процессы в режимах скольжения при отработке ступенчатых воздействий во всех шести каналах синтезированной централизованной СПС показаны на рис. 5. Видно, что применение централизованной многоканальной СПС, учитывающей полное взаимовлияние между всеми степенями свободы АПР в процессе его движения, позволяет гарантировать монотонный характер переходных процессов и высокое быстродействие во всех каналах управления при любых (в заданном диапазоне робота) параметрах, а также полную динамическую “развязку” этих каналов.

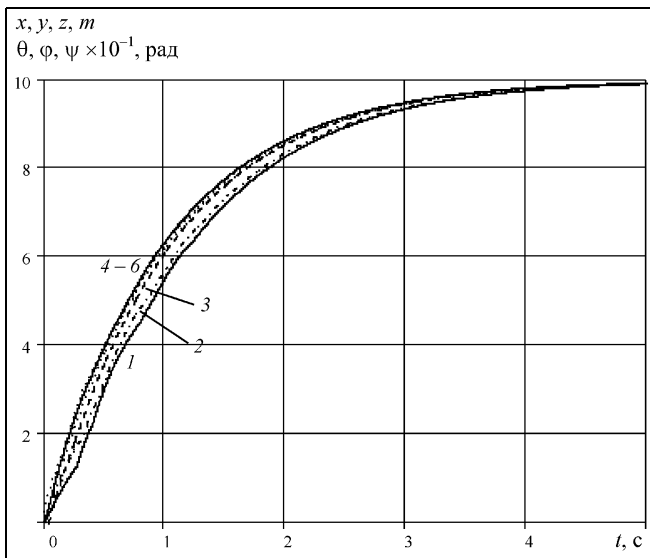


Рис. 5. Переходные процессы во всех каналах синтезированной централизованной СПС

Высокая точность работы среднего контура управления скоростью движения АПР, когда любые отклонения его параметров от номинальных значений не превышают 100 %, может быть получена и с помощью централизованной СУ, построенной с использованием сигнальной самонастройки и шестимерной эталонной модели [27–29]. При разработке метода синтеза этой многомерной СУ предполагается, что инерционность скорректированных (на основе рассмотренных выше методов) движителей по сравнению с инерционностью корпуса самого АПР пренебрежимо мала. Это допущение справедливо во многих случаях.

При синтезе централизованной подсистемы управления скоростью движения АПР требуется сформировать такой закон  $\mathbf{u}_v$  управления всеми его каналами ( $\mathbf{u}_v = \mathbf{u}_v(t) \in R^6$  — вектор сигналов, вырабатываемых самонастраивающимся регулятором контура скорости), чтобы по завершении процесса самонастройки поведение многомерного нелинейного нестационарного объекта, описываемого матричным уравнением (1), при любых значениях его параметров и возмущающих воздействиях (из заданных диапазонов) определялось желаемым линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами вида

$$\dot{\mathbf{v}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{v}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{v}_d, \quad (7)$$

где  $\mathbf{A}_M \in R^{6 \times 6}$  — отрицательно определенная постоянная матрица,  $\mathbf{B}_M \in R^{6 \times 6}$  — постоянная матрица задающих сигналов,  $\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_d(t) \in R^6$  — вектор задающих сигналов по скорости движения АПР.

Для этого должно выполняться предельное соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_v(t)\| = 0,$$

где  $\mathbf{e}_v(t) = \mathbf{v} - \mathbf{v}_M \in R^6$  — вектор ошибки по скорости движения АПР относительно модели,  $\mathbf{v}_M = \mathbf{v}_M(t) \in R^6$  — вектор желаемого значения скорости движения АПР.

Обобщенная структурная схема самонастраивающейся СУ с синтезированным законом управления вектором скорости движения АПР [27, 29] изображена на рис. 6. Здесь матрицы условно представлены в виде единых блоков, а векторы — в виде одного сигнала. Как показали результаты математического моделирования, СУ с сигнальной самонастройкой по эталонной модели, синтезированные с помощью разработанного метода, позволяют приблизить динамические свойства АПР, описываемых сложными нелинейными и нестационарными дифференциальными уравнениями (1), к динамическим свойствам модели, описываемой линейным дифференциальным уравнением с желаемыми постоянными коэффициентами (7).

