На правах рукописи

Нгуен Кьем Чьен

РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С УПРУГИМИ И НЕЛИНЕЙНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), на кафедре систем автоматического управления

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Путов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ясаков Геннадий Серафимович,
Военно-морская академия им. Адмирала Флота
Советского Союза Н. Г. Кузнецова,
профессор, заслуженный деятель науки РФ.

доктор технических наук, профессор
Бурдаков Сергей Федорович,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, профессор
кафедры «Механика и процессы управления».

Ведущая организация – **Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики**

Защита диссертации состоится « 30 » мая 2012 года в 15:30 часов на заседании диссертационного совета 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 « 27 » апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.05 М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Теория адаптивных систем возникла в связи с необходимостью решения широкого класса прикладных задач, для которых неприемлемы традиционные методы решения. Качество традиционных методов управления тем выше, чем больше имеется априорной информации о самом объекте и условиях его функционирования. Но на практике довольно трудно создать точное математическое описание объекта управления. Кроме того, характеристики объекта в процессе функционирования могут существенно изменяться. В этих условиях традиционные методы зачастую оказываются неприемлемыми или дают неудовлетворительные результаты. Таким образом, возникает необходимость в построении управляющих систем, не требующих полной априорной информации об объекте и условиях его функционирования. Подобные задачи появляются при создании высокоточных систем наведения, бортовых систем управления и навигации в летательных аппаратах, систем управления различными механическими объектами манипуляционных роботов, металлообрабатывающих станков, антенных установок, подвижных объектов различного назначения и т. д. Эффект приспособления к условиям функционирования в адаптивных системах обеспечивается за счет накопления и обработки информации о поведении объекта в процессе его работы. Это позволяет снизить влияние неопределенности на качество управления, компенсируя недостаток априорной информации на этапе проектирования. В такой постановке актуальными методами решения задач управления механическими объектами являются адаптивные методы, среди которых беспоисковые аналитические адаптивные системы относятся к интенсивно развиваемому направлению и рассчитаны на реализацию средствами современной вычислительной техники**.**

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, являются актуальными и занимают одно из передовых мест по числу применений для высокотехнологичных и прецизионных установок в промышленности. Особенно актуальными являются задачи принудительного гашения упругих колебаний, вызывающих разрушительные явления в механических объектах и препятствующих любым попыткам реализовать в них управление с предельным быстродействием.

В диссертации, задачи, связанные с разработкой эффективных систем автоматического управления объектами с априорно неопределенным и сложным описанием, неполными измерениями, быстро (и в широких пределах) изменяющимися параметрами и внешними возмущениями, решаются в рамках беспоисковых (прямых и непрямых) 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 Борцов Ю. А., Земляков С. Д., Мирошник И. В., Петров Б. Н., Полушин И. Г., Поляхов Н. Д., Путов В. В., Санковский Е. А., Солодовников В. В., Срагович В. Г., Тимофеев А. В., Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Ядыкин И. Б., Landau T. D., Lindorff D. P., Narendra K. S., Ortega R., Slotine J. и др.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование непрямых адаптивных систем с параметрически настраиваемыми моделями для управления нелинейными нестационарными объектами; проведение сравнительного анализа эффективности работы прямых (с эталонной моделью) и непрямых (с настраиваемой моделью) адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления электроприводами постоянного и переменного тока с упругими и нелинейными свойствами.

В диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование общего подхода к построению непрямых адаптивных систем управления нелинейными нестационарными объектами, базирующихся на приближенном описании неопределенных нелинейных объектов дифференциальными уравнениями с мажорирующими функциями в правых частях.

2. Разработка и исследование систем адаптивной идентификации и непрямых адаптивных систем с параметрически настраиваемыми моделями для управления нелинейными нестационарными объектами первого и второго порядков.

3. Разработка и исследование прямых и непрямых адаптивных систем с параметрической

настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления электроприводами постоянного тока с упругими и нелинейными свойствами.

4. Разработка и исследование прямых и непрямых адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления асинхронными электроприводами с упругими и нелинейными свойствами.

5. Проведение сравнительного анализа эффективности работы прямых и непрямых адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления электроприводами постоянного и переменного тока с упругими и нелинейными свойствами.

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; компьютерных методов исследования на базе стандартных программных продуктов. Проверка эффективности полученных теоретических результатов производится в процессе моделирования с помощью среды Matlab-Simulink.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Методика построения непрямых адаптивных систем управления нелинейными нестационарными объектами с мажорирующими функциями.

2. Системы адаптивной идентификации и непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления нелинейными нестационарными объектами первого и второго порядков.

3. Прямые и непрямые адаптивные системы с параметрической настройкой, настраиваемой моделью, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления электроприводами постоянного тока с упругими и нелинейными свойствами.

4. Прямые и непрямые адаптивные системы с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления асинхронными электроприводами с упругими и нелинейными свойствами.

5. Результаты сравнительного исследования эффективности работы прямых и непрямых адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления электроприводами постоянного и переменного тока с упругими и нелинейными свойствами.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Рассмотренная в работе методика построения полных и упрощенных структур параметрических алгоритмов идентификации и непрямого адаптивного управления с параметрически настраиваемыми моделями для нелинейных нестационарных объектов с мажорирующими функциями отличается от известной методики тем, что в ней используются функции нелинейной параметризации, мажорирующие неизвестные нелинейные правые части дифференциальных уравнений управляемого объекта.

2. Разработанные и исследованные системы адаптивной идентификации и непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления нелинейными нестационарными объектами первого и второго порядков позволяют исследовать работоспособность и эффективность работы предлагаемых непрямых адаптивных систем.

3. Разработана новая непрямая адаптивная система управления электроприводами постоянного тока с упругими и нелинейными свойствами и неполными измерениями, характеризующаяся введением наблюдателей и мажорирующих функций, подавляющих влияние нелинейных упругих деформаций с неопределенными параметрами.

4. Впервые разработаны прямые и непрямые адаптивные системы с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателями для управления асинхронными электроприводами с упругими и нелинейными свойствами, подавляющими влияния нелинейной электромагнитной динамики электроприводов и нелинейных упругих деформаций с неопределенными параметрами.

5. Проведенное сравнительное исследование эффективности работы прямых и непрямых

адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателями для управления электроприводами постоянного и переменного тока с упругими и нелинейными свойствами позволяет обосновать выбор беспоисковых адаптивных регуляторов в задачах подавления упругих колебаний и повышения точности управления.

Достоверность научных и практических результатов. Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации обусловливается корректным использованием методов исследования; применением современных компьютерных средств и программных комплексов, а также результатами экспериментального исследования построенных в работе аналитических непрямых и прямых адаптивных систем управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом в лабораторных условиях.

Значимость полученных результатов для теории и практики:

Теоретическая значимость работы обусловлена ее новизной и заключается в развитии актуального научного направления, связанного с построением непрямых адаптивных систем управления классом нелинейных объектов. Исследование прямых и непрямых адаптивных алгоритмов для асинхронных электроприводов обеспечивает возможности расширения множества исследуемых объектов, имеющих довольно сложное математическое описание, путем применения приведенной методики построения прямых и непрямых адаптивных систем управления с алгоритмами параметрической настройки и мажорирующими функциями для электромеханических объектов с нелинейными и упругими свойствами.

