

На правах рукописи

Чан Ань Зунг

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ  
ОБЪЕКТАМИ С УПРУГИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Путов В.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ Лохин В.М.  
кандидат технических наук Мордовченко Д.Д.

Ведущая организация – Государственный научный центр Российской Федерации «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК)

Защита диссертации состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_2008 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Цехановский В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время задачи управления многостепенными взаимосвязанными нелинейными электромеханическими объектами с протяженной геометрией и упругими деформациями, обеспечивающие повышение эффективности функционирования мехатронных промышленных комплексов и подвижных объектов, занимают одно из передовых мест по числу применений для высокотехнологичных и прецизионных установок в промышленности. К таким мехатронным комплексам как объектам управления относятся конструкции высокоточных металлорежущих станков, экстремальных роботов-манипуляторов, быстроходных наземных и морских подвижных объектов, высокоманевренных летательных аппаратов, испытательных стендов, мобильных установок аэродромного обслуживания и т. д. При этом в условиях, когда возможности современного конструирования и применения новейших материалов с целью достижения высокой точности и высокой производительности сложных электромеханических объектов исчерпываются, дальнейшее повышение их эффективности может быть достигнуто только методами и средствами более сложного управления, и в последнее время на этом пути все чаще применяют аналитические и интеллектуальные адаптивные системы управления. Таким образом, задачи, связанные с разработкой эффективных систем автоматического управления классом объектов с многорезонансными нелинейными упругими деформациями, априорно неопределенным и сложным описанием, неполными измерениями, быстро и в широких пределах изменяющимися параметрами и внешними возмущениями, являются актуальными и решаются в данной работе в рамках беспоискового (аналитического) и интеллектуального адаптивных подходов, получивших в последнее время значительное теоретическое и теоретико-прикладное развитие в отечественной и зарубежной научно-технической литературе усилиями многих российских и зарубежных ученых, в числе которых в библиографии к диссертации названы Андриевский Б.Р., Борцов Ю.А., Буков В.Н., Бураков М.В., Вукобратович М., Ефимов Д.В., Заде Л., Земляков С.Д., Коновалов А.С., Кофман А., Лохин В.М., Макаров И.М., Манько С.В., Мирошник И.В., Никифоров В.О., Овсепян Ф.А., Петров Б.Н., Полушин И.Г., Поляхов Н.Д., Путов В.В., Рутковский В.Ю., Санковский Е.А., Солодовников В.В., Срагович В.Г., Стоцкий А.А., Терехов В.А., Тимофеев А.В., Тюкин И.Ю., Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Шпрамко Л.С., Шумский В.М., Ядыкин И.Б., Якубович В.А., Buckley J.J., Cagol R.L., Hayashi Y., Jang J.-S., Kasabov N., Kim J., Landau T.D., Lee G., Lin C.-T., Lindorff D.P., Narendra K.S., Ortega R., Slotine J., Sugeno M., Takagi T., Teshnehlab M., Valavani L.S., Watanabe K., Yager R.R.

**Цель диссертационной работы** – разработка, исследование и компьютерная реализация аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления многомассовыми подвижными объектами с упругими деформациями, обеспечивающих повышение их устойчивости, быстродействия и точности.

**В диссертационной работе ставятся и решаются следующие задачи:**

- разработать математическую модель многомассового нелинейного упругого электромеханического объекта, удобную для применения к нему беспоисковых адаптивных и интеллектуальных законов управления;
- разработать и исследовать прямые адаптивные системы с параметрической и сигнальной настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателями для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием и неполными измерениями состояния;
- разработать и исследовать нейронечеткие системы управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием и неполными измерениями;
- провести сравнительный анализ работы беспоисковых адаптивных и нейронечетких систем управления;

- разработать и отладить в режиме реального времени семейство компьютерных аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом.

**Методы исследования.** Основные теоретические и прикладные результаты работы получены в рамках применения методов теории устойчивости и диссипативности систем, основанных на функциях Ляпунова; беспоисковых методов синтеза адаптивных систем управления линейными и нелинейными динамическими объектами, базирующихся на их точных и приближенных с мажорирующими функциями математических моделях; алгебраических методов теории систем; методов нечеткой логики; методов построения и обучения нейронечеткой и нейронной сети; методов аналитической механики, уравнений Лагранжа и теории малых колебаний упругих систем; численных методов интегрирования дифференциальных уравнений; компьютерных методов исследования на базе стандартных программных продуктов; методов проектирования и экспериментального исследования макетов и микроконтроллерных опытных образцов в лабораторных условиях.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель в скоростной форме многомассового нелинейного упругого электромеханического объекта.

2. Прямые адаптивные системы управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами с параметрической и сигнальной настройкой, наблюдателями и мажорирующими функциями.

3. Метод обучения в режиме «off-line» интеллектуальных систем.

4. Построенные нейронечеткие системы с правилами TSK для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель многомассового нелинейного упругого электромеханического объекта, отличающаяся так называемой скоростной формой представления, позволяющей учесть нелинейности типа зазоров и сухого трения в разрабатываемых адаптивных системах управления с мажорирующими функциями.

2. Разработан новый класс упрощенных прямых адаптивных систем управления многомассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами с параметрической и сигнальной настройкой, отличающихся введением наблюдателей и мажорирующих функций, подавляющих влияние нелинейных упругих деформаций, сухого трения и неопределенности параметров.

3. Выдвинут и обоснован новый подход к применению нейронечетких систем в решении задач управления многомассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами и сформулирован новый метод обучения в режиме «off-line» интеллектуальных систем, отличающийся тем, что обучение осуществляется на основе аналитических алгоритмов управления.

4. Разработан и обучен новый класс нейронечетких систем управления с правилами TSK для двух- и трехмассовых нелинейных упругих электромеханических объектов в условиях неопределенности параметров, неполного измерения и действия зазоров в упругих связях и сухого трения.

**Достоверность научных и практических результатов.** Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации обуславливается корректным использованием указанных выше методов исследования, применением современных компьютерных средств и программных комплексов, а также результатами экспериментального исследования построенных в работе аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления многомассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом в лабораторных условиях.

**Практическая ценность** состоит в следующем:

- созданы полезные в инженерном проектировании простые, лаконичные, прозрач-

ные и легко поддающиеся компьютеризации методики расчета семейства реализуемых аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления электромеханическими объектами, требующие весьма ограниченного объема априорных сведений (паспортных данных исполнительных электроприводов, количества и приблизительного диапазона изменения учитываемых резонансных частот и массоинерционных параметров);

- создан метод обучения в режиме «off-line» интеллектуальных систем на основе аналитических алгоритмов, выполненных на одной из двух систем управления упругим объектом: с эталонной моделью, и с обратной связью по состоянию объекта и его производной;

- подтверждены систематическим моделированием выводы, что в силу эвристичности нейронечетких систем и их построения, приобретаемые ими адаптивные свойства в процессе обучения их с помощью аналитических систем могут превосходить адаптивные свойства самих обучающих систем, при этом нейронечеткие системы требуют при микроконтроллерной реализации меньше вычислительных ресурсов;

- разработано и отлажено на базе пакета MATLAB и платы сопряжения Advantech PCI-1711 семейство компьютерных аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления для класса двухмассовых упругих электромеханических объектов, полезных в качестве основы НИОКР и внедрения в конкретные изделия.

**Реализация результатов работы.** Теоретические положения, методики расчета и конкретные структуры семейства адаптивных и интеллектуальных систем использованы в 2 НИОКР:

- теоретические основы технологий безопасности движения подвижных объектов (2006 – 2007 г.г.). Шифр – ФИЕТ/САУ-77. Источник финансирования – федеральный бюджет;

- создание автоматизированных методов синтеза и тестирования интеллектуальных мехатронных модулей (2006 – 2008 г.г.). № гос. регистрации – 1.11.06 САУ-76. Источник финансирования – федеральный бюджет.