На рис. 7 показаны переходные процессы во всех шести каналах управления АПР при обработке ступенчатых входных воздействий. Здесь кривые 1–6 соответствуют изменениям компонент вектора  $\mathbf{v}$  в типовой системе без самонастройки при “наихудших” комбинациях параметров АПР и внешних воздействий. Как показывает анализ ра-

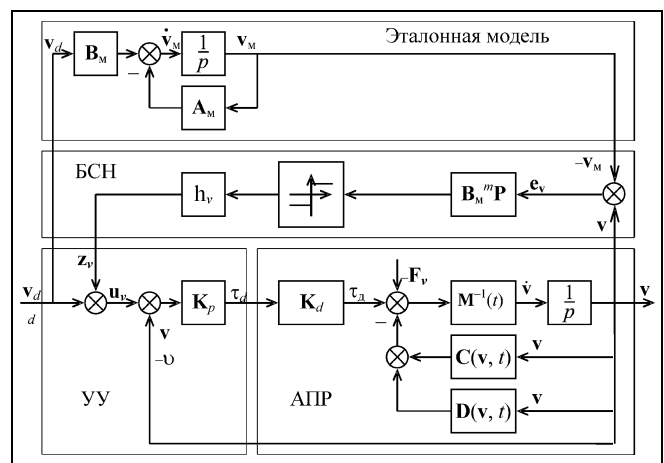
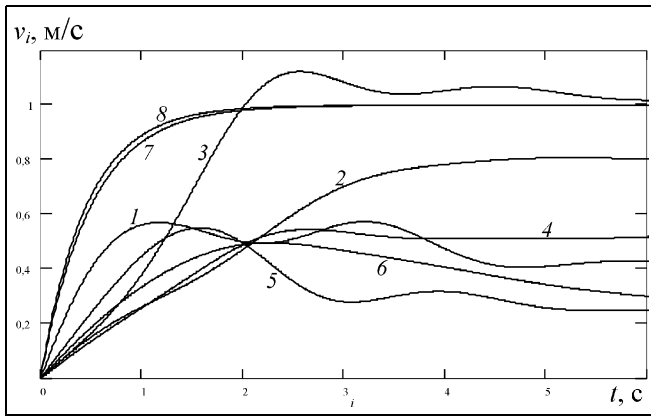


Рис. 6. Структурная схема многомерной самонастраивающейся СУ с эталонной моделью:

БСН — блок самонастройки; УУ — линейное устройство управления;  $\mathbf{z}_v = \mathbf{z}_v(t) \in R^6$  — вектор дополнительных сигналов самонастройки;  $\mathbf{h}_v, \mathbf{K}_d, \mathbf{K}_p \in R^{6 \times 6}$  — диагональные матрицы постоянных коэффициентов усиления, коэффициентов движительного комплекса и коэффициентов линейного регулятора скорости, соответственно;  $\mathbf{P} \in R^{6 \times 6}$  — симметрическая и положительно определенная матрица коэффициентов усиления





**Рис. 7. Переходные процессы в системе управления скоростью движения АПР при ступенчатых входных воздействиях:**  
 1–6 — в типовой системе; 7 — в эталонной модели; 8 — при введении самонастройки по эталонной модели

боты такой СУ, при наличии взаимовлияния между всеми степенями свободы АПР и внешнего возмущения она далека от эталонной модели (7) (см. кривую 7). В этой СУ имеют место даже статические ошибки и почти втрое по сравнению с эталонной моделью увеличивается время переходного процесса. При введении самонастройки по эталонной модели достигается практически полное совпадение переходных процессов во всех каналах управления (кривая 8) с желаемым процессом (кривая 7) при любых значениях параметров АПР и при  $F_v \neq 0$ .

Синтезируемые централизованные СУ гораздо сложнее децентрализованных сепаратных систем. Поэтому их целесообразно применять только для управления АПР с сильными взаимовлияниями между СС, предназначенными для быстрых перемещений по сложным пространственным траекториям.

Таким образом, различные СУ скоростями движения АПР, синтезированные на основе предложенных методов, позволяют придать контурам управления желаемые динамические свойства, описываемые линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

**6. СИНТЕЗ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ И ОРИЕНТАЦИЕЙ АПР**

Согласно определенному ранее порядку синтеза глобальной системы управления АПР на данном этапе будет разработан внешний контур СУ его пространственным перемещением. Эта система должна придать роботу желаемые динамические свойства и обеспечить высокую результирующую динамическую точность при его движении по произвольным траекториям. В качестве объекта управления здесь рассматривается уже синтезиро-

ванный на предыдущих этапах контур управления скоростью движения АПР. Поведение контура скорости в целом (с учетом применения в каждой подсистеме разработанных выше управляющих устройств с переменной структурой или с эталонной моделью) может быть описано следующим матричным дифференциальным уравнением

$$\dot{v} = \dot{v}_d + K_v(v_d - v), \tag{8}$$

где  $K_v \in R^{6 \times 6}$  — диагональная матрица постоянных коэффициентов.