Практическая ценность результатов работы:

- созданы полезные в инженерном проектировании и легко поддающиеся компьютеризации методики расчета семейства реализуемых аналитических прямых и непрямых адаптивных систем управления электромеханическими объектами с упругими свойствами, применимые в условиях ограниченного объема априорных сведений об объектах (паспортных данных исполнительных электроприводов, неопределенности изменения учитываемой резонансной частоты и массоинерционных параметров), их нелинейности и неполной измеримости;

- разработаны и отлажены на базе пакета MATLAB прямые и непрямые адаптивные системы управления для класса двухмассовых упругих электромеханических объектов, применимые для использования в качестве основы НИОКР и внедрения в конкретные изделия.

Внедрение результатов работы. Теоретические положения, методики расчета и конкретные структуры семейства адаптивных систем использованы в 6 НИР и НИОКР, выполненных при участии автора в течение 2010 – 2012 г.г., источниками финансирования которых, являлись федеральный бюджет, гранты РФФИ, министерства образования и науки, внебюджетные средства.

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе в дисциплине “Методы проектирования систем управления многостепенными механическими объектами с упругими деформациями” магистерской программы “Системы управления и автоматизации промышленных мехатронных комплексов и подвижных объектов”.

Апробация работы. Основные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на шести международных и всероссийских научно-технических конференциях: XI, XIII конференциях молодых ученных «Навигация и управление движением» (2010, 2011 гг., ФГУП ВНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург); VI Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (14–17 апреля 2009 года – СПб: СПбГУ ИТМО); XIII международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (июнь 2010, г. Санкт Петербург); внутривузовских научно-технических конференциях в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2010 и 2012 гг., а также научных семинарах кафедры САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах, в том числе 8 статей (из них 6 статей – в изданиях, включенных в перечень изданий, рекомендованных ВАК) и 6 работ в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций. Кроме того, одна статья принята к опубликованию в издание, входящее в перечень ВАК и находится в печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Основный материал диссертации изложен на 147 станицах машинописного текста, включает 97 рисунков и содержит список литературы из 57 наименований, среди которых 50 отечественных и 7 иностранных источников.

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 после краткого введения рассматриваются математические модели нелинейных нестационарных объектов в виде обыкновенных векторных дифференциальных уравнений, описанных в форме Коши. Определяются ограничения, обеспечивающие применимость методов синтеза адаптивных систем, базирующихся на функциях Ляпунова и свойствах асимптотической устойчивости и диссипативности решений, в рамках которых определена постановка задачи синтеза систем адаптивного управления. Построены новые классы полных и упрощенных непрямых адаптивных систем с параметрически настраиваемыми моделями, основанными на методе мажорирующих функций.

Рассмотрим широкий класс нелинейных нестационарных объектов в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x},t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x},t)\mathbf{u}(\mathbf{x},t), \qquad (1)$$

где $\mathbf{x} = [x_1 ... x_n]^{\mathrm{T}}$ – вектор состояния; $\mathbf{u} = [u_1 ... u_m]^{\mathrm{T}}$ – вектор входных воздействий, $m < n$, t – время; $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$ – $n \times n$-мерная функциональная матрица с элементами – скалярными функциями $a_{ij}(\mathbf{x},t),\ i,j = \overline{1,n}$; $\mathbf{B}(\mathbf{x},t)$ – $n \times m$-мерная матрица скалярных функций $b_{ij}(\mathbf{x},t),\ i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,m}$, непрерывных и глобально ограниченных в области $\mathbf{\Gamma}_t$:

$$\mathbf{\Gamma}_t = \{\mathbf{x},t : \|\mathbf{x}\| \le \eta; \eta = const(>0) \text{ или } \eta = +\infty; t \ge t_0; t_0 \in R, \mathbf{u}(\cdot) \in \mathbf{U}\}$$

Рассмотрим вначале линеаризованное стационарное приближение объекта (1) в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A_0}\mathbf{x} + \mathbf{B_0}\mathbf{u}(t);\ \mathbf{u}(t) = \mathbf{u_A}(t) + \mathbf{u^0}(t), \qquad (2)$$

где $\mathbf{A_0}, \mathbf{B_0}$ – управляемая пара постоянных неизвестных матриц; $\mathbf{u^0}(t) \in R^m$ – программное управление; $\mathbf{u_A}(t)$ – искомое непрямое адаптивное управление, подлежащее определению. Тогда для построения непрямых адаптивных систем управления классом линейных стационарных объектов введем векторно-матричное дифференциальное уравнение настраиваемой модели вида

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A_M}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{K}}_\mathbf{A}(t)\mathbf{x} + [\mathbf{B_M} + \tilde{\mathbf{K}}_\mathbf{B}(t)]\mathbf{u}(t), \qquad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{x}} \in R^n$ – n-мерный вектор состояния настраиваемой модели (3); $\tilde{\mathbf{K}}_\mathbf{A}(t), \tilde{\mathbf{K}}_\mathbf{B}(t)$ – $n \times n$- и $n \times m$-мерные матрицы настраиваемых параметров; введенная в уравнение (3) пара постоянных матриц $\mathbf{A_M}, \mathbf{B_M}$ – полностью управляема ($\mathbf{A_M}$ – гурвицева) и характеризует желаемые свойства траекторий проектируемой непрямой адаптивной системы, описываемых дифференциальным уравнением эталонной модели вида

$$\dot{\mathbf{x}}_\mathbf{M} = \mathbf{A_M}\mathbf{x_M} + \mathbf{B_M}\mathbf{u^0}(t). \qquad (4)$$

Целью непрямого адаптивного управления объекта (2) является сближение траекторий проектируемой адаптивной системы и траекторий эталонной модели (4), выражаемое предельным соотношением $\lim\limits_{t\to+\infty} Q_\mathbf{e}(t) = 0$ для целевого функционала вида $Q_\mathbf{e}(t) = 0.5\mathbf{e}^\mathbf{T}(t)\mathbf{P}\mathbf{e}(t)$, где $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x_M}(t)$; матрица $\mathbf{P}$ является единственным, в силу гурвицевости $\mathbf{A_M}$, решением уравнения Ляпунова вида $\mathbf{A_M^T}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A_M} = -\mathbf{G}$, $\mathbf{P} = \mathbf{P^T} > 0$; $\mathbf{G}$ – произвольная матрица, $\mathbf{G} = \mathbf{G^T} > 0$.

Кроме того, в рамках рассматриваемой непрямой адаптивной системы должна достигаться и цель адаптивной идентификации, состоящая в асимптотическом сближении траекторий настраиваемой модели (3) с траекториями объекта (2) и, задавая предельное соотношение $\lim\limits_{t\to+\infty} Q_\varepsilon(t) = 0$ для целевого функционала вида $Q_\boldsymbol{\varepsilon}(t) = 0.5\boldsymbol{\varepsilon}^\mathbf{T}\mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}$, где $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)$, определим вытекающие из поставленных целей алгоритмы настройки в виде матричных дифференциальных уравнений

$$\left.\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{A}}(t)&=\mathbf{\Gamma_A P\varepsilon x^{т}};\\ \dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{B}}(t)&=\mathbf{\Gamma_B P\varepsilon u^{0т}},\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}(t)=\mathbf{x}(t)-\tilde{\mathbf{x}}(t)$ – переменная ошибки идентификации; $\mathbf{\Gamma_A}$, $\mathbf{\Gamma_B}$ – произвольные $n\times n$- и $n\times m$-мерные симметричные (в частности, диагональные) положительно определенные матрицы.