**Апробация работы.** Основные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на 6 международных и всероссийских научно-технических конференциях, в том числе на XVII, XVIII и XIX всероссийских науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника» (2006, 2007 и 2008 годы, г. Санкт-Петербург) и на III всероссийской науч.-техн. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление» (2006 г., г. Санкт-Петербург); на внутривузовских научно-технических конференциях в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2006, 2007 и 2008 гг.; а также на научных семинарах кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них – 5 статей (3 статьи включены в перечень изданий, рекомендованных ВАК) и 5 работ в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций. 2 статьи находятся в печати.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 95 наименований, и одного приложения. Основная часть работы изложена на 150 страницах машинописного текста. Работа содержит 84 рисунка и 9 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определена область исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, изложены основные результаты, выносимые на защиту, их теоретическая и практическая значимость, отражены сведения о реализации и апробации работы.

**В первой главе** рассматриваются две формы математических моделей описания нелинейных упругих деформаций и делается выбор в пользу так называемой «скорост-

ной» формы уравнений  $n$ -массового упругого механического объекта цепной неразветвленной структуры с зазорами  $2\delta_i$  в упругих связях (см. рис. 1), а именно:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_i &= [f_{y, i-1} - f_{yi} + b_i u_i(t)] / m_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad \dot{m}_{yi} = p_i (\omega_i - \omega_{i+1}), \quad i = \overline{1, n-1}; \\ f_{yi} &= \begin{cases} m_{yi} - p_i \delta_i, & \text{если } m_{yi} \geq p_i \delta_i; \\ 0, & \text{если } |m_{yi}| < p_i \delta_i; \\ m_{yi} + p_i \delta_i, & \text{если } m_{yi} \leq -p_i \delta_i; \end{cases} \\ m_{yi} &= p_i (q_i - q_{i+1}), \quad i = \overline{1, n-1}; \quad m_{y0} = m_{yn} = 0; \quad f_{y0} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь в качестве переменных состояния используется  $n$ -мерный вектор скоростей  $\omega = [\omega_1 \dots \omega_i \dots \omega_n]^T$  и  $n-1$ -мерный вектор восстанавливающих сил (моментов) упругих связей  $m_y = [m_{y1} \dots m_{yi} \dots m_{yn-1}]^T$ ; кроме того  $q = [q_1 \dots q_i \dots q_n]^T$  – вектор перемещений  $q_i$  обобщенных масс  $m_i$ ;  $p_i$  – коэффициент упругости  $i$ -ой упругой связи;  $u_i$  – управляющее воздействие, приложенное к  $i$ -ой массе с коэффициентом  $b_i$ ;  $f_{yi}$  – упругий момент при учете зазоров; общий порядок многомассового упругого объекта равен  $m = 2n - 1$ .

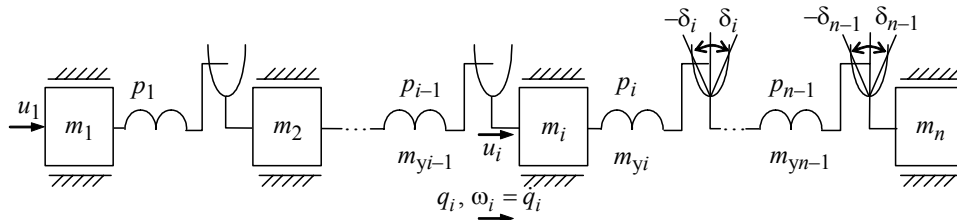


Рис. 1. Расчетная неразветвленная однолинейная цепная модель многомассового упругого механического объекта с зазорами

Формулируются задачи управления многомассовыми упругими объектами в терминах принудительного подавления упругих колебаний и достижения максимально возможного быстродействия объектов средствами управления в условиях неопределенности их параметров и действия зазоров в упругих связях и внешних возмущений. Обосновывается применение стационарных наблюдателей в реализации адаптивных систем в условиях неполной измеримости, характерных для многомассовых упругих объектов.

Составляются по «скоростной» форме с подчиненным управлением расчетные уравнения электромеханической следящей системы с двух- и трехмассовым упругими объектами (см. рисунки 2 и 3) с обратной связью по положению (углу) и с учетом зазоров в упругих связях и возмущающего момента нагрузки в виде сухого трения. На рисунках 2 и 3 обозначено: ДВ – исполнительный двигатель постоянного тока, УМ – усилитель мощности, РП – регулятор положения, РС – регулятор скорости, ДС – датчик скорости, ДП – датчик положения.

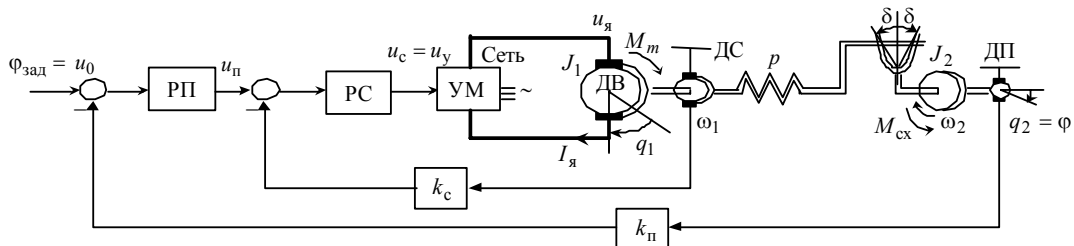


Рис. 2. Двухмассовый нелинейный упругий электромеханический объект с двухконтурным подчиненным управлением

Уравнения следящей системы с двухмассовым упругим объектом имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_2 = \omega_2; \quad \dot{\omega}_2 = J_2^{-1}(f_y - M_{сх}); \quad \dot{m}_y = p(\omega_1 - \omega_2); \\ \dot{\omega}_1 = -J_1^{-1}f_y + J_1^{-1}M_m; \quad M_m = R_{я}^{-1}k_m(k_y u_c - k_e \omega_1); \\ u_c = [(u_{\Sigma} - k_{п}q_2)\beta_{п} - k_c \omega_1]\beta_c; \quad u_{\Sigma} = u_0 + u_a; \quad u_0 = \varphi_{зад}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\varphi$  – положение (угол поворота нагрузки);  $J_1, J_2$  – моменты инерции первого и второго дисков;  $M_m$  – вращающий момент двигателя;  $R_{я}$  – активное сопротивление якорной цепи;  $k_e, k_m$  – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными данными электрической машины;  $k_y$  – коэффициент передачи усилителя мощности;  $k_c, k_{п}$  – коэффициенты передачи датчиков обратных связей по скорости и положению соответственно;  $\beta_c, \beta_{п}$  – коэффициенты усиления регуляторов скорости и положения соответственно;  $M_{сх}$  – момент сухого трения;  $u_{\Sigma}$  – суммарный управляющий сигнал;  $u_0 = \varphi_{зад}$  – задающее воздействие;  $u_a$  – сигнал управления, подлежащий определению.

В общем случае моменты инерции и коэффициент упругости являются неопределенными, поэтому рассматривается их приближение с некоторыми усредненными значениями:  $J_1 = J_{01}, J_2 = J_{02}, p = p_0$ . Положим  $a_1 = 1/J_{02}; a_2 = p_0; a_3 = -k_m k_y k_{п} \beta_c \beta_{п} / (J_{01} R_{я}); a_4 = -1/J_{01}; a_5 = -k_m (k_e + k_c k_y \beta_c) / (J_{01} R_{я}); b = k_m k_y \beta_c \beta_{п} / (J_{01} R_{я})$ , тогда уравнения линеаризованного объекта (2) имеют следующий векторно-матричный вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u_{\Sigma}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x}; \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 \\ a_3 & 0 & a_4 & a_5 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega_2 \\ m_y \\ \omega_1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния линеаризованного объекта;  $\mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x}$  – уравнение измерения;  $c = k_c$  (здесь доступной измерению с помощью датчика скорости ДС считается первая скорость  $\omega_1$ ).