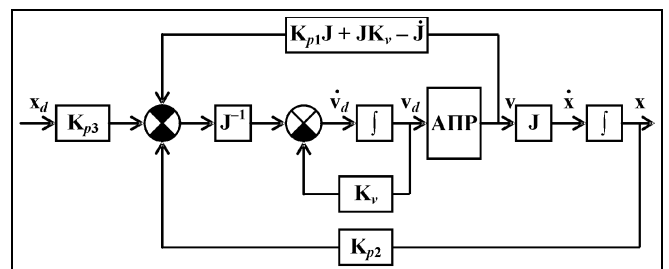
С помощью метода, подробно описанного в работах [30, 31] и с учетом выражения (8) был получен закон формирования выходного сигнала внешнего контура управления в виде

$$\begin{aligned} \dot{v}_d = & -K_v v_d + J^{-1}(K_{p3}x_d - K_{p2}x - \\ & - (J + K_{p1}J - JK_v)v), \end{aligned} \tag{9}$$

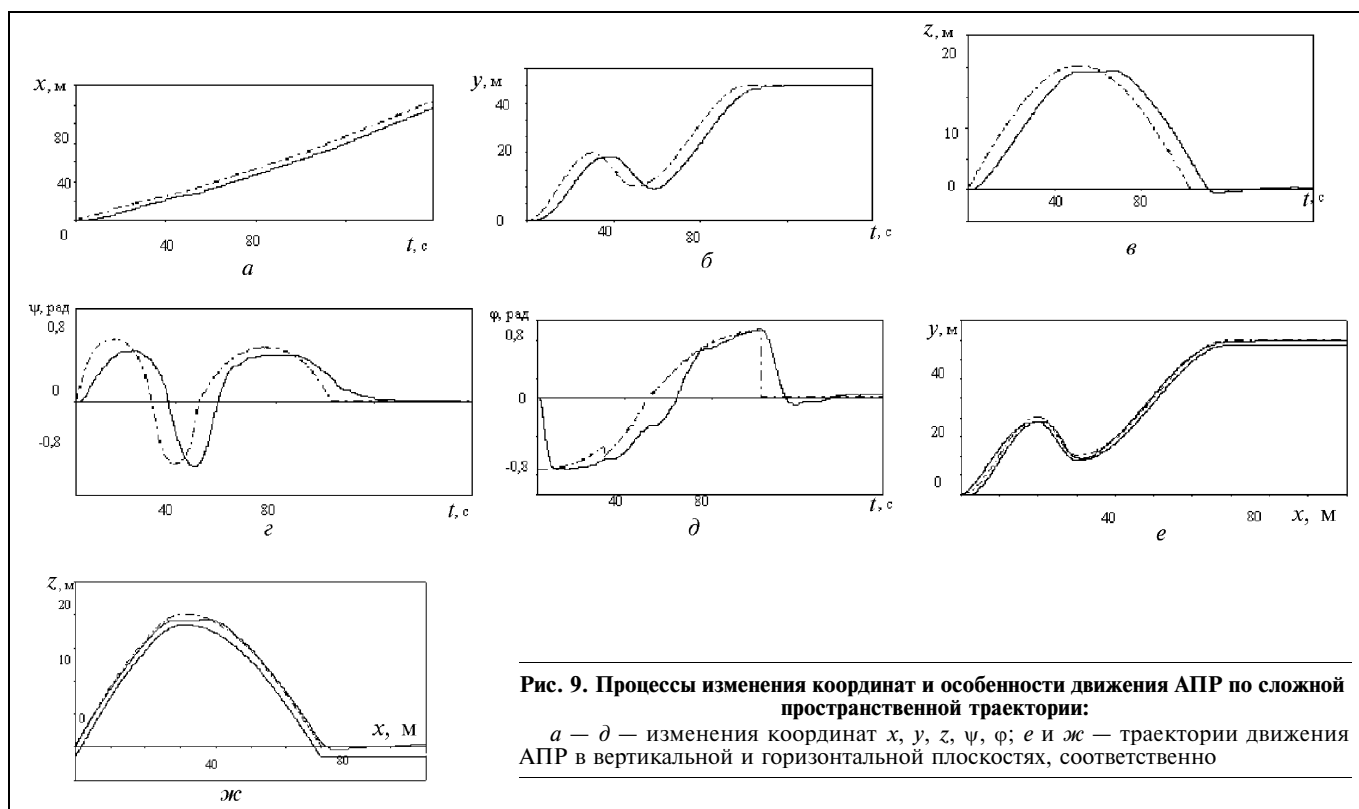
где  $K_{p1}, K_{p2}, K_{p3} \in R^{6 \times 6}$  — диагональные матрицы коэффициентов, надлежащий выбор которых позволяет обеспечить заданное качество управления АПР.