Структура непрямого адаптивного закона имеет вид

$$\mathbf{u_A}(t)=-\mathbf{B_м^+}\left[\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t)\mathbf{x}+\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{B}}(t)\mathbf{u}(t)\right], \quad (6)$$

где $m\times n$-мерная матрица $\mathbf{B_м^+}=\left(\mathbf{B_м^т B_м}\right)^{-1}\mathbf{B_м^т}$ есть псевдообращение прямоугольной $n\times m$-мерной матрицы $\mathbf{B_м}$, $\mathbf{B_м^+ B_м}=\mathbf{I}_m$ (здесь $\mathbf{I}_m$ – единичная матрица порядка m).

Введем матричные функции параметрических рассогласований вида

$$\tilde{\boldsymbol{\delta}}_{\mathbf{A}}(t)=\mathbf{A_0}-\mathbf{A_м}-\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t);\ \tilde{\boldsymbol{\delta}}_{\mathbf{B}}(t)=\mathbf{B_0}-\mathbf{B_м}-\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{B}}(t). \quad (7)$$

В диссертации показано, что тривиальное решение $\mathbf{e}(t)=0;\ \boldsymbol{\varepsilon}(t)=0;\ \tilde{\boldsymbol{\delta}}_{\mathbf{A}}(t)=0;\ \tilde{\boldsymbol{\delta}}_{\mathbf{B}}=0$ непрямой адаптивной системы (2), (3), (5), (6) экспоненциально устойчиво по переменным ошибок $\mathbf{e}(t)$, $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ и просто устойчиво (по Ляпунову) по параметрическим рассогласованиям (7), если выполняются условия согласованности вида $\mathbf{B_м B_м^+}(\mathbf{A_0}-\mathbf{A_м})=(\mathbf{A_0}-\mathbf{A_м});\ \mathbf{B_м B_м^+ B_0}=\mathbf{B_0}$.

Далее в диссертации показано, что регуляризация интегральных алгоритмов (5), например, линейной обратной связью по настраиваемым параметрам, к виду

$$\left.\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{A}}(t)&=\mathbf{\Gamma_A P\varepsilon x^{т}}-\mathbf{\Lambda_A}\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t);\\ \dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{B}}(t)&=\mathbf{\Gamma_B P\varepsilon u^{0т}}-\mathbf{\Lambda_B}\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{B}}(t),\end{aligned}\right\}$$

где $\mathbf{\Lambda_A}, \mathbf{\Lambda_B}$ – положительно определенные матрицы, обеспечивает экспоненциальную диссипативность (сходимость к некоторым предельным множествам, содержащим тривиальные решения) процессов идентификации и адаптации непрямой системы по всему ансамблю переменных ошибок $\mathbf{e}(t)$, $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$, $\tilde{\boldsymbol{\delta}}_{\mathbf{A}}(t)$, $\tilde{\boldsymbol{\delta}}_{\mathbf{B}}$, которая сохраняется и в условиях флуктуаций параметров неизвестного объекта, т. е. в случае множества линейных нестационарных объектов с ограниченными (по норме) неизвестными матрицами – фунциями времени вида $\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{A}(t)\mathbf{x}+\mathbf{B}(t)\mathbf{u}(\mathbf{x},t)$.

Далее в диссертации снимаются ограничивающие условия линейности и стационарности и для класса нелинейных нестационарых объектов вида (1) рассматривается представление неопределенных правых частей дифференциальных уравнений объекта (1) с помощью функций бесконечного роста, сравнимых с ростом степенных функций переменных состояния объекта. Им сопоставляется класс известных функций бесконечного роста, обладающих мажорирующими свойствами, и излагается способ построения непрямых адаптивных систем с алгоритмами параметрической настройки, названный методом мажорирующих функций. Из-за ограниченности объема в автореферате рассматриваются только способы построения упрощенных непрямых адаптивных систем при введении мажорирующих функций старших или превосходящих степеней роста правых частей математических моделей объектов в структуре адаптивной системы, которые применятся в следующих главах диссертации. Непрямая адаптивная система состоит из настраиваемой модели

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}=\mathbf{A_м}\tilde{\mathbf{x}}+\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t)\mathbf{diag}\left\{f_p(x_r)\right\}_1^n\mathbf{x}+[\mathbf{B_м}+\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{B}}(t)]\mathbf{u}(t) \quad (8)$$

с алгоритмами настройки вида

$$\left.\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{A}}(t)&=\mathbf{\Gamma_A P\varepsilon x^{т}diag}\left\{f_p(x_r)\right\}_1^n-\mathbf{\Lambda_A}\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t);\\ \dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{B}}(t)&=\mathbf{\Gamma_B P\varepsilon u^{0т}}-\mathbf{\Lambda_B}\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{B}}(t),\ \boldsymbol{\varepsilon}=\mathbf{x}-\tilde{\mathbf{x}};\ r=\overline{1,n},\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

и адаптивной составляющей закона управления, выраженной в виде

$$\mathbf{u_A}(t)=-\mathbf{B_м^+}\left\{\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t)\mathbf{diag}\left\{f_p(x_r)\right\}_1^n\mathbf{x}+\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{B}}(t)\mathbf{u}(t)\right\}, \quad (10)$$

где $\mathbf{diag}\{f_p(x_r)\}_1^n = \mathbf{diag}\{f_p(x_1),\ f_p(x_2), ..., \ f_p(x_n)\}$ – диагональная функциональная матрица порядка n, составленная из мажорирующих функций роста старших степеней роста p всех переменных состояния $x_r,\ r = \overline{1, n}$.

Во второй главе рассматриваются возможности практического применения описанных в первой главе методик построения непрямых адаптивных систем с параметрически настраиваемыми моделями для управления нелинейными нестационарными объектами на примерах объектов первого и второго порядков.

1. Непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления нелинейными нестационарными объектами первого порядка. Рассмотрим нелинейный нестационарный объект управления первого порядка, уравнение которого имеет вид

$$\dot{x} = a(x, t)x + b(x, t)u(t);\ u(t) = u^0(t) + u_a(t), \tag{11}$$

где $x \in R$ – переменная состояния объекта; $a(x, t), b(x, t)$ – неизвестные параметры; $u^0(t),\ u_a(t) \in R$ – программное и адаптивное управления соответственно.

Пусть желаемые показатели адаптивной системы управления нелинейным нестационарным объектом первого порядка характеризуются поведением эталонной модели вида $\dot{x}_{\text{М}} = a_{\text{М}} x_{\text{М}} + b_{\text{М}} u^0(t)$, где $a_{\text{М}}, b_{\text{М}}$ – постоянные числа, $a_{\text{М}} < 0$. Тогда непрямая адаптивная система с параметрически настраиваемой моделью для управления объектом первого порядка (11) состоит из настраиваемой модели, записанной согласно (3) в виде $\dot{\tilde{x}} = a_{\text{М}}\tilde{x} + \tilde{k}_a(t)x + (\tilde{k}_b(t) + b_{\text{М}})u(t)$, адаптивного закона $u_a(t) = -b_{\text{М}}^{+}[\tilde{k}_a(t)x + \tilde{k}_b(t)u(t)]$ и алгоритмов параметрической настройки, имеющих вид

$$\left.\begin{aligned} \dot{\tilde{k}}_a(t) &= \gamma_a \varepsilon x - \alpha_a \tilde{k}_a(t); \\ \dot{\tilde{k}}_b(t) &= \gamma_b \varepsilon u^0 - \alpha_b \tilde{k}_b(t), \end{aligned}\right\}$$

где $\tilde{k}_a(t), \tilde{k}_b(t)$ – настраиваемые параметры; $\gamma_a, \alpha_a, \gamma_b, \alpha_b$ – произвольные коэффициенты параметрической настройки.

2. Непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления нелинейными нестационарными объектами второго порядка. Рассмотрим нелинейный нестационарный объект второго порядка с одним входом, описанный в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{b}(\mathbf{x}, t)[u^0(t) + u_{\mathbf{A}}(t)], \tag{12}$$

где $\mathbf{x} \in R^2$ – двухмерный вектор переменных состояния нелинейного объекта второго порядка; $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ – 2×2-мерная матрица с элементами $a_{ij}(\mathbf{x}, t),\ i, j = \overline{1,2}$; $\mathbf{b}(\mathbf{x}, t)$ – двухмерный вектор скалярных функций $b_i(\mathbf{x}, t),\ i = \overline{1,2},$ непрерывных и глобально ограниченных в области $\mathbf{\Gamma}_t$, т. е. $\left\| a_{ij}(\mathbf{x}, t) \right\| < p,\ p = const\ (> 0)$, $\left\| b_i(\mathbf{x}, t) \right\| < q,\ q = const\ (> 0)$ для любых $\mathbf{x}, t$ из области Γ_t; $u^0(t),\ u_{\mathbf{A}}(t) \in R^1$ – программное и адаптивное управления соответственно.

Пусть желаемые показатели адаптивной системы управления нелинейным нестационарным объектом второго порядка характеризуются поведением эталонной модели вида $\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{м}} = \mathbf{A}_{\mathbf{м}}\mathbf{x}_{\mathbf{м}} + \mathbf{b}_{\mathbf{м}} u^0(t)$, где $\mathbf{A}_{\mathbf{м}}$ и $\mathbf{b}_{\mathbf{м}}$ – 2×2 и 2×1-мерные постоянные матрицы, пара $\mathbf{A}_{\mathbf{м}}, \mathbf{b}_{\mathbf{м}}$ полностью управляема ($\mathbf{A}_{\mathbf{м}}$ – гурвицева).

Построим обобщенную схему непрямой адаптивной системы с параметрически настраиваемой моделью для управления нелинейным нестационарным объектом второго порядка (12), состоящей из настраиваемой модели вида $\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_{\mathbf{м}}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t)\mathbf{x} + [\tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t) + \mathbf{b}_{\mathbf{м}}]u(t)$, адаптивного закона $u_{\mathbf{A}}(t) = -\mathbf{b}_{\mathbf{м}}^{+}\left[\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t)\mathbf{x} + \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t)u(t)\right]$, где $\mathbf{b}_{\mathbf{м}}^{+} = \left(\mathbf{b}_{\mathbf{м}}^{\mathbf{T}}\mathbf{b}_{\mathbf{м}}\right)^{-1}\mathbf{b}_{\mathbf{м}}^{\mathbf{T}}$ и алгоритмов параметрической настройки в виде

$$\left.\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{A}}(t) &= \gamma_{\mathbf{A}}\mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{x}^{\mathrm{T}} - \alpha_{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t);\\ \dot{\tilde{\mathbf{k}}}_{\mathbf{b}}(t) &= \gamma_{\mathbf{b}}\mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}u^{0} - \alpha_{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t),\end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

где $\tilde{\mathbf{x}} \in R^2$ – 2×1-мерный вектор переменных состояния настраиваемой модели; $\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t), \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t)$ – 2×2 и 2×1-мерные матрицы настраиваемых параметров; $\gamma_{\mathbf{A}}, \alpha_{\mathbf{A}}, \gamma_{\mathbf{b}}, \alpha_{\mathbf{b}}$ – произвольные коэффициенты параметрической настройки; $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{x}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)$ – ошибка идентификации.

В диссертации приведены расчеты и исследование непрямых адаптивных систем с параметрически настраиваемыми моделями для управления объектами первого и второго порядков на шести примерах (рассмотрены линейные стационарные, нелинейные стационарные и линейные нестационарные объекты). В автореферате приводятся два примера, результаты моделирования которых представлены на рисунках 1 и 2.

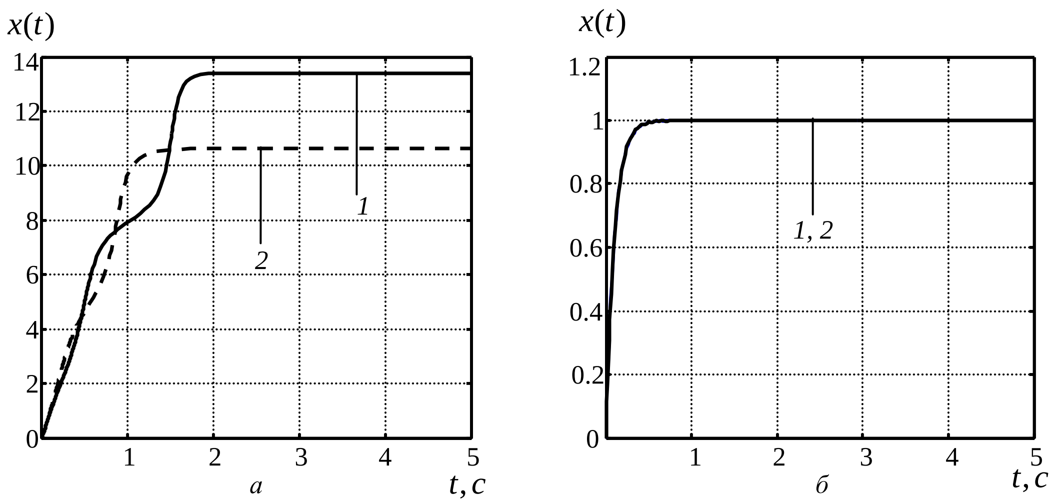

Рисунок 1 — Переходные процессы непрямой адаптивной системы с параметрически настраиваемой моделью для управления нелинейным стационарным объектом первого порядка $\dot{x} = ax\sin(x) + bu(t)$ (кривая 1 – при $a = -1,\ b = 10$; кривая 2 – при $a = 1,\ b = 10$): *а* – без адаптивного управления; *б* – с непрямым адаптивным управлением

