

Во Конг Фыонг

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С УПРУГИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор
Путов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор
Манько Сергей Викторович

кандидат технических наук
Мордовченко Дмитрий Дмитриевич

Ведущая организация – Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК)

Защита диссертации состоится «___» декабря 2010 года в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 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 «___» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций Д 212.238.05

М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап в проектировании сложных комплексов, управляющих высокоэффективными и прецизионными агрегатами и установками, связан с решением задач снижения влияния различных факторов, вызывающих нарушение рабочих режимов управляемых объектов. К таким факторам можно отнести отсутствие априорной информации о существенно нестабильных значениях массоинерционных и упругих параметров механических объектов; случайные изменения нагрузки; взаимовлияние степеней подвижности объектов; варьирование параметров объектов от образца к образцу и варьирование параметров стандартных систем регулирования при замене исполнительных приводов и отдельных блоков управления при неточной или ошибочной их настройке.

Упругие деформации звеньев механических конструкций и передач являются одним из доминирующих факторов, препятствующих повышению эффективности управляемых механических объектов и подлежащих подавлению средствами управления. В многостепенных механических объектах с собственными частотами, лежащими в полосе пропускания исполнительных приводов, определяемой их предельно возможным быстродействием, упругие колебания возбуждаются при любой попытке реализовать это предельное быстродействие в управлении, что приводит к снижению качественных показателей объектов, повышенному износу, поломкам и авариям промышленного оборудования, тормозит рост его производительности. В силу приблизительно одинаковых требований к прочностным характеристикам механических конструкций объектов в самых различных областях техники значения низших собственных частот упругих колебаний в них всегда находятся в одних и тех же пределах (2...15 Гц) независимо от масштабов (массогабаритных показателей) исполнения объектов, и опасность возбуждения упругих колебаний препятствует любым попыткам реализовать потенциально весьма высокие предельные возможности быстродействия собственно исполнительных электрических или гидравлических приводов механизмов степеней подвижности управляемых объектов.

Другой необходимой предпосылкой создания более совершенных систем автоматического управления подвижными механическими объектами является происходящий в настоящее время поистине революционный переход от реализуемой в течение предшествующих десятилетий аналоговой элементной базы электронных блоков бортовых систем управления к современной высокопроизводительной вычислительной микроконтроллерной технике промышленного и бортового применения. Это создает условия для такого же кардинального пересмотра традиционных методов построения систем управления подвижными объектами и перехода к более современным методам управления. Привлечение же современной высокопроизводительной вычислительной техники только для реализации довольно простых традиционных линейных средств подчиненного управления такими механическими объектами и игнорирование действительной сложности их динамики является ничем не оправданным недоиспользованием потенциальных возможностей современной бортовой вычислительной техники.

Таким образом, задачи, связанные с разработкой эффективных систем автоматического управления электромеханическими объектами с многорезонансными упругими деформациями, неполными измерениями, быстро и в широких пределах изменяющимися параметрами и внешними возмущениями являются актуальными и решаются в данной работе в рамках беспосредственного (аналитического) и интеллектуального адаптивных подходов.

Цель диссертационной работы – разработка, исследование и сравнительный анализ аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления многомассовыми электромеханическими объектами с упругими деформациями.

В диссертационной работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработать и исследовать адаптивные системы с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью.

2. Разработать и исследовать адаптивные системы с нейросетевой параметрической настройкой для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью.

3. Разработать и исследовать адаптивные системы с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием.

4. Разработать и исследовать адаптивные системы с нейросетевой параметрической настройкой для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием.

5. Разработать и отладить компьютерные аналитическую и интеллектуальную адаптивные системы для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с неопределенным описанием и неполными измерениями в режиме реального времени.

Методы исследования. Основные теоретические и прикладные результаты работы получены в рамках применения методов теории устойчивости и диссипативности систем, основанных на функциях Ляпунова; методов синтеза беспоисковых адаптивных систем управления линейными и нелинейными динамическими объектами; алгебраических методов теории систем; методов построения и обучения нейронных сетей; методов аналитической механики, уравнений Лагранжа и теории малых колебаний упругих систем; численных методов интегрирования дифференциальных уравнений; компьютерных методов исследования на базе стандартных программных продуктов.

Научные результаты и новизны, выносимые на защиту:

1. Аналитические (беспоисковые) адаптивные системы с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью.

2. Адаптивные системы с нейросетевой параметрической настройкой для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью.

3. Аналитические (беспоисковые) адаптивные системы с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием.

4. Адаптивные системы с нейросетевой параметрической настройкой для управления двух- и трехмассовым нелинейными упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием.

5. Аналитическая и интеллектуальная адаптивные системы для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом с неопределенным описанием и неполными измерениями в режиме реального времени.

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 исследования моделированием построенных в работе аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления многомассовыми упругими электромеханическими объектами.

Практическая полезность результатов работы:

- созданы полезные в инженерном проектировании простые, легко поддающиеся компьютеризации методики расчета реализуемых аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления упругими 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;

- подтверждены моделированием выводы, что в силу эвристичности нейросетевых систем, приобретаемые ими адаптивные свойства в процессе обучения их с помощью аналитических систем могут превосходить адаптивные свойства самих обучающих систем, при этом нейросетевые системы требуют при микроконтроллерной реализации меньших вычислительных ресурсов;

- разработаны и отлажены на базе пакета MATLAB и платы сопряжения Advantech PCI-1711 аналитическая и интеллектуальная адаптивные системы управления для двухмассовых упругих электромеханических объектов, полезные 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 4 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.

- «Разработка новой технологии измерения коэффициента сцепления аэродромных и автодорожных покрытий, основанной на электромеханическом способе торможения измерительного колеса» государственный контракт от 15 июня 2009 г. № 02.740.11.0010 (2009-2011);

- «Создание автоматически управляемых электромеханических систем торможения колес воздушных и наземных транспортных средств» государственный контракт № П 548 от 05 августа 2009 г. (2009-2011)

Апробация работы. Основные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на 4 международных и всероссийских научно-технических конференциях: на VI Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. (14–17 апреля 2009 года: Программа. – СПб: СПбГУ ИТМО); на 63-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 26 января – 6 февраля 2010; на третьей международной научно-практической конференции (современные проблемы гуманитарных и естественных наук, Москва, июнь, 2010 г.); на XIII международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (июнь, 2010 г., Санкт-Петербург)

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 6 статьях и докладах, среди которых 1 статья включена в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 1 статья в другом издании, 4 работы в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами и заключения. Основной материал диссертации изложен на 146 страницах машинописного

текста, включает 121 рисунок и содержит список литературы из 95 наименований, среди которых 52 отечественных и 43 иностранных авторов.