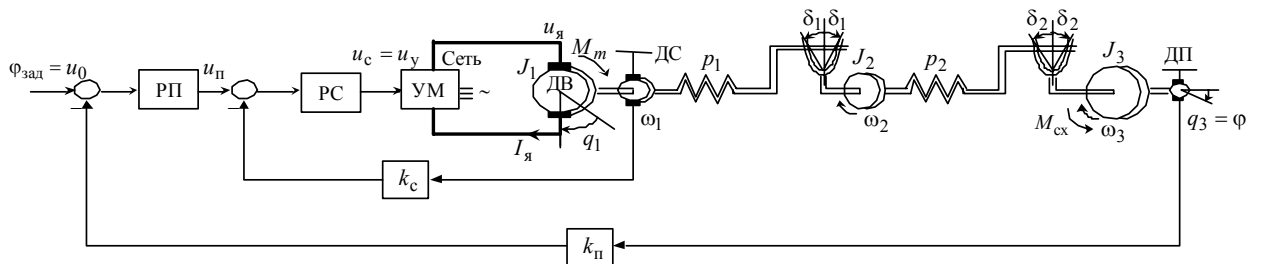


Рис. 3. Трехмассовый нелинейный упругий электромеханический объект с двухконтурным подчиненным управлением

Уравнения следящей системы с трехмассовым упругим электромеханическим объектом имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_3 = \omega_3; \quad \dot{\omega}_3 = J_3^{-1}(f_{y2} - M_{сх}); \quad \dot{m}_{y2} = p_2(\omega_2 - \omega_3); \\ \dot{\omega}_2 = J_2^{-1}(f_{y1} - f_{y2}); \quad \dot{m}_{y1} = p_1(\omega_1 - \omega_2); \quad \dot{\omega}_1 = -J_1^{-1}f_{y1} + J_1^{-1}M_m; \\ M_m = R_{я}^{-1}k_m(k_y u_c - k_e \omega_1); \quad u_c = [(u_{\Sigma} - k_{п}q_3)\beta_{п} - k_c \omega_1]\beta_c; \\ u_{\Sigma} = u_0 + u_a; \quad u_0 = \varphi_{зад}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рассматривая приближение моментов инерции и коэффициентов упругости с некоторыми усредненными значениями:  $J_1 = J_{01}$ ,  $J_2 = J_{02}$ ,  $J_3 = J_{03}$ ;  $p_1 = p_{01}$ ;  $p_2 = p_{02}$  и полагая  $a_1 = 1/J_{03}$ ;  $a_2 = p_{02}$ ;  $a_3 = 1/J_{02}$ ;  $a_4 = p_{01}$ ;  $a_5 = -k_m k_y k_{\Pi} \beta_c \beta_{\Pi} / (J_{01} R_{\text{я}})$ ;  $a_6 = -1/J_{01}$ ;  $a_7 = -k_m (k_e + k_c k_y \beta_c) / (J_{01} R_{\text{я}})$ ;  $b = k_m k_y \beta_c \beta_{\Pi} / (J_{01} R_{\text{я}})$ , можно записать уравнения линеаризованного трехмассового объекта (4) в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u_{\Sigma}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & a_4 \\ a_5 & 0 & 0 & 0 & a_6 & a_7 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega_3 \\ m_{y2} \\ \omega_2 \\ m_{y1} \\ \omega_1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Примем линейные системы (3), (5) в качестве исходных расчетных моделей упругих электромеханических объектов с усредненными параметрами для дальнейших построений адаптивных (аналитических и интеллектуальных) структур управления.

**Вторая глава** посвящена разработке беспоисковых прямых адаптивных систем управления рассмотренными в первой главе двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами на основе упрощенных прямых адаптивных структур с параметрической и сигнальной настройкой, базирующихся на методе мажорирующих функций и включающих мажорирующие функции только старших степеней роста, одинаковых по каждой из переменных состояния объектов.

На основе полученных расчетных линейных моделей с усредненными параметрами составляются методики расчета модального управления, эталонной модели и наблюдателя состояния (по измерению угловой скорости электропривода) для двух- и трехмассового упругих электромеханических объектов. Эти структуры используются в дальнейших построениях аналитических и интеллектуальных адаптивных систем.

Модальный регулятор для линеаризованного объекта имеет вид

$$u_{\text{л}} = \mathbf{k}\mathbf{x}, \quad (6)$$

где  $u_{\text{л}}$  – модальное управление;  $\mathbf{k}$  – вектор коэффициентов обратных связей по переменным состояния, рассчитываемых из условия обеспечения заданного желаемого распределения корней характеристического уравнения замкнутой системы.

В качестве эталонной модели выбирается замкнутая система линеаризованного объекта с модальным управлением вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{\text{М}} &= \mathbf{A}_{\text{М}}\mathbf{x}_{\text{М}} + \mathbf{b}_{\text{М}}u_0; \\ \mathbf{A}_{\text{М}} &= \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{k}; \quad \mathbf{b}_{\text{М}} = \mathbf{b}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\mathbf{x}_{\text{М}}$  – вектор переменных состояния эталонной модели.

Наблюдатель линеаризованного объекта по измерению первой скорости имеет вид

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{l}\mathbf{c}^T(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) + \mathbf{b}u_{\Sigma}, \quad (8)$$

где  $\hat{\mathbf{x}}$  – вектор оценок переменных состояния;  $\mathbf{l}$  – вектор коэффициентов обратных связей наблюдателя. Эти коэффициенты должны обеспечить заданное желаемое распределение корней характеристического уравнения наблюдателя, замкнутого по ошибке наблюдения.

На базе полученных структур строятся следующие беспоисковые адаптивные системы.

**1. Прямая адаптивная система с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом**



**ханическим объектом.** Она состоит из эталонной модели (7), наблюдателя (8) и адаптивного закона вида

$$u_a(t) = \mathbf{k}_A(t) \mathbf{diag}\{1, f_p(\hat{\omega}_2), f_p(\hat{m}_y), 1\} \hat{\mathbf{x}} + k_b(t) u_0(t), \quad (9)$$

где  $f_p(\hat{\omega}_2), f_p(\hat{m}_y)$  – мажорирующие функции, которые ориентированы на подавление влияния зазора и сухого трения и имеют вид степенных функций

$$f_p(\hat{\omega}_2) = \hat{\omega}_2^p; \quad f_p(\hat{m}_y) = \hat{m}_y^p; \quad p = 1, 3, 5, \dots \quad (10)$$

$\mathbf{k}_A(t), k_b(t)$  – вектор и скаляр настраиваемых коэффициентов, определяемые по дифференциальным уравнениям вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_A(t) &= -\gamma_a \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{x}} \mathbf{diag}\{1, f_p(\hat{\omega}_2), f_p(\hat{m}_y), 1\} - \lambda_a \mathbf{k}_A(t); \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{x}} u_0(t) - \lambda_b k_b(t), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_M$  – вектор ошибок;  $\gamma_a, \lambda_a, \gamma_b, \lambda_b$  – положительные коэффициенты усиления настроек;  $\mathbf{P}$  – симметричная и положительно определенная матрица, удовлетворяющая уравнению Ляпунова вида

$$\mathbf{A}_M^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_M = -\mathbf{G}, \quad \mathbf{G} = \mathbf{G}^T > 0. \quad (12)$$

Структурная схема построенной в этом пункте беспойсковой адаптивной системы показана на рис. 4.