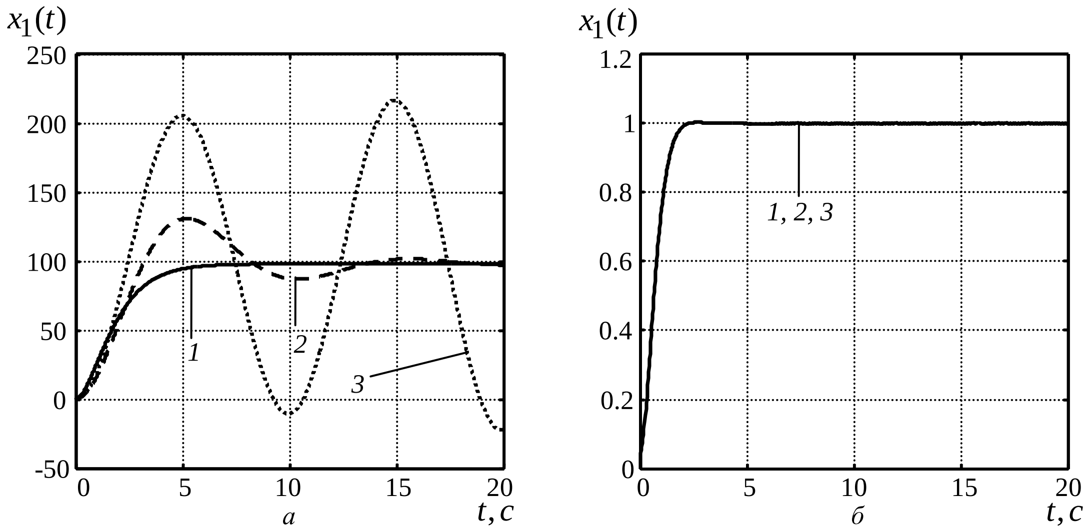

Рисунок 2 — Переходные процессы непрямой адаптивной системы с параметрически настраиваемой моделью для управления линейным стационарным объектом второго порядка $\dot{x}_1 = x_2;\ \dot{x}_2 = -a_1x_1 - a_2x_2 + bu$ (кривая *1* – при $a_1 = -1.02,\ a_2 = -2.01,\ b = 100$; кривая *2* – при $a_1 = -0.408,\ a_2 = -0.42,\ b = 40$, и кривая *3* – при $a_1 = -0.4,\ a_2 = 0.02,\ b = 40$): *а* – без адаптивного управления; *б* – с непрямым адаптивным управлением

Результаты исследования и моделирования подтверждают высокую работоспособность непрямых адаптивных систем в задачах повышения быстродействия и точности управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

В третьей главе рассматриваются вопросы построения непрямых адаптивных систем управления электроприводами постоянного тока с нелинейными упругими свойствами, базирующихся на приближенном описании неопределенных нелинейных объектов дифференциальными уравнениями с мажорирующими функциями в правых частях, описанных в первой главе. С использованием пакета Matlab-Simulink проводится сравнительный анализ непрямых и прямых адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления рассматриваемыми объектами на примерах двухконтурной и трехконтурной следящих систем. В автореферате в связи с ограниченным объемом рассматривается построение адаптивных систем управления приведенным объектом в виде трехконтурной следящей системы.

1. Математическая модель электропривода постоянного тока с нелинейными упругими свойствами и подчиненным управлением. Рассмотрим электропривод постоянного тока с нелинейными упругими свойствами, где в качестве первого диска (момент инерции J_1) принимается исполнительный привод с частью жестко соединенных с ним инерционных звеньев механизма, а второй диск (момент инерции J_2) учитывает остальные инерционные части механической конструкции, приведенные к вращению исполнительного привода. Считаем, что диски J_1 и J_2 соединены упругой связью с коэффициентом упругости p, имеющей зазор в сочленении, где δ – угловая величина, равная половине ширины зазора (рисунок 3).

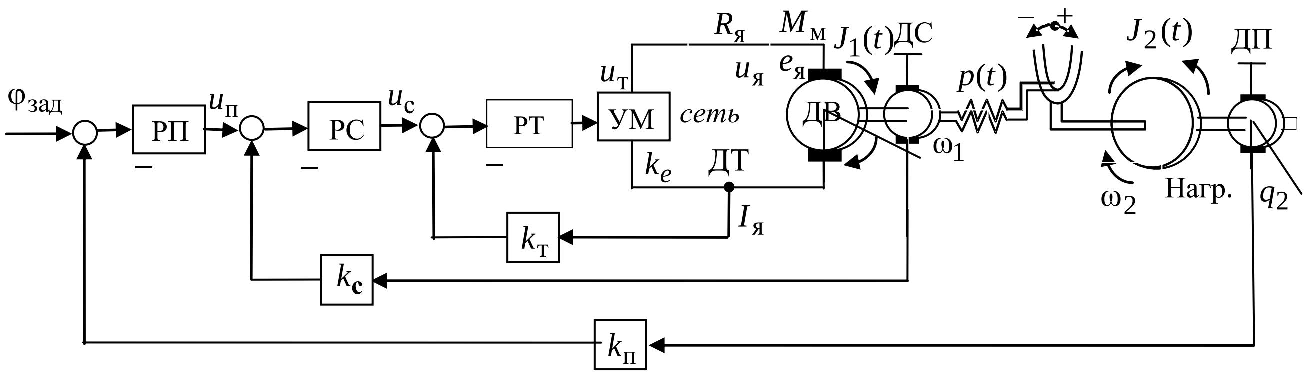

Рисунок 3 – Двухмассовый нелинейный упругий электромеханический объект с трехконтурным подчиненным управлением

Примем в качестве исходного электропривод постоянного тока с нелинейными упругими свойствами и зазором, замкнутый по скорости ω_1 с контурным П-регулятором и являющийся внутренним контуром трехконтурной электромеханической системы, замкнутой по положению q_2.

Математическое описание данного объекта представляется системой дифференциальных уравнений четвертого порядка, записанных в так называемой скоростной форме уравнений упругого объекта в следующем виде (контур положения по переменной q_2 разомкнут):

$$\left.\begin{aligned} &\dot{\omega}_2 = J_2^{-1} f_у ;\ \dot{\omega}_1 = -J_1^{-1} f_у + J_1^{-1} k_м I_я ; \\ &\dot{m}_у = p(\omega_1 - \omega_2);\ \dot{I}_я = L_я^{-1}[-R_я I_я - k_e \omega_1 + k_у u_т]; \\ &u_т = \beta_т (u_с - k_т I_я);\ u_с = \beta_с (u_\Sigma - k_с \omega_1); \\ &u_\Sigma = u^0 + u_{\mathbf{A}} ;\ u^0 = u_п , \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

где $\omega_1 = \dot{q}_1, \omega_2 = \dot{q}_2$ – угловые скорости первого и второго дисков; $m_у$ – упругий момент, возникающий при деформации в упругой связи при отсутствии зазора; $I_я$ – ток якоря; $L_я, R_я$ – индуктивность и активное сопротивление якорной цепи двигателя; $k_т$, $k_с$, $k_п$ – постоянные коэффициенты передачи датчиков обратных связей по току ДТ, скорости ДС, положению ДП; k_e, $k_м$ – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными данными электрической машины; $k_у$– коэффициент передачи усилителя мощности УМ; $u_т, u_с, u_п$ – выходные напряжения контурных регуляторов тока РТ, скорости РС и положения РП; $\beta_т, \beta_с$ – коэффициенты передачи РТ, РС; u^0 – известное программное воздействие; $u_{\mathbf{A}}$ – адаптивное управление, подлежащее определению; $M_{\text{м}} = k_{\text{м}} I_{\text{я}}$ – электромагнитный момент электрической машины; $u_{\text{я}} = k_{\text{у}} u_{\text{т}}$ – напряжение якоря; а $f_{\text{у}}$ – упругий момент, описываемый при учете зазора 2δ в упругой связи.