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 «скоростной» формы уравнений n -массового упругого механического объекта цепной неразветвленной структуры с зазорами $2\delta_i$ в упругих связях (см. рисунок 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 дифференциальных уравнений движения многомассового упругого объекта равен $m = 2n - 1$.

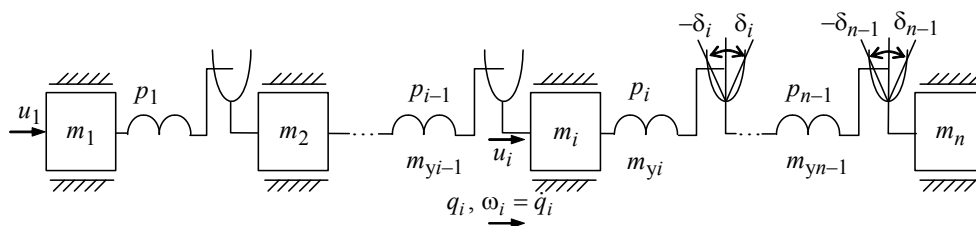


Рисунок 1. Расчетная неразветвленная однолинейная цепная модель многомассового упругого механического объекта с зазорами

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.

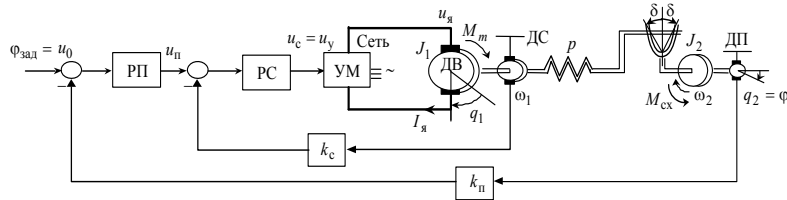


Рисунок 2. Двухмассовый нелинейный упругий электромеханический объект с двухконтурным подчиненным управлением

Уравнения следящей системы с двухмассовым упругим объектом имеют следующий вид:

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

где φ – 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; $k_c, k_{пн}$ – коэффициенты передачи датчиков обратных связей по скорости и положению соответственно; $\beta_c, \beta_{пн}$ – коэффициенты усиления регуляторов скорости и положения соответственно; $M_{сх}$ – момент сухого трения; u_Σ – суммарный управляющий сигнал; $u_0 = \varphi_{зад}$ – задающее воздействие; u_l, u_a – линейное и адаптивное управления, подлежащие 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 $a_1 = 1/J_{02}; a_2 = p_0; a_3 = -k_m k_y k_{пн} \beta_c \beta_{пн} / (J_{01} R_я); a_4 = -1/J_{01}; a_5 = -k_m (k_e + k_c k_y \beta_c) / (J_{01} R_я); b = k_m k_y \beta_c \beta_{пн} / (J_{01} R_я)$, тогда уравнения линеаризованного объекта (2) имеют следующий векторно-матричный вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{b}_0 u_\Sigma; \quad \mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x}; \\ \mathbf{A}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 \\ a_3 & 0 & a_4 & a_5 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega_2 \\ m_y \\ \omega_1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

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 ω_1).

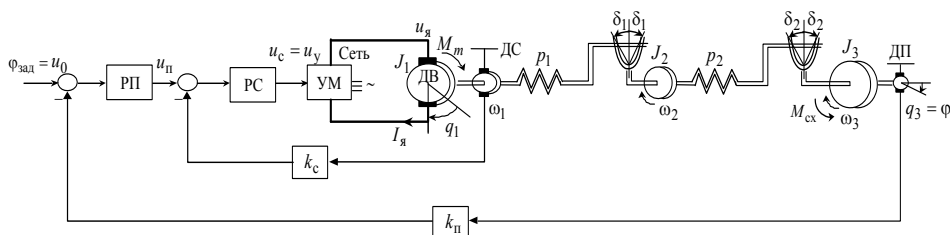


Рисунок 3. Трехмассовый нелинейный упругий электромеханический объект с двухконтурным подчиненным управлением

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

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

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 $a_1 = 1/J_{03}$; $a_2 = p_{02}$; $a_3 = 1/J_{02}$; $a_4 = p_{01}$; $a_5 = -k_m k_y k_{\text{п}} \beta_c \beta_{\text{п}} / (J_{01} R_{\text{я}})$; $a_6 = -1/J_{01}$; $a_7 = -k_m (k_e + k_c k_y \beta_c) / (J_{01} R_{\text{я}})$; $b = k_m k_y \beta_c \beta_{\text{п}} / (J_{01} R_{\text{я}})$, можно записать уравнения линеаризованного трехмассового объекта (4) в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{b}_0 u_{\Sigma}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{c}^T \mathbf{x}; \\ \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & a_4 \\ a_5 & 0 & 0 & 0 & a_6 & a_7 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega_3 \\ m_{y2} \\ \omega_2 \\ m_{y1} \\ \omega_1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Примем линейные системы (3), (5) в качестве исходных расчетных моделей упругих электромеханических объектов с усредненными параметрами для дальнейшего расчета моделирования адаптивных (аналитических и интеллектуальных) систем.

Вторая глава посвящена изложению метода построения беспоисковых адаптивных систем с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью и разработка и исследование в среде MATLAB – SIMULINK адаптивных систем с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления нелинейными двух- и трехмассовым упругими электромеханическими объектами. На основе полученных расчетных линейных моделей с усредненными параметрами составляются методики расчета модального управления, эталонной модели 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-строка 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

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{\text{м}} = \mathbf{A}_{\text{м}} \mathbf{x}_{\text{м}} + \mathbf{b}_{\text{м}} u_0; \\ \mathbf{A}_{\text{м}} = \mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{k}; \quad \mathbf{b}_{\text{м}} = \mathbf{b}_0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

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

1. Адаптивная система с применением гауссовых функций для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью

На базе теоремы Стоуна-Вейерштрасса (см. главу 9, раздел 9 в работе Royden H. L. реальный анализ, 3-е изд, 1988) и некоторых сведений из теории функциональных приближений доказан следующий результат: пусть даны любая постоянная $\varepsilon^* > 0$ и любое компактное множество $G \subset R^n$, существует положительное целое число q , такое, что заданная в G непрерывная функция $\delta(\mathbf{x}) : G \rightarrow R$ может быть представлена приближением вида ($\|\cdot\|$ – евклидова норма в R^n):

$$\delta(\mathbf{x}) = \mathbf{k}_\delta \Phi(\mathbf{x}) + \varepsilon(\mathbf{x}); \text{ и } \|\varepsilon(\mathbf{x})\| < \varepsilon^*, \quad (8)$$

где \mathbf{k}_δ – $1 \times q$ -мерный неизвестный постоянный вектор-строка; $\Phi(\mathbf{x})$ – $1 \times q$ -мерный вектор состоящий из компонент – скалярных функций Гаусса вида $\Phi_i(\mathbf{x}) = e^{-\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ci}\|^2 / 2\sigma_i}$, \mathbf{x}_{ci} – вектор центра, σ_i – ширина функции, $i = \overline{1, q}$ (Dr. Naira Novakimyan Adaptive Control Theory: Guaranteed Robustness with Fast Adaptation / SIAM, USA, 2010). В работе А. Баррона Universal approximation bounds for superposition of a sigmoid function (IEEE Trans-action on information theory, p. 930 – 945, 1993) показано, что заданная точность приближения функции по (8) сравнима с величиной $1/\sqrt{q}$, т.е. $\varepsilon^* \approx O(1/\sqrt{q})$.