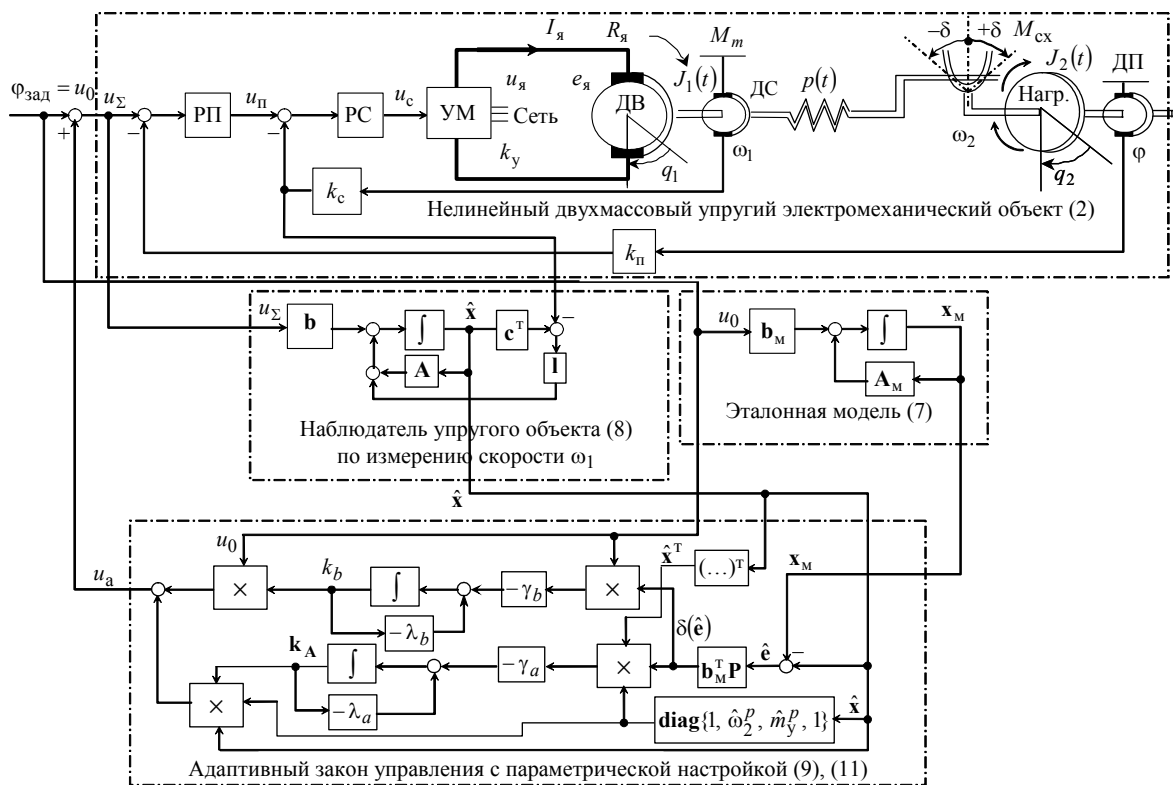


Рис. 4. Прямая адаптивная система с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с наблюдателем

**2. Прямая адаптивная система с сигнальной настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом.** Она состоит из эталонной модели (7), наблюдателя (8) и релейного закона управления вида

$$u_a(t) = -[h_0 + h_1 f_p(\hat{\omega}_2) + h_2 f_p(\hat{m}_y)] \text{sign}(\mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}}), \quad (13)$$

где  $h_0, h_1, h_2$  – положительные коэффициенты усиления алгоритма.

**3. Прямая адаптивная система с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления трехмассовым упругим электромеханическим объектом.** Она состоит из эталонной модели (7), наблюдателя (8) и закона адаптивного управления вида

$$u_a(t) = \mathbf{k}_A(t) \text{diag}\{1, f_p(\hat{\omega}_3), f_p(\hat{m}_{y2}), 1, f_p(\hat{m}_{y1}), 1\} \hat{\mathbf{x}} + k_b(t) u_0(t), \quad (14)$$

где  $f_p(\hat{\omega}_3), f_p(\hat{m}_{y2}), f_p(\hat{m}_{y1})$  – мажорирующие функции, которые ориентированы на подавление влияния зазоров в двух упругих связях и сухого трения и имеют вид степенных функций

$$f_p(\hat{\omega}_3) = \hat{\omega}_3^p; \quad f_p(\hat{m}_{y2}) = \hat{m}_{y2}^p; \quad f_p(\hat{m}_{y1}) = \hat{m}_{y1}^p; \quad p = 1, 3, 5, \dots \quad (15)$$

$\mathbf{k}_A(t), k_b(t)$  – вектор и скаляр настраиваемых коэффициентов, определяемые по дифференциальным уравнениям вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_A(t) &= -\gamma_a \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}} \text{diag}\{1, f_p(\hat{\omega}_3), f_p(\hat{m}_{y2}), 1, f_p(\hat{m}_{y1}), 1\} - \lambda_a \mathbf{k}_A(t); \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}} u_0(t) - \lambda_b k_b(t). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Структурная схема построенной в этом пункте беспойсковой адаптивной системы показана на рис. 5.

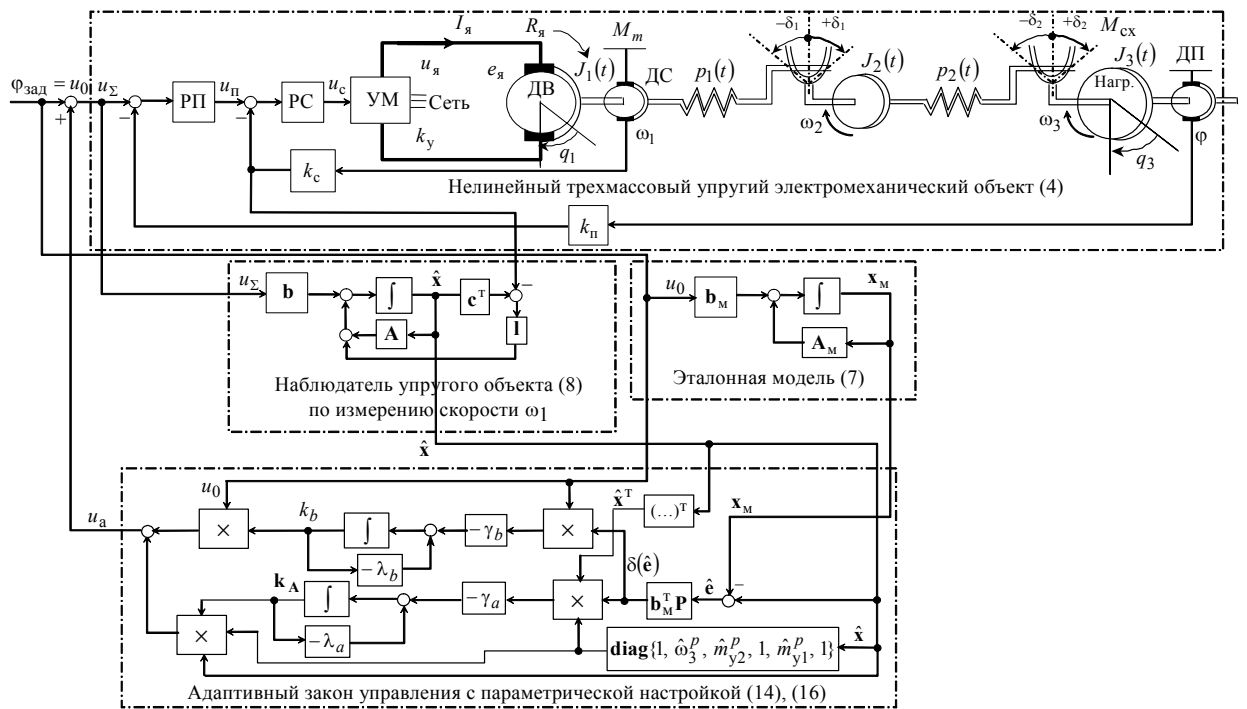


Рис. 5. Прямая адаптивная система с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для управления трехмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с наблюдателем

**4. Прямая адаптивная система с сигнальной настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления трехмассовым упругим электромеханическим объектом.** Она содержит эталонную модель (7), наблюдатель (8) и релейный закон адаптации вида

$$u_a(t) = -[h_0 + h_1 f_p(\hat{\omega}_3) + h_2 f_p(\hat{m}_{y2}) + h_3 f_p(\hat{m}_{y1})] \text{sign}(\mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}}), \quad (17)$$

где  $h_0, h_1, h_2, h_3$  – положительные коэффициенты усиления алгоритма.

В среде MATLAB – SIMULINK строятся программы моделирования построенных адаптивных систем и приводятся результаты исследования их эффективности в решении задач управления по сравнению с работой неадаптивных систем с модальным управлени-

ем в условиях широкого изменения параметров объекта, действия зазоров и сухого трения, причем рассматриваются системы как с наблюдателем состояния, так и с полностью измеряемым объектом (без наблюдателя).

Примеры таких результатов представлены на рисунках 6, 7, на которых приведены переходные процессы угла поворота нагрузки адаптивной системы управления с параметрической настройкой (АСУПН) и модальной системы управления (МСУ) с двухмассовым упругим объектом (ДМУО) и наблюдателем (рис. 6), с трехмассовым упругим объектом (ТМУО) и наблюдателем (рис. 7), при усредненных постоянных параметрах объекта (кривые 1), уменьшении в 3 раза (кривые 2, рис. 6), в 2 раза (кривые 2, рис. 7) и увеличении в 3 раза (кривые 3) момента инерции нагрузки.