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 $a_1 = J_{02}^{-1}$; $a_2 = p_0$; $a_3 = J_{01}^{-1} k_{\text{м}}$; $a_4 = -J_{01}^{-1}$; $b = L_{\text{я}}^{-1} k_{\text{у}} \beta_{\text{т}} \beta_{\text{с}}$; $a_5 = -L_{\text{я}}^{-1} k_{\text{у}} \beta_{\text{т}} k_{\text{с}} \beta_{\text{с}} - L_{\text{я}}^{-1} k_e$; $a_6 = -k_{\text{у}} \beta_{\text{т}} k_{\text{т}} L_{\text{я}}^{-1} - L_{\text{я}}^{-1} R_{\text{я}}$. Тогда уравнения линеаризованного объекта (14) имеют следующий векторно-матричный вид

$$\left.\begin{aligned} &\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b} u_{\Sigma}; \quad y = \mathbf{c}^{\text{т}} \mathbf{x}; \\ &\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & a_5 & a_6 \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \ \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_2 \\ m_{\text{у}} \\ \omega_1 \\ I_{\text{я}} \end{bmatrix}, \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

где $\mathbf{x}$ – вектор состояния линеаризованного объекта (15); $y = \mathbf{c}^{\text{т}} \mathbf{x}$ – уравнение измерения; $c = k_{\text{с}}$ (здесь доступной измерению с помощью датчика скорости ДС считается первая скорость ω_1).

На основе полученного линеаризованного объекта (15) с усредненными параметрами составляются методики расчета модального управления, эталонной модели и наблюдателя состояния (при измерении угловой скорости электропривода) для электропривода постоянного тока с нелинейными упругими свойствами. Эти структуры используются в дальнейших построениях аналитических адаптивных систем.

Модальный регулятор для линеаризованного объекта имеет вид $u_{\text{л}} = \mathbf{k}^{\mathbf{T}} \mathbf{x}$, где $u_{\text{л}}$ – модальное управление; $\mathbf{k} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]^{\text{т}}$ – вещественный вектор коэффициентов обратных связей, рассчитываемых из условия обеспечения любого наперед заданного желаемого распределения всех корней характеристического уравнения замкнутой системы.

В качестве эталонной модели выбирается замкнутая система линеаризованного объекта с модальным управлением вида (4), где $\mathbf{A}_{\text{м}} = \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{k}^{\mathbf{T}}$; $\mathbf{b}_{\text{м}} = \mathbf{b}$.

Наблюдатель состояния электропривода постоянного тока с нелинейными упругими свойствами для трехконтурной следящей системы (при измерении первой скорости ω_1 расчетного объекта (15)) имеет вид

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{l}\mathbf{c}^{\text{т}}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) + \mathbf{b} u_{\Sigma}, \tag{16}$$

где $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\omega}_2 \quad \hat{m}_{\text{у}} \quad \hat{\omega}_1 \quad \hat{I}_{\text{я}}]^{\text{т}}$ – оценки переменных состояния объекта (15); $\mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]^{\text{т}}$ – вектор коэффициентов обратных связей наблюдателя (16) по ошибке наблюдения измеряемой угловой скорости ω_1 ($c = k_{\text{с}}$). На базе полученных структур далее строятся прямая и непрямая беспоисковые адаптивные системы электропривода постоянного тока с упругой связью.

2. Прямая адаптивная система с параметрической настройкой, эталонной моделью и мажорирующими функциями для управления электроприводом постоянного тока с нелинейными упругими свойствами и учетом зазора в упругой связи. Такая система состоит из объекта (15), наблюдателя (16), эталонной модели (4), адаптивного закона вида

$$u_{\mathbf{A}}(t) = \mathbf{k}_{\mathbf{A}}^{\mathbf{T}}(t) \operatorname{diag}\{1, \hat{m}_{\text{у}}, 1, 1\} \hat{\mathbf{x}} + k_{\mathbf{b}}(t) u^0(t), \tag{17}$$

и алгоритмов настройки параметров, выражающихся дифференциальными управлениями вида

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{k}}_{\mathbf{A}}(t) = -\gamma_{\mathbf{A}} \mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}} \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}} \hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{T}} \operatorname{diag}\{1, \hat{m}_{\text{у}}, 1, 1\} - \lambda_{\mathbf{A}} \mathbf{k}_{\mathbf{A}}(t); \\ \dot{k}_{\mathbf{b}}(t) = -\gamma_{\mathbf{b}} \mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}} \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}} u^{0\text{т}}(t) - \lambda_{\mathbf{b}} k_{\mathbf{b}}(t), \end{cases} \tag{18}$$

где $\widetilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{A}}(t)$ – 4×1-мерный вектор настраиваемых коэффициентов; $k_{\mathbf{b}}(t)$ – настраиваемый входной коэффициент адаптивного закона (17); $\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_М$ – 4×1-мерный вектор ошибок – разностей между переменными состояния наблюдателя и эталонной модели; $\mathbf{P}$ – 4×4-мерная симметричная положительно определенная матрица, единственным образом определенная из уравнения Ляпунова; $\gamma_{\mathbf{A}}, \lambda_{\mathbf{A}}, \gamma_{\mathbf{b}}, \lambda_{\mathbf{b}}$ – положительные коэффициенты усилений настроек.

3. Непрямая адаптивная система с параметрически настраиваемой моделью и мажорирующими функциями для управления электроприводом постоянного тока с нелинейными упругими свойствами и учетом зазора в упругой связи. Для построения непрямого управления используется настраиваемая модель, уравнение которой имеет вид

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A_M}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t)\mathrm{diag}\{1, \hat{m}_у, 1, 1\}\hat{\mathbf{x}} + [\mathbf{b_M} + \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t)]u(t), \qquad (19)$$

где $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{\omega}_2 \quad \tilde{m}_у \quad \tilde{\omega}_1 \quad \tilde{I}_я)^{\mathrm{т}}$ – вектор переменных состояния настраиваемой модели (19); $\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t), \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t)$ – 4×4- и 4×1-мерные матрицы настраиваемых параметров; $\mathbf{A_M}, \mathbf{b_M}$ – 4×4-, 4×1-мерные постоянные матрицы ($\mathbf{A_M}$ – гурвицева) эталонной модели (4).

Непрямая адаптивная система с параметрически настраиваемой моделью и мажорирующими функциями для управления объектом (15) состоит из наблюдателя (16), настраиваемой модели (19), адаптивного закона вида

$$u_{\mathbf{A}}(t) = -\mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{+}\left\{ \tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t)\mathrm{diag}\{1, \hat{m}_у, 1, 1\}\hat{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t)u(t)\right\} \qquad (20)$$

и алгоритмов настройки, имеющих вид

$$\left.\begin{aligned} &\dot{\tilde{\mathbf{K}}}_{\mathbf{A}}(t) = \gamma_{\mathbf{A}}\mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}\hat{\mathbf{x}}^{\mathrm{T}}\mathrm{diag}\{1, \hat{m}_у, 1, 1\} - \lambda_{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{K}}_{\mathbf{A}}(t);\\ &\dot{\tilde{\mathbf{k}}}_{\mathbf{b}}(t) = \gamma_{\mathbf{b}}\mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}u^{0\mathrm{т}} - \lambda_{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}_{\mathbf{b}}(t),\ \boldsymbol{\varepsilon} = \hat{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{x}}, \end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ – 4×1-мерный вектор ошибки идентификации – разностей между переменными состояния наблюдателя и настраиваемой модели; 1×4-мерный вектор-строка $\mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{+} = \left(\mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}}\mathbf{b}_{\mathbf{M}}\right)^{-1}\mathbf{b}_{\mathbf{M}}^{\mathbf{T}}$ есть псевдообращение прямоугольного 4×1–мерного вектора $\mathbf{b_M}$; а остальные обозначения аналогичны приведенным выше при исследовании прямого управления.