Рассмотрим нелинейный объект с функциональной и параметрической неопределенностью, выраженный в виде

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}[u_\Sigma(t) + \delta(\mathbf{x})] \quad (9)$$

где \mathbf{A} – $n \times n$ -мерная неизвестная постоянная матрица; \mathbf{b} – n -мерный неизвестный постоянный вектор; $\delta(\mathbf{x}) \in R^n \rightarrow R$ – неопределенная нелинейная функция; $\mathbf{x}(t) \in R^n$ – переменная состояния системы; $u_\Sigma(t) = u_a(t) + u_0(t)$ где $u_0(t)$ – программное управление, а $u_a(t)$ – адаптивное управление. В соответствии результатом (8) можно предложить следующие структуры адаптивного закона и алгоритмов параметрической настройки:

$$u_a(t) = \mathbf{k}_A(t)\mathbf{x}(t) + k_b(t)u_0(t) - \hat{\mathbf{k}}_\delta(t)\Phi(\mathbf{x}). \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_A(t) &= -\gamma_A \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{x}^T; \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} u_0; \\ \dot{\hat{\mathbf{k}}}_\delta(t) &= \gamma_\delta \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \Phi(\mathbf{x})^T. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Применяя известные методы огрубления алгоритмов (11), модифицируют их к виду:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_A(t) &= -\gamma_A (\mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{x}^T + \lambda_A \mathbf{k}_A); \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b (\mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} u_0 + \lambda_b k_b); \\ \dot{\hat{\mathbf{k}}}_\delta(t) &= \gamma_\delta (\mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \Phi(\mathbf{x})^T + \lambda_\delta \hat{\mathbf{k}}_\delta), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\mathbf{k}_A(t)$, $\hat{\mathbf{k}}_\delta(t)$ – $1 \times n$ - и $1 \times q$ -мерные векторы-строки настраиваемых коэффициентов, а $k_b(t) \in R$ – настраиваемый входной коэффициент; $\gamma_A, \lambda_A, \gamma_b, \lambda_b, \gamma_\delta, \lambda_\delta$ – положительные коэффициенты усиления настроек; $\mathbf{e} = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_M(t)$ – ошибка переменных состояния; \mathbf{P} – симметричная и положительно определенная матрица, удовлетворяющая уравнению Ляпунова вида

$$\mathbf{A}_M^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_M = -\mathbf{G}, \quad \mathbf{G} = \mathbf{G}^T > 0. \quad (13)$$

Проиллюстрируем эффективность гауссовых функций на примере адаптивной системы с

параметрической настройкой для управления нелинейным объектом первого порядка. Рассмотрим нелинейный объект $\dot{x} = a(\sin^2 x)x + bu_\Sigma$, где $a, b \in R$ – неизвестные вещественные числа; $u_\Sigma = u_0 + u_a$ и $u_a = k_a x + k_b u_0 - \mathbf{k}_\delta(t)\Phi(x)$ – адаптивный закон, где алгоритмы настройки $\dot{k}_a, \dot{k}_b, \dot{k}_\delta$ соответствуют уравнениям (11) или (12). Эталонная модель выбирается в виде $x_m = -10x + 10u_0$.

Результаты моделирования по программе *MATLAB – SIMULINK2009b* (приведены на рисунках 4, 5 и пояснены в подрисуночных надписях):

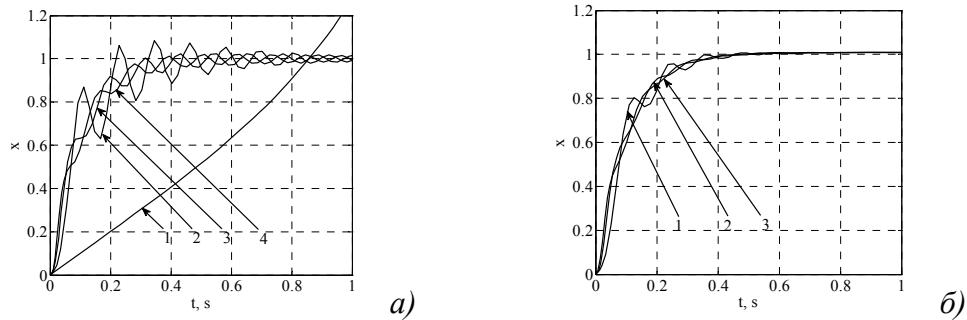


Рисунок 4. Переходные процессы $x(t)$ при $a=1$ и $b=1$: *а* – кривая 1 – без адаптивного управления, кривая 2 – с адаптацией (11) без гауссовых функций, кривая 3 – с адаптацией (11) и 3 гауссовыми функциями, 4 – с адаптацией (11) и 7 гауссовыми функциями. *б* – кривая 1 – с адаптацией (11) без гауссовых функций, кривая 2 – с адаптацией (12) и 3 гауссовыми функциями, кривая 3 – с адаптацией (12) и 7 гауссовыми функциями

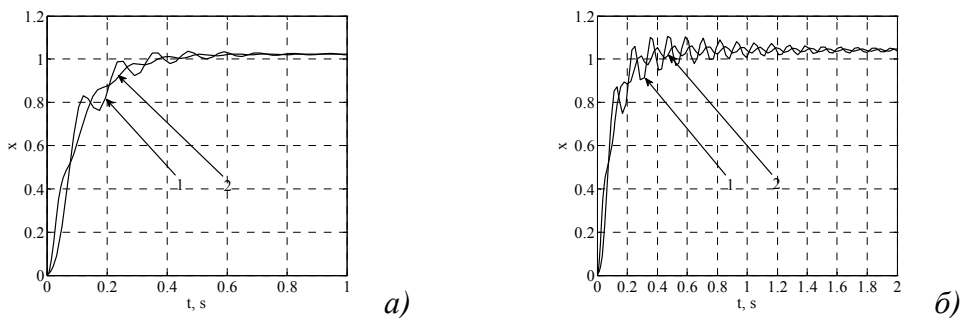


Рисунок 5. Переходные процессы $x(t)$: *а* – при $a=5$ и $b=1$, *б* – при $a=10$ и $b=1$, где кривая 1 – с адаптацией (12) без гауссовых функций, 2 – с адаптацией (12) и 7 гауссовыми функциями

Из результатов, приведенных в виде графиков на рисунках 4 и 5, видно, что применение гауссовых функций в адаптивных системах управления нелинейными объектами с параметрической настройкой приводит к повышению качества управления, и качество повышается с увеличением числа гауссовых функций.