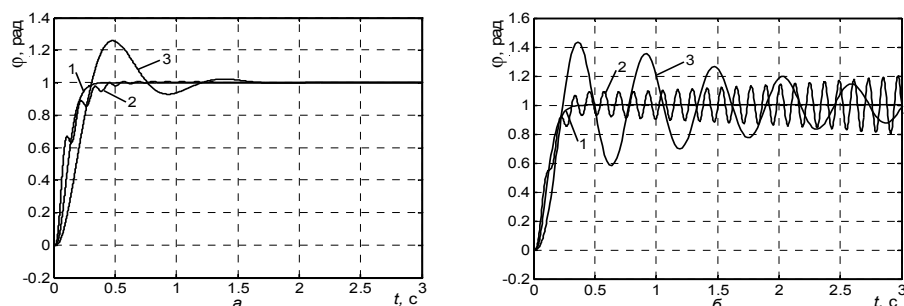


Рис. 6. Переходные процессы с ДМУО и наблюдателем состояния: *а* – в АСУПН; *б* – в МСУ

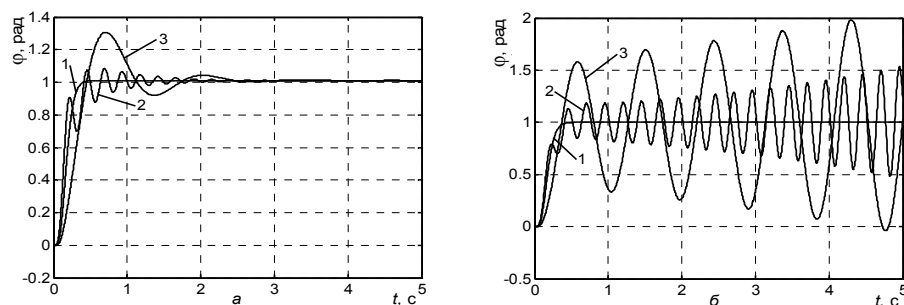


Рис. 7. Переходные процессы с ТМУО и наблюдателем состояния: *а* – в АСУПН; *б* – в МСУ

Результаты исследования моделированием показывают, что работоспособность прямых адаптивных систем в подавлении упругих колебаний и повышении быстродействия и точности управления сохраняется при 6 – 9-ти кратном изменении параметров в случае работы с наблюдателем состояния, при 25 – 50-ти кратном изменении параметров в случае работы с полностью измеряемым объектом и при наличии нелинейностей в виде зазоров и сухого трения, тогда как неадаптивная модальная система в таких же условиях работы является неработоспособной.

**В третьей главе** обоснован новый подход к применению интеллектуальных (нейронечетких) систем в решении сформулированных задач управления многомассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами. Нейронечеткие системы основаны на синтезе методов нечеткого управления и нейронных сетей. Нейронечеткие системы используют нечеткие правила и нейронный механизм реализации этих правил, и таким образом, обладают преимуществами как и нейронных сетей, так и нечетких систем управления. Среди различных типов нейронечетких регуляторов в работе выбран регулятор с нечеткими правилами TSK (Takagi – Sugeno – Kang), который является наиболее эффективным и основан на нейронечеткой архитектуре ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) (см. рис. 8) и на выполнении параметрического обучения.

Главной особенностью нечетких правил TSK является то, что их заключения есть линейные комбинации входных переменных вида

$$R_j: \text{если } x_1 \text{ есть } A_{1j} \text{ и } x_2 \text{ есть } A_{2j} \text{ и } \dots \text{ и } x_n \text{ есть } A_{nj},$$

$$\text{то } y = f_j = b_{0j} + b_{1j}x_1 + b_{2j}x_2 + \dots + b_{nj}x_n,$$

где  $x_i$  – входные переменные;  $y$  – выходная переменная;  $A_{ij}$  – лингвистические значения входных переменных с функциями принадлежности  $\mu_{A_{ij}}(x_i)$ ;  $b_{ij}$  – коэффициенты линейных уравнений  $f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $j = \overline{1, m}$ ;  $i = \overline{1, n}$ . Выходное управляющее воздействие  $y$  определяется по формуле

$$y = \sum_{j=1}^m \alpha_j f_j / \sum_{j=1}^m \alpha_j = \sum_{j=1}^m \bar{\alpha}_j f_j, \quad (18)$$

где  $\alpha_j$  – уровень истинности правила  $R_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , определяется как

$$\alpha_j = \min(\mu_{A_{1j}}(x_1), \mu_{A_{2j}}(x_2), \dots, \mu_{A_{nj}}(x_n)). \quad (19)$$

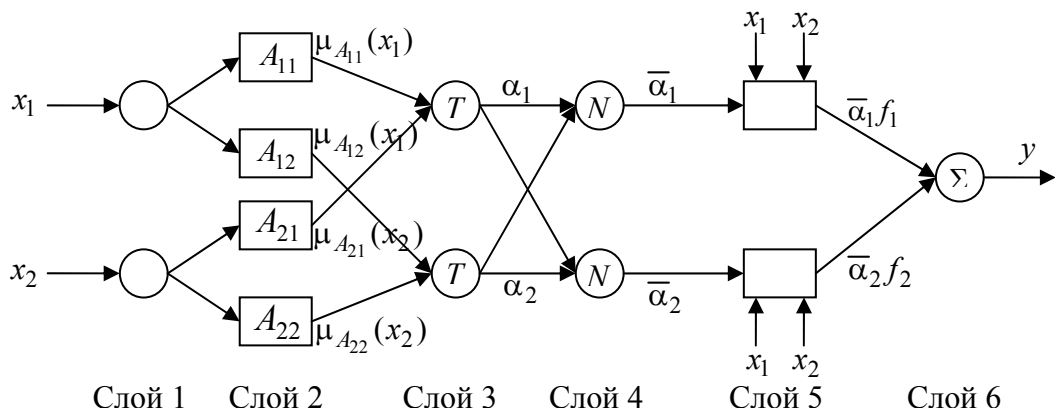


Рис. 8. Нейронечеткая архитектура ANFIS

Архитектура ANFIS обучается на основе гибридного алгоритма с использованием метода обратного распространения ошибки для настройки параметров 2-го слоя и метода наименьших квадратов для настройки параметров 5-го слоя.

В третьей главе сформулирован новый метод обучения в режиме «off-line» нейронечетких систем на основе построенных ранее аналитических алгоритмов беспоиcкового адаптивного с сигнальной настройкой и модального управления, выполненных соответственно на одной из двух структур нейронечетких систем управления электромеханическим объектом (ЭМО): с эталонной моделью и обратной связью по ошибке (рис. 9, а), а также с обратной связью по состоянию объекта и его производной (рис. 9, б).

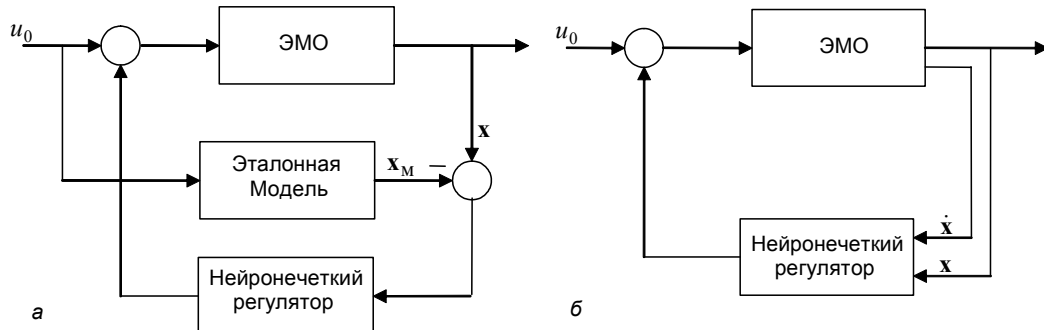


Рис. 9. Структуры нейронечетких систем управления: а – с эталонной моделью и обратной связью по ошибке; б – с обратной связью по состоянию объекта и его производной

Построение и обучение нейронечетких регуляторов с правилами TSK проводится с помощью редактора ANFIS пакета MATLAB, на основе которых разработаны и построены в среде MATLAB – SIMULINK четыре нейронечеткие системы управления:

- двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с эталонной

моделью и наблюдателем;

- двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с обратными связями по переменным состояния и их производным;
- трехмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с эталонной моделью и наблюдателем;
- трехмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с обратными связями по переменным состояния и их производным.