Очевидно, что для реализации закона управления (9) необходимо постоянно вычислять элементы матриц  $J^{-1}$  и  $J$ , являющиеся сложными тригонометрическими выражениями (функциями), непрерывно изменяющимися в зависимости от текущих значений угловых координат АПР. Для исключения трудоемких вычислений элементов этих матриц были выведены аналитические зависимости, которые затем использовались при реализации синтезированной СУ пространственным движением робота.

Структурная схема этой СУ представлена на рис. 8. Ее исследование (с учетом синтезированных подсистем внутренних контуров) при движении АПР по сложной пространственной траектории с одновременным изменением линейных и угловых координат проводилось на основе полной математической модели (1), (2), учитывающей все взаимовлияния между всеми СС и внешние воз-



**Рис. 8. Структурная схема СУ положением и ориентацией АПР в пространстве**



действия. Результаты этого исследования представлены на рис. 9. Здесь сплошной линией показаны движения АПР, а штриховой — программные значения соответствующих координат. На графиках *e* и *ж* самая нижняя сплошная линия соответствует профилю поверхности, огибаемой АПР в соответствующей плоскости.

Результаты исследований показали, что даже при большой скорости движения АПР по сложной траектории (до 1,5 м/с), когда сильны эффекты взаимовлияния между его СС, синтезированная многоконтурная СУ обеспечивает высокую динамическую точность управления. Робот отслеживает траекторию с некоторым запаздыванием (см. рис. 9, *б*, *в*, *г* и *д*), но его максимальные отклонения от этой траектории не превышают 0,6 м.

Таким образом, синтезированная многоконтурная СУ пространственным движением АПР позволяет обеспечить высокое качество как в режиме терминального управления, так и в режиме его движения с большими скоростями по сложным траекториям.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье укрупненно рассмотрены основные особенности проектирования высококачественных СУ пространственным перемещением АПР, описываемых дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. Это про-

ектирование может осуществляться на основе различных подходов, методов и алгоритмов. Однако основным свойством синтезируемых СУ остается неизменно высокая динамическая точность управления роботами в условиях значительных и часто непредсказуемых изменений их параметров и воздействий со стороны окружающей вязкой среды в процессе быстрых движений по сложным пространственным траекториям. Результаты выполненных исследований полностью подтвердили указанные свойства всех синтезированных систем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пантов Е. Н., Махин Н. Н., Шереметов Б. Б. Основы теории движения подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1973. — 216 с.
2. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами. — М.: Круглый год, 2001. — 288 с.
3. Лукомский Ю. А., Чугунов В. С. Системы управления морскими подвижными объектами. — Л.: Судостроение, 1988. — 271 с.
4. Пятницкий Е. С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции // Автоматика и телемеханика. — 1989. — № 1. — С. 87—98; № 2. — С. 57—71.
5. Агеев М. Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА // Подводные роботы и их системы. — Владивосток, 1995. — С. 33—49.
6. Филаретов В. Ф. Синтез самонастраивающихся систем управления электроприводами манипуляционных механиз-