2. Адаптивная система с применением гауссовых функций для управления нелинейными двух- и трехмассовым упругими электромеханическими объектами

2.а. Результаты исследований при изменении параметров двухмассового упругого объекта

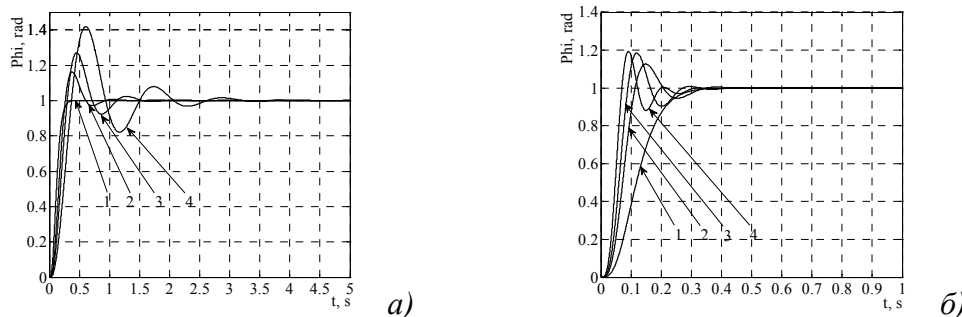


Рисунок 6. Переходные процессы угла поворота нагрузки. *а* – при изменении упругих коэффициентов p : кривая 1 – $p = p_0$; кривая 2 – $p = p_0 / 3$; кривая 3 – $p = p_0 / 5$; кривая 4 – $p = p_0 / 10$. *б* – при изменении моментов инерции нагрузки J_2 : кривая 1 – $J_2 = J_{02}$; кривая 2 – $J_2 = J_{02} / 3$; кривая 3 – $J_2 = J_{02} / 5$; кривая 4 – $J_2 = J_{02} / 10$.

2.б. Результаты исследований при влиянии нелинейностей на работу адаптивной системы с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом

Существенное влияние на точность слежения рассматриваемых систем для управления двух- и трехмассовым упругими электромеханическими объектами оказывают такие нелинейности, как зазор в упругой связи и сухое трение. При номинальном вращающем моменте приводного двигателя $M_{\text{НОМ}} = 47 \text{ Нм}$ для моделирования выберем приведенное значение зазора: $\delta = 0 - 0,2 \text{ рад}$, а значение сухого трения: $M_{\text{сх0}} = 1 - 5 \text{ Нм}$.

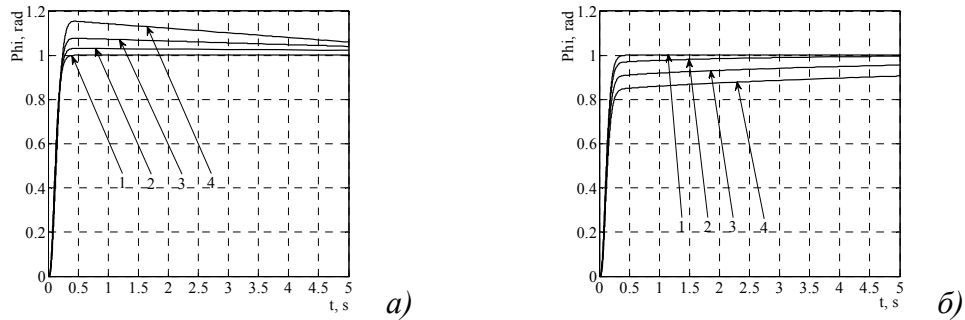


Рисунок 7. Переходные процессы угла поворота нагрузки: а – при изменении зазора δ , кривая 1 – $\delta = 0 \text{ рад}$; кривая 2 – $\delta = 0.04 \text{ рад}$; кривая 3 – $\delta = 0.1 \text{ рад}$; кривая 4 – $\delta = 0.2 \text{ рад}$, б – при изменении сухого трения $M_{\text{сх0}}$, кривая 1 – $M_{\text{сх0}} = 0 \text{ Нм}$; кривая 2 – $M_{\text{сх0}} = 1 \text{ Нм}$; кривая 3 – $M_{\text{сх0}} = 3 \text{ Нм}$; кривая 4 – $M_{\text{сх0}} = 5 \text{ Нм}$

2.в. Результаты исследований при изменении параметров трехмассового упругого объекта

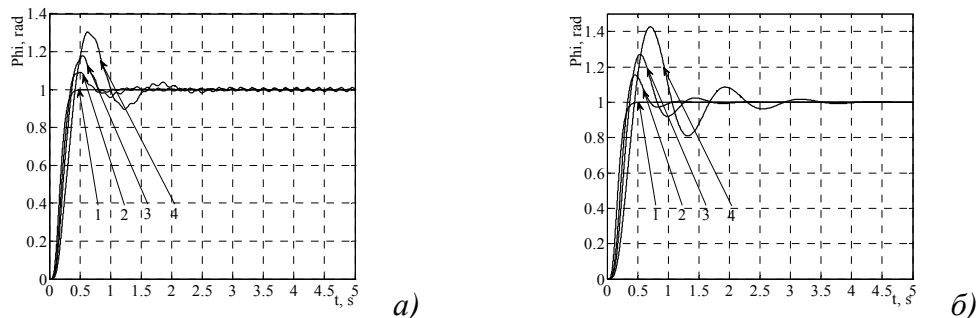


Рисунок 8. Переходные процессы угла поворота нагрузки при изменении упругих коэффициентов p_1, p_2 : а – кривая 1 – $p_1 = p_{01}$; кривая 2 – $p_1 = p_{01}/3$; кривая 3 – $p_1 = p_{01}/5$; кривая 4 – $p_1 = p_{01}/10$. б – кривая 1 – $p_2 = p_{02}$; кривая 2 – $p_2 = p_{02}/3$; кривая 3 – $p_2 = p_{02}/5$; кривая 4 – $p_2 = p_{02}/10$.