В качестве примера на рис. 10 представлена блок-схема моделирования последней из четырех вышеуказанных нейронечетких систем.

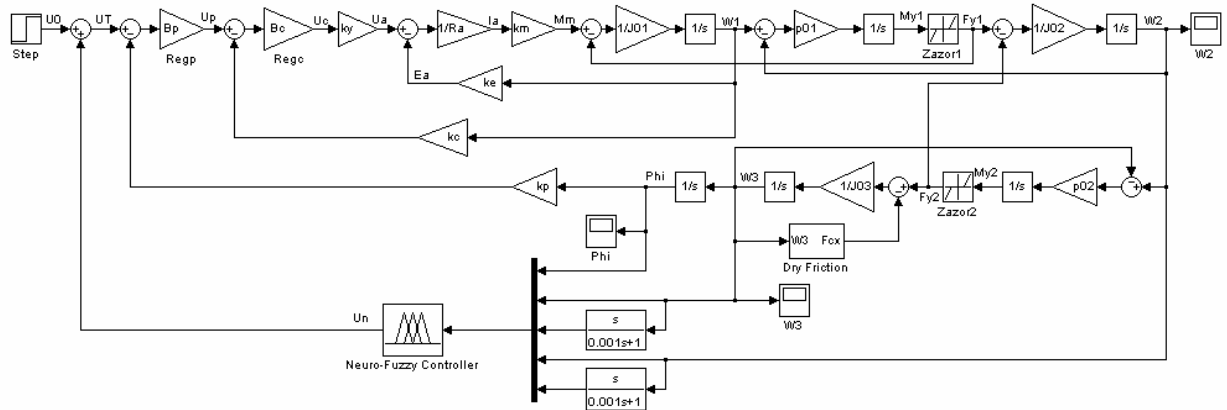


Рис. 10. Нейронечеткая система с обратными связями по переменным состояния и их производным для управления трехмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом

На основе построенных программ моделирования приводятся результаты исследования эффективности в решении поставленных задач нейронечетких систем управления с эталонной моделью (ННСУЭМ) и с обратными связями по переменным состояния и их производным (ННСУОП) при сравнении с эффективностью обучающих их аналитических систем – адаптивной системы управления с сигнальной настройкой (АСУСН) и модальной системы управления (МСУ) соответственно, в одних и тех же условиях работы: широкое изменение параметров объекта, действие зазоров и сухого трения, с наблюдателем состояния или с полностью измеряемым объектом (без наблюдателя).

Некоторые результаты исследования представлены на рис. 11 – 14, на которых приведены переходные процессы угла поворота нагрузки нейронечеткой, адаптивной с сигнальной настройкой и модальной систем с двухмассовым упругим объектом (ДМУО) (рис. 11, 12) или с трехмассовым упругим объектом (ТМУО) (рис. 13, 14), с наблюдателем состояния (рис. 11, 13) или с полностью измеряемым объектом (рис. 12, 14), при усредненных постоянных параметрах объекта (кривые 1), при уменьшении в 2 – 3 раза (кривые 2, рис. 11, 13), в 6 – 10 раз (кривые 2, рис. 12, 14) и при увеличении в 3 раза (кривые 3, рис. 11, 13), в 5 раз (кривые 3, рис. 12, 14) момента инерции нагрузки.

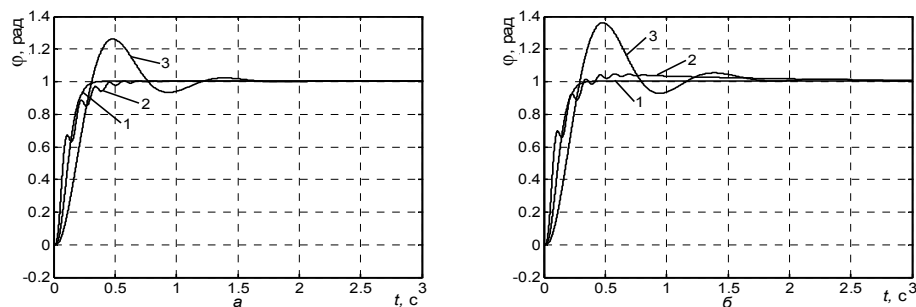


Рис. 11. Переходные процессы с ДМУО и наблюдателем: а – в ННСУЭМ; б – в АСУСН

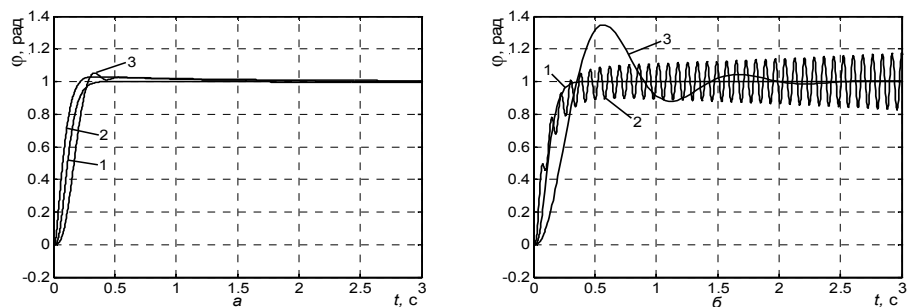


Рис. 12. Переходные процессы с ДМО и без наблюдателя: *а* – в ННСУОП; *б* – в МСУ

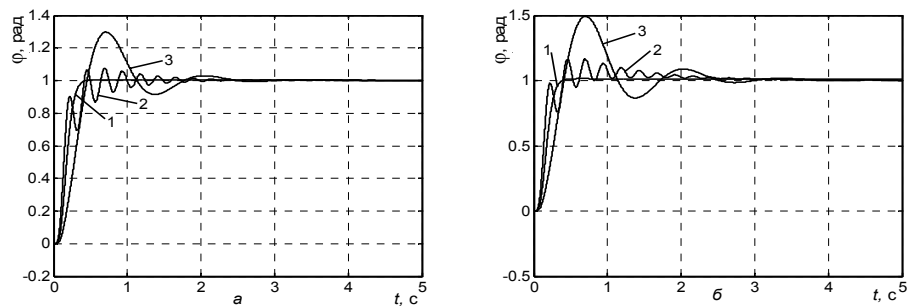


Рис. 13. Переходные процессы с ТМО и наблюдателем: *а* – в ННСУЭМ; *б* – в АСУСН

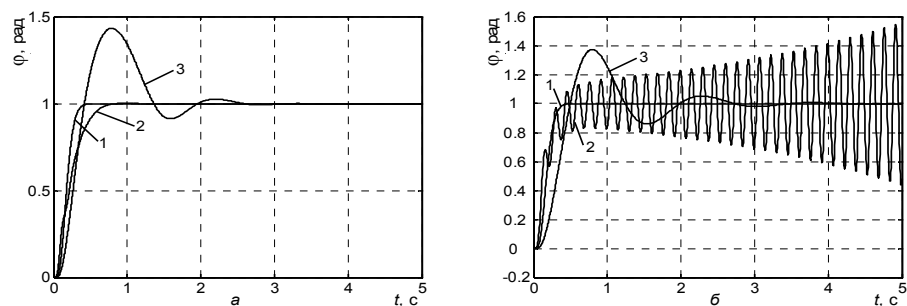


Рис. 14. Переходные процессы с ТМО и без наблюдателя: *а* – в ННСУОП; *б* – в МСУ

Из результатов исследования показано, что, в силу эвристичности нейронечетких систем, приобретаемые ими адаптивные свойства в процессе обучения их с помощью аналитических систем в рассматриваемых областях функционирования могут даже превосходить адаптивные свойства самих обучающих систем. При этом работоспособность нейронечетких систем в решении задач управления приближается к работоспособности прямых адаптивных систем с параметрической настройкой, хотя нейронечеткие адаптивные системы являются, в силу их построения, более простыми, чем аналитические адаптивные системы, требующими при их микроконтроллерной реализации гораздо меньших вычислительных ресурсов, чем последние, а этап их отладки заканчивается обучением.

**В четвертой главе** методы расчета, построения и обучения, изложенные в предыдущих главах, используются для разработки и экспериментального исследования с помощью пакета MATLAB – SIMULINK и платы сопряжения Advantech PCI-1711 семейства аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления реальным двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом (см. рис. 15).