- мов // Изв. вузов. Приборостроение. — 1989. — № 12. — С. 24—28.
7. *Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А.* Синтез и исследование самонастраивающейся системы управления движителями подводного аппарата // Изв. вузов. Электромеханика. — 2000. — № 4. — С. 60—64.
  8. *Filaretov V. F., Lebedev A. V., Dyda A. A.* The Underwater Robot Thruster Control System with Non-Linear Correction and Reference Model Self-Adjustment // CD-ROM Proc. of the European Control Conf. — Karlsruhe, Germany, 1999. — F-0098. — P. 1—4.
  9. *Пат. 2147001 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, А. А. Дыда // Бюл. — 2000. — № 9.
  10. *Пат. 2147985 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец // Там же. — № 12.
  11. *Пат. 2191106 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев // Там же. — 2002. — № 29.
  12. *Пат. 2209718 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец, А. В. Лебедев // Там же. — 2003. — № 22.
  13. *Дыда А. А., Лебедев А. В., Филаретов В. Ф.* Синтез системы с переменной структурой для управления движением подводного робота // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2000. — № 1. — С. 155—162.
  14. *Пат. 2215318 РФ.* Устройство для управления подводным роботом / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец // Бюл. — 2003. — № 30.
  15. *Dyda A. A., Filaretov V. F.* Algorithm of Time-Sub-Optimal Control for Robots Manipulator Drives // Proc. of the 12-th World IFAC Congress. — Sydney, Australia, 1993. — P. 314—319.
  16. *Filaretov V. F., Lebedev A. V., Dyda A. A.* The Sliding Mode Adaptive Control System for Autonomous Underwater Robot // Proc. of the 7-th Int. Conf. on Advanced Robotics. — Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain, 1995. — Vol. 1. — P. 263—266.
  17. *Filaretov V. F., Lebedev A. V.* The Variable Structure System Synthesis for Autonomous Underwater Robot // Proc. of the 4-th ECPD Int. Conf. on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems. — Moscow, Russia, 1998. — P. 417—421.
  18. *Lebedev A. V., Filaretov V. F.* The Analysis of Variable Structure System with the Non-Ideal Switching Device // Proc. of the second IASTED Intern. Conf. on Automation, Control and Applications. — Novosibirsk, Russia, 2005. — P. 420—424.
  19. *Filaretov V. F., Ukhimets D. A.* Synthesis of Underwater Robots Adaptive Velocity Control System // Proc. of the 8-th IFAC Symp. on Computer Aided Control System Design. — Selford, UK, 2000. — P. 502—506.
  20. *Filaretov V. F., Ukhimets D. A.* Adaptive Control System with Variable Structure for Underwater Robot // Proc. of the 12th DAAAM Symp. on Intelligent Automation and Manufacturing. — Jena, Germany, 2001. — P. 141—144.
  21. *Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.* Выбор величины шага квантования непрерывного задающего сигнала в самонастраивающейся системе с переменной структурой второго порядка // Сб. трудов ДВО РАН. — Владивосток, 2002. — Вып. 6. — С. 28—44.
  22. *Филаретов В. Ф., Лебедев А. В.* Децентрализованное адаптивное управление скоростью движения подводного робота // Мехатроника. — 2000. — № 6. — С. 35—39.
  23. *Пат. 2230654 РФ.* Устройство для управления подводным роботом / А. В. Лебедев, В. Ф. Филаретов // Бюл. — 2004. — № 17.
  24. *Лебедев А. В., Филаретов В. Ф.* Синтез многоканальной системы с переменной структурой для управления пространственным движением подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2005. — № 3. — С. 18—26.
  25. *Filaretov V. F., Lebedev A. V.* The Synthesis of Multivariate System with Variable Structure and Nonlinear Correction for Control of the Underwater Vehicle Movement // Proc. of the Sixth Intern. Scientific Forum AIMS for Future of Engineering Science. — Hong Kong, China, 2005. — P. 118—123.
  26. *Lebedev A. V., Filaretov V. F.* The Synthesis of Multi — Dimensional Adaptive Variable Structure System for Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the Sixth ISOPE PACOMS. — Vladivostok, 2004. — P. 236—240.
  27. *Лебедев А. В., Филаретов В. Ф.* Синтез самонастраивающейся системы с эталонной моделью для управления скоростью пространственного движения подводного аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2002. — № 2. — С. 170—176.
  28. *Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Стаценко О. М.* Многоканальная самонастраивающаяся система централизованного управления движением подводного робота // Мехатроника. — 2001. — № 9. — С. 41—45.
  29. *Lebedev A. V., Filaretov V. F.* The Synthesis of Adaptive Control System with Reference Model for Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of IMECE 2002. ASME Int. Mechanical Engineering Congress. — New Orleans, USA, 2002. — Vol. 2. — P. 15—19.
  30. *Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.* Синтез адаптивной системы управления пространственным положением подводного робота // Мехатроника. — 2001. — № 1. — С. 21—25.
  31. *Filaretov V. F., Lebedev A. V., Ukhimets D. A.* The Development of Adaptive Control Systems of Underwater Vehicle's Spatial Motion // Proc. the Fifth Int. Scientific Forum AIMS for Future of Engineering Science. — Paris, France, 2004. — P. 211—216.

☎ (4232) 32-06-82

E-mail: [filaret@iacp.dvo.ru](mailto:filaret@iacp.dvo.ru)



## Новая книга

**Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А.** Устройства и системы управления подводных роботов / Ин-т автоматики и процессов управления ДВО РАН; отв. ред. Ю. Н. Кульчин. — М.: Наука, 2005. — 270 с.

Рассмотрены системы и устройства управления подводными роботами, предназначенные для обеспечения высокой динамической точности при их скоростном перемещении по сложным пространственным траекториям в условиях неопределенности и существенной переменности параметров. Исследуются и оцениваются различные подходы и методы, обеспечивающие инвариантность показателей качества управления к изменениям параметров объектов управления и воздействиям внешней среды.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области управления сложными многосвязными нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности, а также аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.