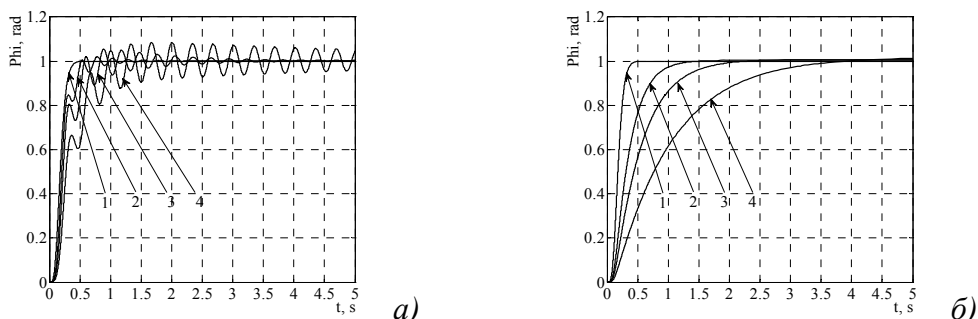


Рисунок 9. Переходные процессы угла поворота нагрузки при увеличении моментов инерции нагрузки J_2, J_3 : а – кривая 1 – $J_2 = J_{02}$; кривая 2 – $J_2 = 3J_{02}$; кривая 3 – $J_2 = 5J_{02}$; кривая 4 – $J_2 = 10J_{02}$, б – кривая 1 – $J_3 = J_{03}$; кривая 2 – $J_3 = 3J_{03}$; кривая 3 – $J_3 = 5J_{03}$; кривая 4 – $J_3 = 10J_{03}$.

2.г. Результаты исследований при влиянии нелинейностей на работу адаптивной системы с применением гауссовых функций для управления трехмассовым упругим объектом

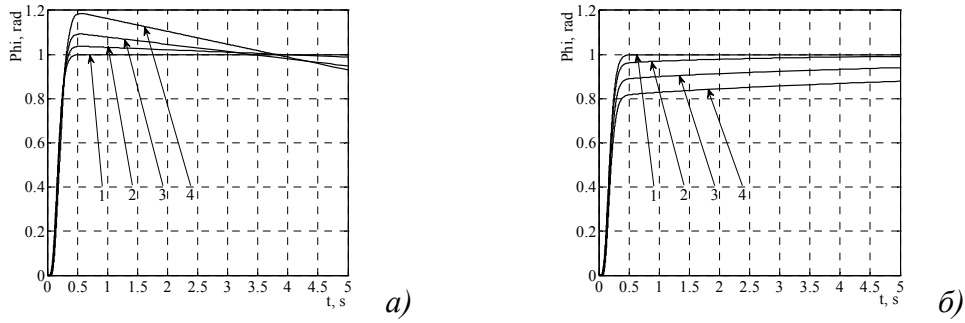


Рисунок 10. Переходные процессы угла поворота нагрузки: *a* – при изменении зазора δ_2 кривая 1 – $\delta_2 = 0$ рад ; кривая 2 – $\delta_2 = 0.04$ рад ; кривая 3 – $\delta_2 = 0.1$ рад ; кривая 4 – $\delta_2 = 0.2$ рад . *б* – при изменении сухого трения M_{cx0} : кривая 1 – $M_{cx0} = 0$ Нм ; кривая 2 – $M_{cx0} = 1$ Нм ; кривая 3 – $M_{cx0} = 3$ Нм ; кривая 4 – $M_{cx0} = 5$ Нм .

Результаты исследования моделированием показывают, что эффективность адаптивных систем с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления нелинейными многомассовыми упругими объектами в подавлении упругих колебаний и повышении быстродействия и точности управления сохраняется при 6–10-ти кратном изменении параметров в случае работы с полностью измеряемым объектом (см. рисунки 4–10).

Третья глава посвящена разработке нейросетевых адаптивных систем с эталонной моделью. В работе обосновано применение интеллектуальных (нейросетевых) систем в решении сформулированных задач управления нелинейными многомассовыми упругими электромеханическими объектами и предлагается применение нейросетевой настройки в аналитической адаптивной системе управления с эталонной моделью для вычисления $[k_A, k_B]$ адаптивного закона управления с эталонной моделью. На рисунке 11 показан схема включения блока нейросетевой настройки в адаптивную систему с эталонной моделью.

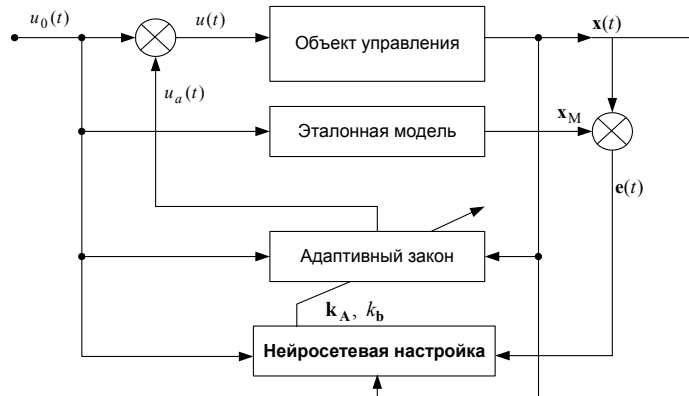


Рисунок 11. Схема адаптивного управления с эталонной моделью и применением нейронных сетей

Обучающий алгоритм обратного распространения ошибки. В настоящее время используются различные обучающие алгоритмы. В работе в качестве алгоритма обучения нейронных сетей настройки использован алгоритм обратного распространения ошибки.

Коррекция $\Delta w_{ji}(n)$, применяемая к синаптическому весу $w_{ji}(n)$, определяется согласно дельта-правилу (delta rule):

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)}, \quad (14)$$

где η - параметр скорости обучения (learning rate parameter) алгоритма обратного распространения. Использование знака "минус" в (14) связано с реализацией градиентного спуска (gradient descent) в пространстве весов (т.е. поиском направления изменения весов,

уменьшающего значение энергии ошибки $E(n)$):

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -e_j(n)\phi'_j(v_j(n))y_i(n), \quad (15)$$

где $e_j(n)$ - сигнал ошибки на выходе нейрона j на итерации n , $y_j(n)$ - функциональный сигнал, генерируемый на выходе нейрона j на итерации n , $y_j(n) = \phi_j(v_j(n))$, индуцированное локальное поле $v_j(n)$, полученное на входе функции активации, связанной с данным нейроном.

1. Обучение нейросетевой настройки в адаптивной системе управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом с эталонной моделью

В соответствии с числом входных и выходных переменных выберем число нейронов во входном слое, равное 9, в выходном – равное 5. Число нейронов в скрытом слое было выбрано, равное 9. В обучении нейронной сети был применен алгоритм обратного распространения ошибки. Структура нейросетевой настройки представлена на рисунке 12.