В учебно-научной лаборатории кафедры САУ СПбГЭТУ в рамках реализации поставленной выше задачи подавления упругих колебаний с одновременным повышением быстродействия в условиях параметрической неопределенности объекта и наличия нелинейностей в виде зазора в упругой связи и сухого трения, разработаны опытные образцы микроконтроллерных систем управления, работающих в режиме реального времени. Проведены расчеты следящей системы с реальным двухмассовым упругим электромеханическим объектом и двухконтурным подчиненным управлением по скорости и положению, а

также структур модального управления, эталонной модели и наблюдателя (по измерению угловой скорости первого диска) реального объекта, служащих дальнейшему построению аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления. Разработаны и построены в среде MATLAB – SIMULINK и на базе платы сопряжения Advantech PCI-1711 прямая адаптивная система с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем и нейронечеткая система с эталонной моделью и наблюдателем для управления в режиме реального времени двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом (см. рис. 16). Для нейронечеткой системы осуществлено обучение в режиме off-line нейронечеткого регулятора с правилами TSK с помощью редактора ANFIS на основе обучающей адаптивной системы с сигнальной настройкой.

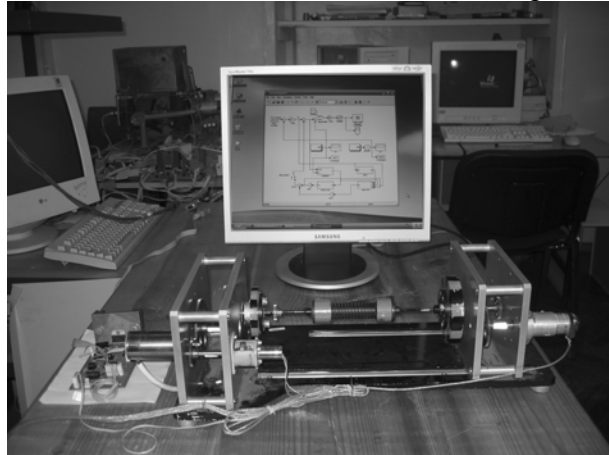


Рис. 15. Промышленный макет двухмассового упругого электромеханического объекта с программой управления в среде MATLAB – SIMULINK

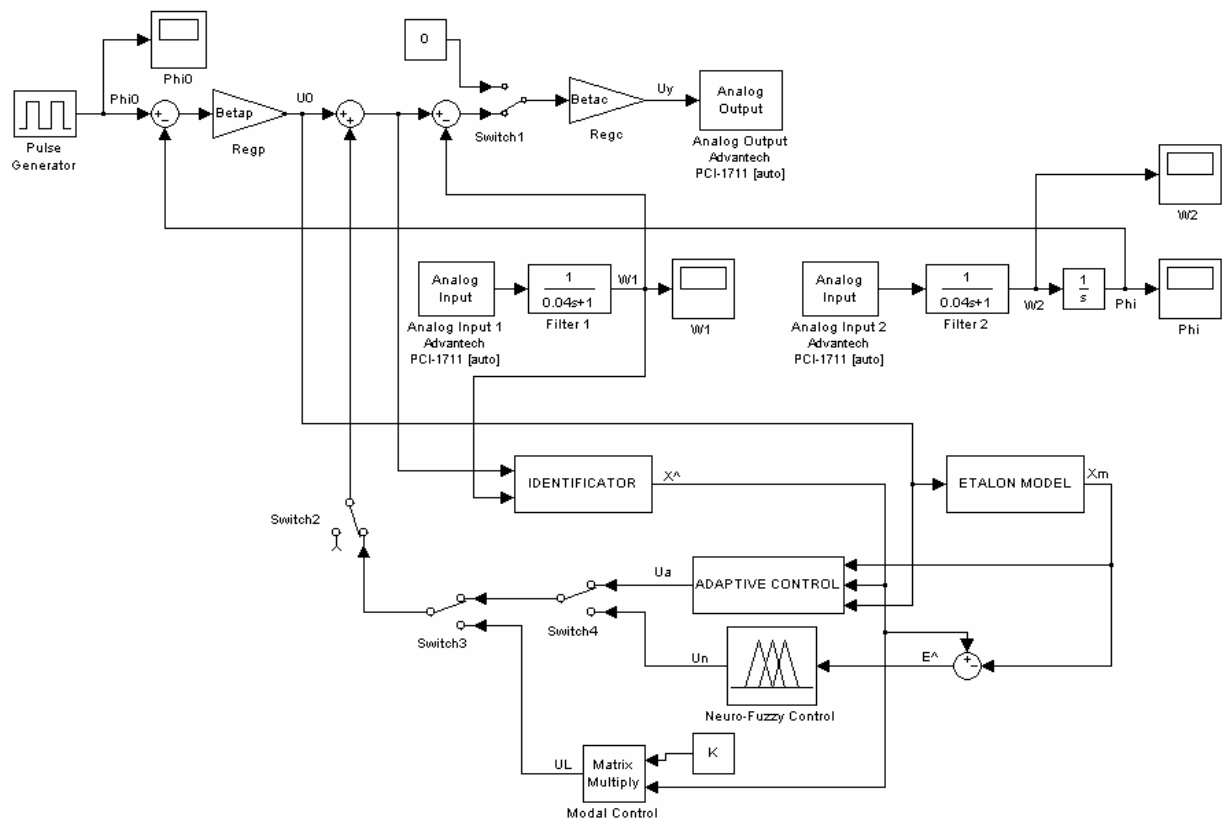


Рис. 16. Прямая адаптивная система с параметрической настройкой и мажорирующими функциями, нейронечеткая система с эталонной моделью и модальная система управления в режиме реального времени двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с наблюдателем

Проведено экспериментальное исследование режимов работы построенных систем

управления реальным объектом при задающем воздействии прямоугольного вида и при внешнем импульсном возмущающем воздействии. Результаты экспериментов приведены на рис. 17 – 19, на которых показаны реакции угла поворота нагрузки на задающее воздействие: в исходной следящей системе без дополнительного управления (рис. 17, *а*), в модальной системе управления (МСУ) (рис. 17, *б*), в адаптивной системе управления с параметрической настройкой (АСУПН) (рис. 18, *а*) и в нейронечеткой системе управления с эталонной моделью (ННСУЭМ) (рис. 18, *б*), а также реакции на внешнюю возмущающую силу (импульс, приложенный по второму диску – нагрузке) при нулевом задании в указанных системах (рис. 19).