В среде Matlab-Simulink разработаны программы моделирования построенных адаптивных систем. В диссертации приводятся результаты сравнительного исследования эффективности прямой и непрямой адаптивных систем в решении задач управления в условиях изменения параметров объекта и действия зазора. Результаты представлены на рисунках 4 – 7. Результаты исследования моделированием показывают, что в адаптивных системах управления с параметрической настройкой не только успешно подавлены упругие колебания, которые возникали в упругом объекте без адаптивного управления, но и повышено быстродействие системы, которое стало сравнимым с быстродействием жесткого объекта.

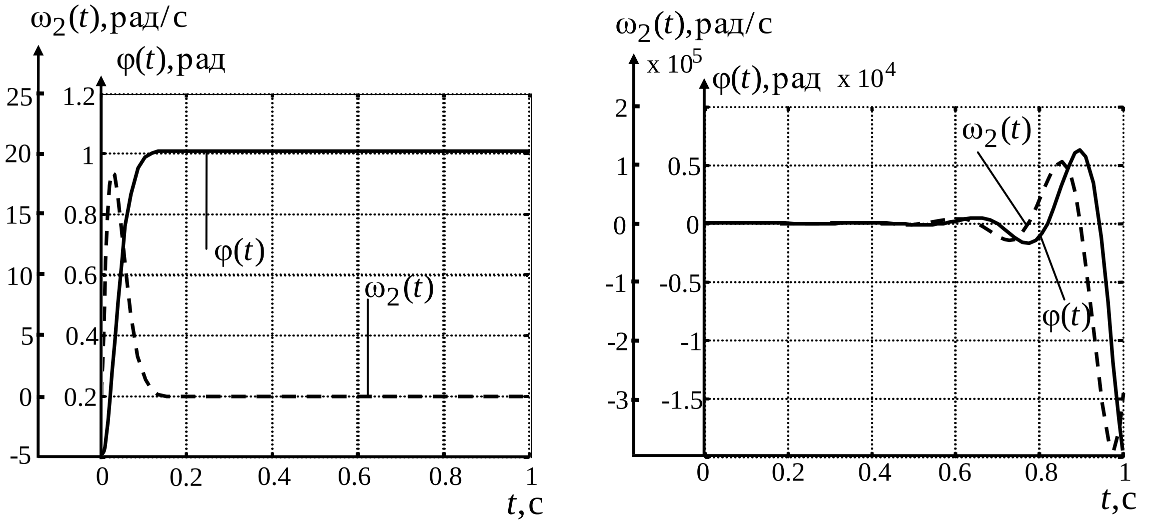

Рисунок 4 – Переходные процессы системы жесткого (слева) и упругого объектов с электроприводом постоянного тока без адаптивного управления (справа) при усредненных постоянных параметрах объекта

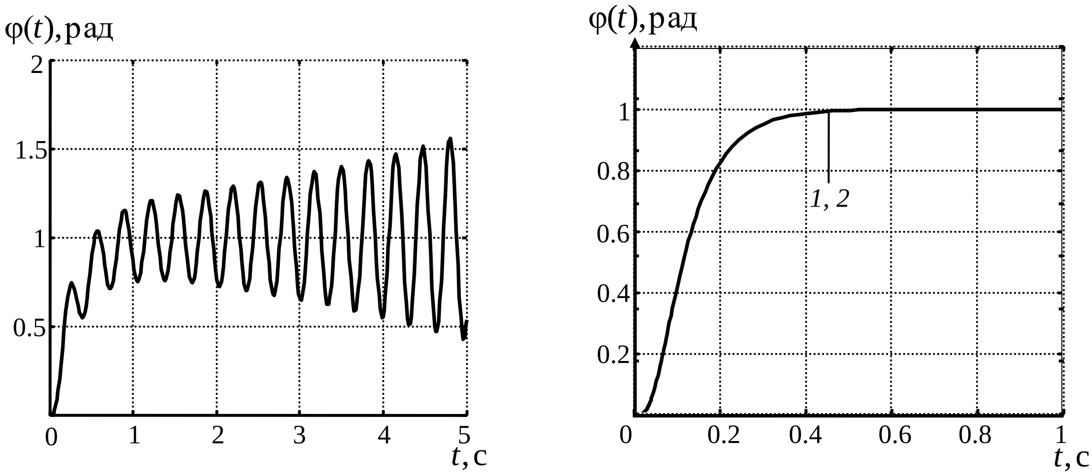

Рисунок 5 – Переходные процессы следящей системы с подчиненным управлением (слева) и адаптивных (кривая 1 – прямой; кривая 2 – непрямой) систем (справа) управления электроприводом постоянного тока с нелинейными упругими свойствами при усредненных постоянных параметрах

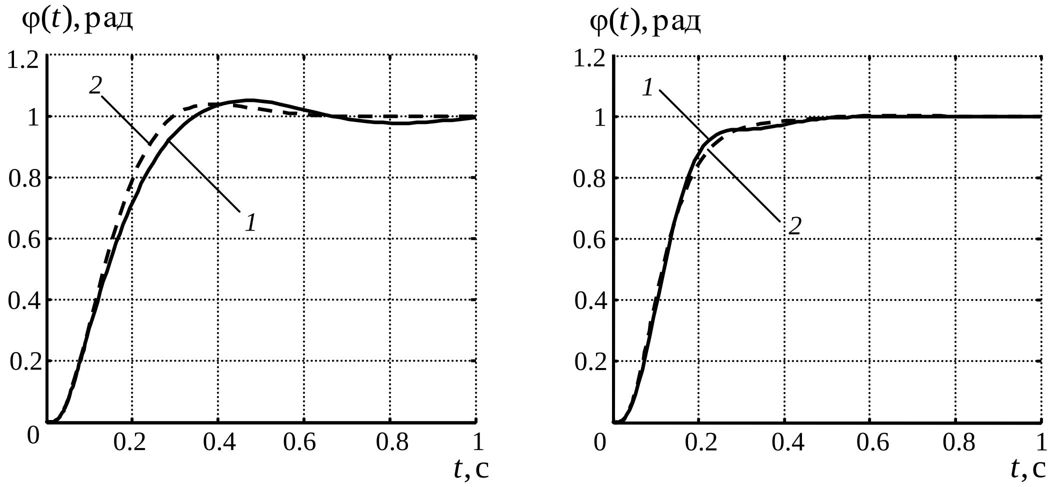

Рисунок 6 – Переходные процессы адаптивных систем с параметрической настройкой при изменении параметров объекта (кривая *1* – прямая адаптивная система, кривая *2* – непрямая адаптивная система): слева – при изменении коэффициента упругости объекта ($p = p_0 / 2$); справа – при изменении момента инерции нагрузки ($J = J_0 / 2$)