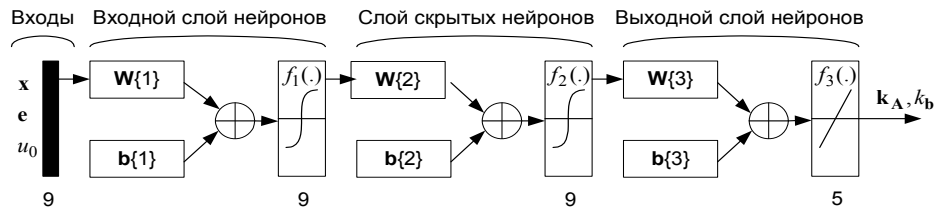


Рисунок 12. Схема нейросетевой настройки в адаптивной системе для управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом с эталонной моделью

В соответствии со схемой, можно написать:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} k_A \\ k_b \end{bmatrix} &= f_3(\mathbf{W}\{3}f_2(\cdot) + \mathbf{b}\{3}) \Big|_1^5 = f_3(\mathbf{W}\{3}f_2(\mathbf{W}\{2}f_1(\cdot) + \mathbf{b}\{2}) + \mathbf{b}\{3}) \Big|_1^5 = \\ &= f_3(\mathbf{W}\{3}f_2(\mathbf{W}\{2}f_1(\mathbf{W}\{1}[\mathbf{x} \ e \ u_0]^T + \mathbf{b}\{1}) + \mathbf{b}\{2}) + \mathbf{b}\{3}) \Big|_1^5, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mathbf{W}\{1}$, $\mathbf{W}\{2}$, $\mathbf{W}\{3}$ – весовые матрицы первого, второго и третьего слоев соответственно; $\mathbf{b}\{1}$, $\mathbf{b}\{2}$, $\mathbf{b}\{3}$ – пороги первого, второго и третьего слоев соответственно; $f_3(\cdot)$ – линейная функция; $f_1(\cdot)$, $f_2(\cdot)$ – сигмоидально-гиперболический тангенс (*tansig*) вида:

$$\text{tansig}(x) = \frac{2}{(1 + e^{-2x})^{-1}}. \quad (17)$$

Можно переписать выражение (16) в виде:

$$\begin{bmatrix} k_A \\ k_b \end{bmatrix} = \lambda_{\mathbf{Ab}} (\mathbf{W}\{3} \text{tansig}(\mathbf{W}\{2} \text{tansig}(\mathbf{W}\{1}[\mathbf{x} \ e \ u_0]^T + \mathbf{b}\{1}) + \mathbf{b}\{2}) + \mathbf{b}\{3}) \Big|_1^5,$$

где $\lambda_{\mathbf{Ab}}$ – линейный коэффициент, $\lambda_{\mathbf{Ab}} = 1$.

Результаты моделирования при изменении параметров объекта. Результаты исследования эффективности работы адаптивной нейросетевой системы управления (АНСУ) при усредненных постоянных параметрах и изменении параметров объекта сопоставляются с результатами работы построенной адаптивной системы управления с параметрической настройкой (АСУПН) (см. рисунки 13, 14).

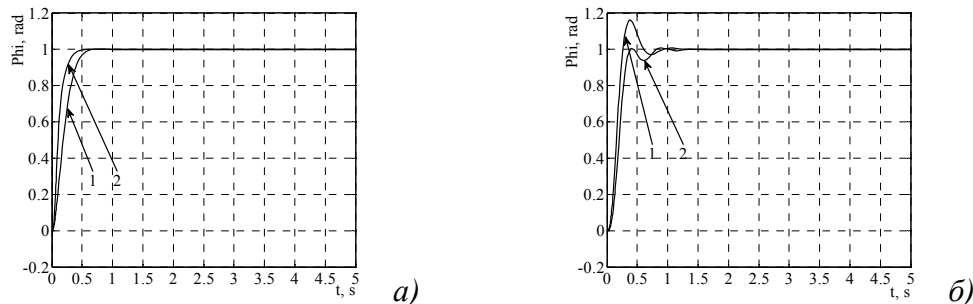


Рисунок 13. Переходные процессы угла поворота нагрузки в АСУПН (кривая 1) и АНСУ (кривая 2) при изменении коэффициента упругости p , $a - p = 3p_0$, $b - p = p_0 / 3$

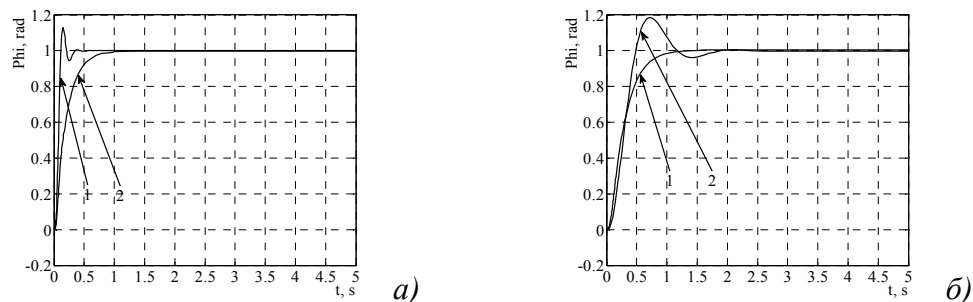


Рисунок 14. Переходные процессы угла поворота нагрузки в АСУПН (кривая 1) и АНСУ (кривая 2) при изменении момента инерции второго диска J_2 , $a - J_2 = 3J_{02}$, $b - J_2 = J_{02} / 3$

2. Обучение нейросетевой настройки в адаптивной системе управления трехмассовым упругим электромеханическим объектом с эталонной моделью

Схема предлагаемой нейросетевой настройки показана на рисунке 15.

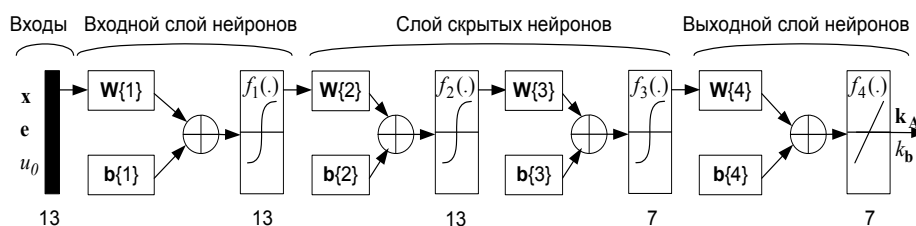


Рисунок 15. Схема нейросетевой настройки в адаптивной системе для управления трехмассовым упругим электромеханическим объектом с эталонной моделью

Результаты моделирования при изменении параметров объекта. Результаты исследования эффективности работы адаптивной нейросетевой системы управления (АНСУ) при усредненных постоянных параметрах и изменении параметров объекта сопоставляются с результатами работы построенной адаптивной системы управления с параметрической настройкой (АСУПН) (см. рисунки 16, 17).