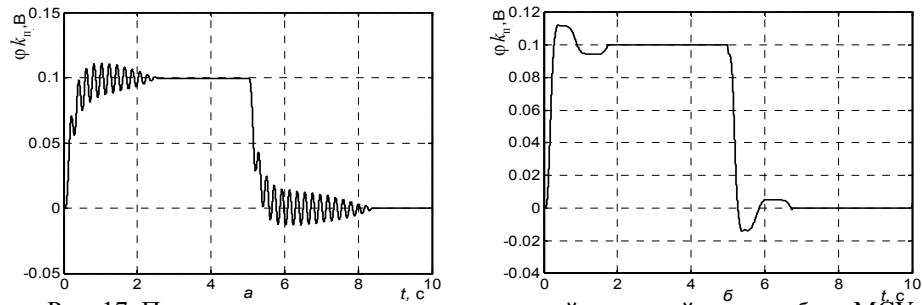


Рис. 17. Переходные процессы: *а* – в исходной следящей систем; *б* – в МСУ

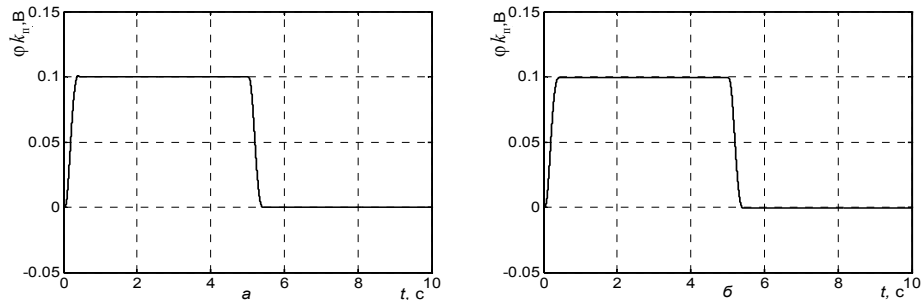


Рис. 18. Переходные процессы: *а* – в АСУПН; *б* – в ННСУЭМ

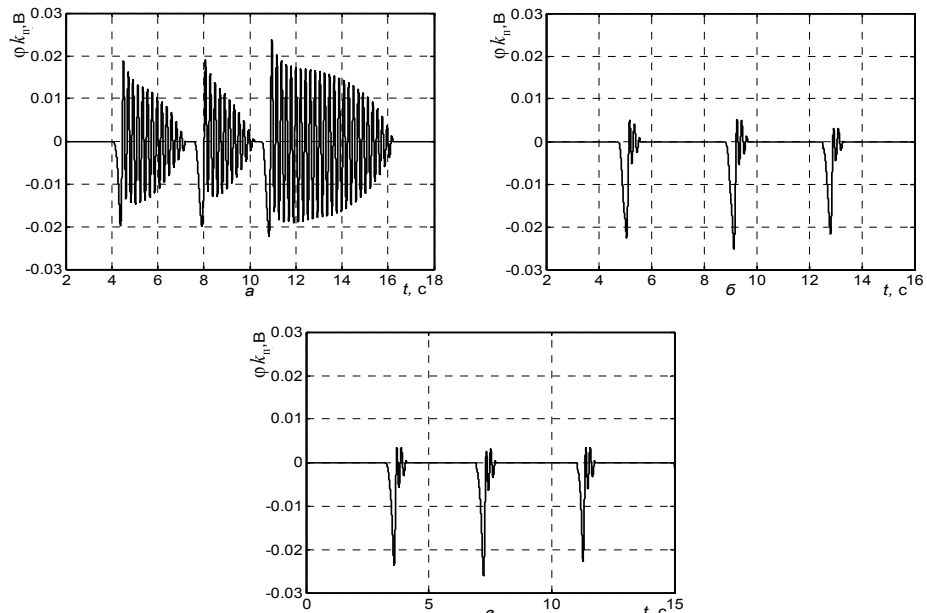


Рис. 19. Реакция на импульсное внешнее возмущающее воздействие: *а* – в исходной следящей системе; *б* – в АСУПН; *в* – в ННСУЭМ

Из показанных графиков видно, что в прямой адаптивной и нейронечеткой системах не только полностью подавлены упругие колебания и одновременно заметно улучшено быстродействие по сравнению с исходной следящей системой, но и их переходные про-



цессы гораздо лучше переходных процессов в неадаптивной модальной системе. При действии внешней возмущающей силы в исходной следящей системе возникают слабо затухающие упругие колебания, а в прямой адаптивной и нейронечеткой системах упругие колебания быстро затухают, что и свидетельствует об их хорошей работоспособности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертации проведены теоретические, вычислительные и экспериментальные работы. Основными результатами научных исследований, выполненных автором, являются:

1. Разработана математическая модель в скоростной форме многомассового нелинейного упругого электромеханического объекта с учетом зазоров в упругих связях и возмущающего момента нагрузки в виде сухого трения, принятая в качестве исходной с усредненными параметрами для дальнейших построений беспоисковых и интеллектуальных адаптивных систем управления.

2. Разработаны прямые адаптивные системы с параметрической и сигнальной настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателями для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами, работоспособность которых в задачах подавления упругих колебаний, повышения быстродействия и точности управления подтверждена результатами исследования моделированием в условиях широкого изменения параметров, действия нелинейностей и неполного измерения.

3. Обоснован новый подход к применению нейронечетких систем с нечеткими правилами TSK в решении задач управления многомассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами.

4. Сформулирован новый метод обучения в режиме «off-line» нейронечетких систем на основе аналитических алгоритмов беспоискового адаптивного с сигнальной настройкой и модального управления, выполненных соответственно на одной из двух систем управления: с эталонной моделью, и с обратной связью по состоянию объекта и его производной.

5. Построены и обучены в режиме «off-line» по двум структурным схемам и на основе аналитических методов нейронечеткие системы с правилами TSK для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами, работоспособность которых в решении сформулированных задач управления подтверждена результатами исследования моделированием в условиях широкого изменения параметров, действия нелинейностей и неполного измерения.

6. Показано, что в силу эвристичности нейронечетких систем и их построения, приобретаемые ими адаптивные свойства в процессе обучения их с помощью аналитических систем могут превосходить адаптивные свойства самих обучающих систем, при этом нейронечеткие системы являются более простыми в построении и требуют при микроконтроллерной реализации меньше вычислительных ресурсов.

7. Разработано и построено в среде MATLAB – SIMULINK и на базе платы сопряжения Advantech PCI-1711 семейство беспоисковых и нейронечетких адаптивных систем с наблюдателем для управления в режиме реального времени промышленным макетом двухмассового нелинейного упругого электромеханического объекта. Результаты экспериментального исследования разных режимов работы построенных систем реального объекта показали их хорошую работоспособность и полностью подтвердили принципиальную правильность разработанных методик расчета, построения и обучения аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления многомассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами.

Все решенные вопросы направлены на ближайшее практическое приложение полученных в диссертационной работе результатов к разработке нового поколения беспоисковых и интеллектуальных адаптивных регуляторов, обеспечивающих значительное повы-

шение устойчивости, точности и быстродействия реальных промышленных электромеханических систем.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Семейство адаптивных систем управления многомассовым нелинейным упругим механическим объектом с неопределенными параметрами и неполными измерениями [Текст] / В.В. Лебедев, В.В. Путов, Ч.А. Зунг и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета), Сер. Автоматизация и управление. – СПб., 2006. – Вып.1. – С.3–8.

2. Путов, В.В. Исследование прямой беспойсковой адаптивной системы с параметрической настройкой для управления двухмассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст] / В.В. Путов, Ч.А. Зунг // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета), Сер. Автоматизация и управление. – СПб., 2006. – Вып.1. – С.47–52.

3. Семейство аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст] / В.В. Путов, В.Н. Шелудько, Ч.А. Зунг и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – Вып.10. – С.16–24.

### Другие работы:

4. Параметрическая адаптация для управления двухмассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст] / В.В. Путов, Ч.А. Зунг, В.П. Казаков и др. // Материалы XVII всерос. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника», 3–6 апр. 2006 г. – СПб., 2006. – Т.5. – С.206–214.

5. Зунг, Ч.А. Адаптивное с параметрической настройкой управление двухмассовыми нелинейными электромеханическими объектами [Текст] / Ч.А. Зунг, Е.В. Друян // Материалы III всерос. науч.-техн. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление», 10–12 окт. 2006 г. – СПб., 2006. – С.109–112.

6. Путов, В.В. Нейронечеткая система управления электромеханическими объектами с упругими деформациями [Текст] / В.В. Путов, Ч.А. Зунг // Материалы III междунар. науч.-практ. конф. «Дни науки – 2007», 1–15 апр. 2007 г. – Днепропетровск, 2007. – Т.11. – С.17–20.

7. Путов, В.В. Построение и обучение на основе аналитических алгоритмов нейронечетких систем управления упругими электромеханическими объектами [Текст] / В.В. Путов, Ч.А. Зунг // Материалы XVIII всерос. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника», 3–6 апр. 2007 г. – СПб., 2007. – Т.5. – С.294–301.

8. Путов, В.В. Нейронечеткое управление трехмассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст] / В.В. Путов, Ч.А. Зунг // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники», 24–29 сент. 2007 г. – Дивноморское, 2007. – С.118–123.

9. Нейронечеткая система управления трехмассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст] / В.В. Путов, В.В. Лебедев, Ч.А. Зунг и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета), Сер. Автоматизация и управление. – СПб., 2007. – Вып.1. – С.20–26.

10. Прямая параметрическая адаптация с мажорирующими функциями для управления трехмассовыми нелинейными электромеханическими объектами с двухрезонансными упругими деформациями [Текст] / В.В. Путов, В.Н. Шелудько, Ч.А. Зунг и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета), Сер. Автоматизация и управление. – СПб., 2008. – Вып.1. – С.15–26.