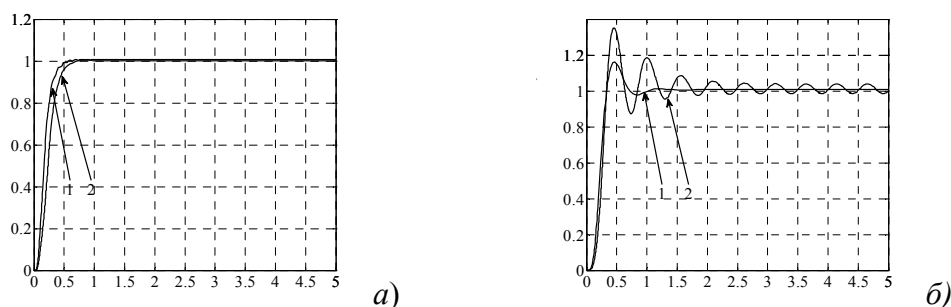


Рисунок 16. Переходные процессы угла поворота нагрузки в АСУПН (кривая 1) и АНСУ (кривая 2) при изменении коэффициента упругости p_2 , $a - p_2 = 3p_{02}$, $b - p_2 = p_{02} / 3$

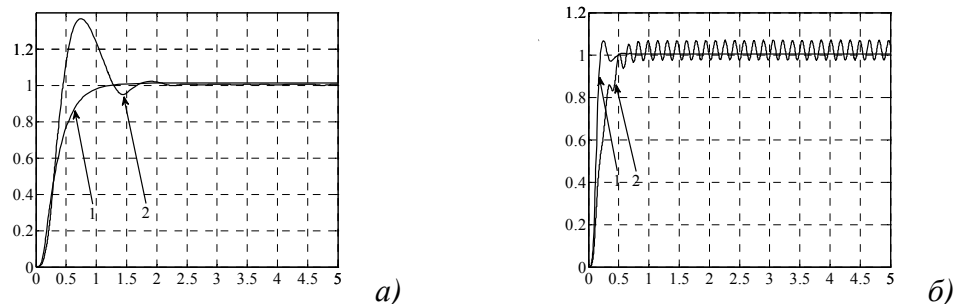


Рисунок 17. Переходные процессы угла поворота нагрузки в АСУПН (кривая 1) и АНСУ (кривая 2) при изменении момента инерции третьего диска J_3 , $a - J_3 = 3J_{03}$, $b - J_3 = J_{03}/3$

Из результатов исследования видно, что, в силу эвристичности нейросетевых 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 нейросетевых систем в решении задач управления приближается к работоспособности адаптивных систем с параметрической настройкой, хотя нейросетевые 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 аналитической и интеллектуальной адаптивных систем управления реальным двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом (см. рисунок 18). 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 экспериментальные 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 аналитической и интеллектуальной адаптивных систем управления.

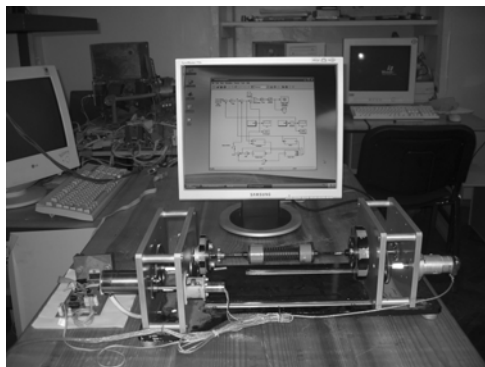


Рисунок 18. Промышленный макет двухмассового упругого электромеханического объекта с программой управления в среде MATLAB – SIMULINK

Разработаны и построены в среде MATLAB – SIMULINK и на базе платы сопряжения Advantech PCI-1711 адаптивная система с параметрической настройкой, гауссовыми функциями

и наблюдателем и нейросетевая система с эталонной моделью и наблюдателем для управления в режиме реального времени двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом (см. рисунок 19). Идентификатор (наблюдатель) по измерению первой скорости ω_1 реального объекта имеет вид

$$\dot{\hat{x}} = \mathbf{A} \hat{x} + \mathbf{l}c^T (\hat{x} - \mathbf{x}) + \mathbf{b}u_{\Sigma}, \quad \mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T, \quad (18)$$

$\mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$ – вектор коэффициентов; \mathbf{x} – вектор состояния объекта; $\hat{\mathbf{x}}$ – вектор состояния наблюдателя.

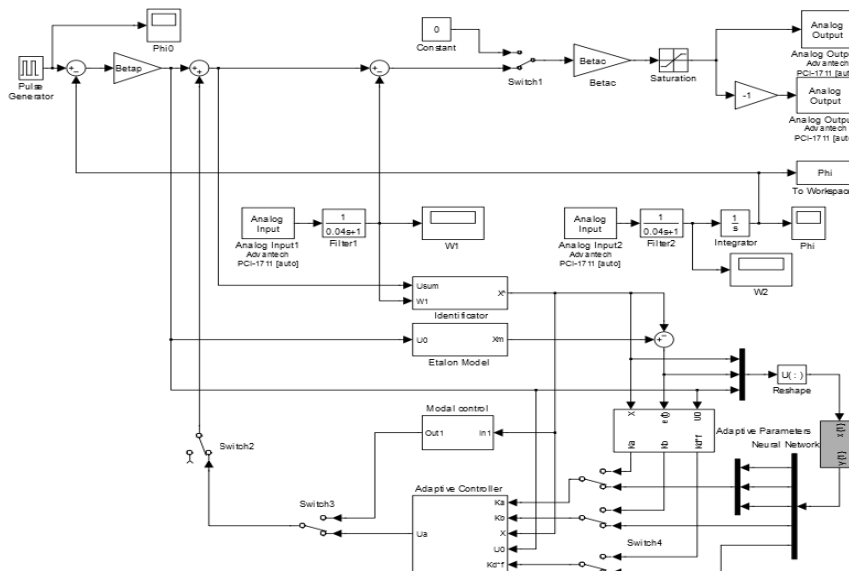


Рисунок 19. Блок-схема моделирования аналитической и нейросетевой адаптивных системы с эталонной моделью для управления реальным двухмассовым упругим электромеханическим объектом

Обучение нейросетевой настройки в адаптивной системе управления реальным двухмассовым упругим электромеханическим объектом с эталонной моделью

В соответствии с числом входных и выходных переменных выберем число нейронов в входном слое, равное 7, в выходном – равное 5. В скрытом слое было выбрано число нейронов, равное 7. В обучении нейронной сети был применен алгоритм обратного распространения ошибки. Структура схемы нейросетевой настройки представлена на рисунке 20.

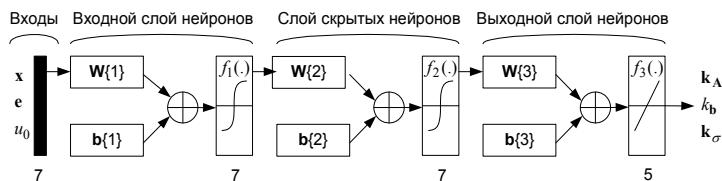


Рисунок 20. Схема нейросетевой настройки в адаптивной системе для управления реальным двухмассовым упругим электромеханическим объектом с эталонной моделью

Результаты экспериментов

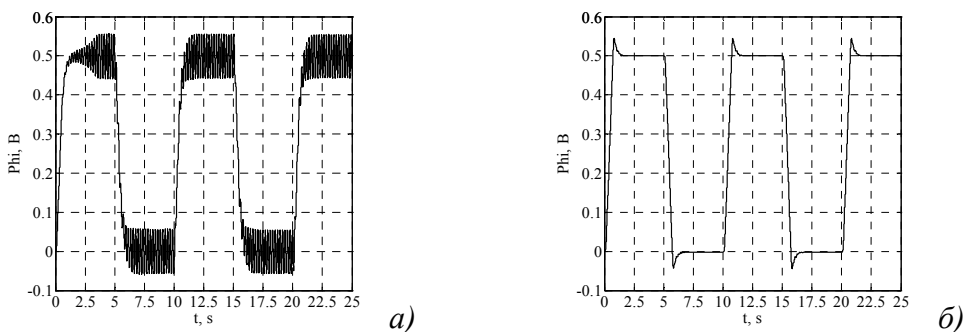


Рисунок 21. Переходные процессы: а – в исходной следящей системе; б – в модальной системе управления

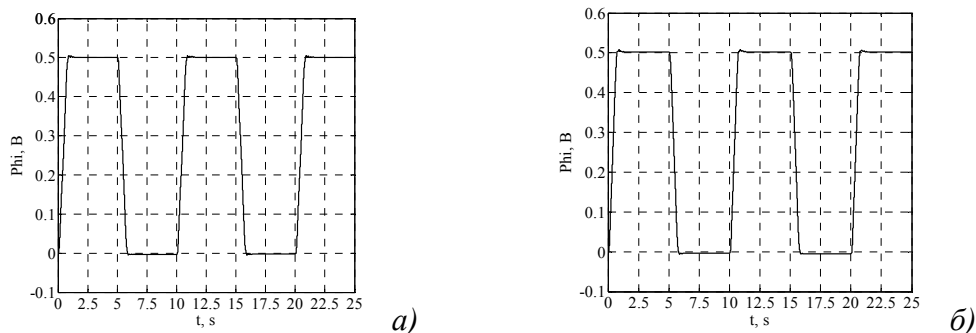


Рисунок 22. Переходные процессы: *a* – в АСУПН ; *б* – в АНСУ

Из показанных графиков на рисунках 21, 22 видно, что в аналитических и нейросетевых адаптивных системах подавлены упругие колебания и одновременно заметно улучшено быстродействие по сравнению с исходной неадаптивной следящей системой. При действии внешней возмущающей силы в исходной следящей системе возникают слабо затухающие упругие колебания, а в аналитических и нейросетевых адаптивных 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. Основные результаты научных исследований, выполненных автором:

1. Разработаны и исследованы аналитические (беспоисковые) адаптивные системы с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью.

2. Разработаны и исследованы адаптивные системы с нейросетевой параметрической настройкой для управления нелинейными объектами с функциональной и параметрической неопределенностью.

3. Разработаны и исследованы аналитические (беспоисковые) адаптивные системы с параметрической настройкой и применением гауссовых функций для управления двух- и трехмассовым упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием. Построены в MATLAB – SIMULINK программы моделирования разработанных систем. Результаты исследований по этим программам подтверждают работоспособность адаптивных систем в задачах подавления упругих колебаний в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

4. Разработаны и исследованы адаптивные системы с нейросетевой параметрической настройкой для управления двух- и трехмассовым упругими электромеханическими объектами с неопределенным описанием. Сформулирован новый метод обучения в режиме «off-line» нейросетевой настройки в рамках беспойсковой адаптивной системы с эталонной моделью.

5. Разработана и исследована в среде MATLAB – SIMULINK и на базе платы сопряжения Advantech PCI-1711 адаптивная система с параметрической настройкой, гауссовыми функциями и наблюдателем для управления в режиме реального времени двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом. Результаты экспериментов различных режимов работы построенной системы по сравнению с работой исходной следящей системы и модальной системы подтверждают хорошую работоспособность беспойсковой адаптивной системы в задачах подавления упругих колебаний, обеспечения повышения быстродействия и точности управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности и влияния внешних возмущений.

6. Разработана и исследована в среде MATLAB – SIMULINK и на базе платы сопряжения Advantech PCI-1711 адаптивная нейросетевая система с эталонной моделью для управления в режиме реального времени двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом. Осуществлено обучение в режиме «off-line» нейросетевой настройки параметров на основе обучающей адаптивной системы. Результаты исследований различных режимов работы показывают практически такую же работоспособность построенной адаптивной нейросетевой системы в задачах подавления упругих колебаний в условиях параметрической и функциональной неопределенности и внешних возмущающих воздействий, как у адаптивной системы с параметрической настройкой и гауссовыми функциями. Все полученные в диссертации результаты направлены на их ближайшее практическое приложение к разработке нового поколения беспойсковых и интеллектуальных адаптивных регуляторов, обеспечивающих значительное повышение устойчивости, точности и быстродействия реальных промышленных электромеханических объектов с упругими свойствами.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В издании, рекомендованном перечнем ВАК:

1. Во Конг Фьонг Прямые адаптивные системы управления линейными электромеханическими объектами с применением нейронных сетей // Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление». СПбГЭТУ «ЛЭТИ». No. 5 – 2010 г. С. 92–98.

В других изданиях:

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

3. Нейронечеткое управление электромеханическими объектами с упругими связями / В. К. Фьонг и Н. К. Чьен // Материалы конференции «VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых». 14 – 17 апреля 2009 года, Санкт-Петербург. С. 93–98.

4. Прямые адаптивные системы управления линейными объектами первого порядка с применением нейронных сетей / Во Конг Фьонг, Нгуен Кьем Чьен и др. // Материалы конференции «63-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета». // 26 января – 6 февраля 2010, Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 179–184.

5. Разработка прямых адаптивных систем с применением нейронных сетей для управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом / Во Конг Фьонг // Материалы конференции «Современные проблемы гуманитарных и естественных наук – третья международная научно-практическая конференция». // 20-25 июня 2010 г., Москва. С. 49–52.

6. Разработка прямых адаптивных систем с применением нейронных сетей для управления трехмассовым упругим электромеханическим объектом/ Во Конг Фьонг, Казаков В.П., Нгуен Кьем Чьен, Шелудько В.Н.//Материалы конференции «Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям»./23-25 июня 2010 г., Санкт – Петербург. С. 64-67.

Подписано в печать . Формат 60*84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. Л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ .

Опечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”

Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5