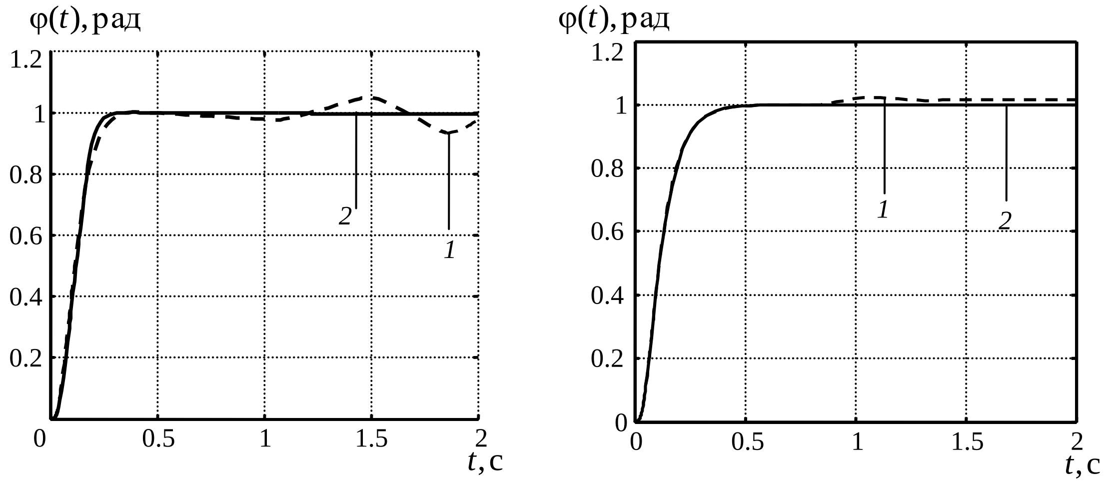

Рисунок 7 – Переходные процессы угла поворота нагрузки адаптивных систем с параметрической настройкой при наличии нелинейности в виде зазора упругой связи (слева) и постоянного возмущения в моменте t =1 с (справа): кривая *1* – прямая адаптивная система, кривая *2* – непрямая адаптивная система

Графики подтверждают более высокую эффективность непрямых адаптивных систем по сравнению с прямыми адаптивными системами в задачах подавления упругих колебаний, обеспечения повышения быстродействия и точности управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

В четвертой главе рассматриваются вопросы построения прямых и непрямых адаптивных систем управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами и векторным управлением. С использованием пакета Matlab-Simulink проводится сравнительный анализ эффективности непрямой с настраиваемой моделью и прямой с эталонной моделью адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами.

Рассмотрим электромеханическую систему векторного управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами, стандартная общепринятая структура которой представлена на рисунке 8.

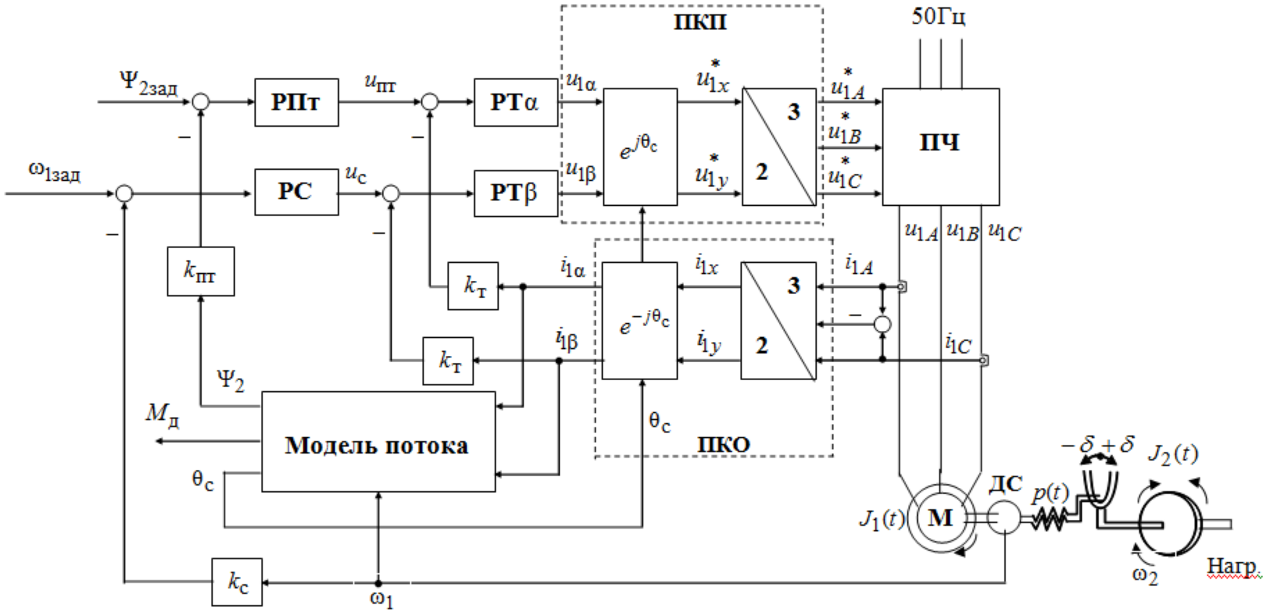

Рисунок 8 – Функциональная схема системы векторного управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами

Асинхронный электропривод (М) питается от преобразователя частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения. На входе преобразователя действует трехфазная система задающих напряжений $u_{1A}^{*}, u_{1B}^{*}, u_{1C}^{*}$. Система регулирования выполнена во вращающейся системе координат $\alpha-\beta$ при ориентации оси вещественных α вращающейся системы координат $\alpha-\beta$ по вектору потокосцепления ротора ψ_2. Преобразование координат в прямом канале (ПКП) и в канале обратной связи (ПКО) производится в системе векторного управления. В преобразователе канала обратной связи ПКО сначала трехфазная система синусоидальных величин i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} преобразуется блоком 3/2 в двухфазную систему синусоидальных величин i_{1x}, i_{1y} в неподвижной системе координат $x-y$, жестко связанной с трехфазной статорной обмоткой, а затем двухфазная система синусоидальных величин i_{1x}, i_{1y} преобразуется в проекции $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ пространственного вектора блоком $e^{-j\theta_{с}}$ на оси вращающейся системы координат $\alpha-\beta$, представляющие собой сигналы постоянного тока, где $\theta_{с}$ – мгновенное значение угла поворота системы координат $\alpha-\beta$ относительно системы $x-y$, рассчитывающееся из блока «Модель потока». В преобразователе прямого канала ПКП сначала из сигналов постоянного тока $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ блоком $e^{j\theta_{с}}$ формируется двухфазная система синусоидальных величин u_{1x}^{*}, u_{1y}^{*} в неподвижной системе координат $x-y$, а затем она трансформируется блоком 3/2 в трехфазную систему величин $u_{1A}^{*}, u_{1B}^{*}, u_{1C}^{*}$. Система подчиненного управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами включает в себя внутренние контуры регулирования токов $i_{1\alpha}$ и $i_{1\beta}$ с регуляторами РТα и РТβ. Внешними по отношению к токовым контурам являются контуры регулирования потокосцепления ротора с регулятором РПт и скорости с регулятором РС. Первый из них замкнут по модулю вектора потокосцепления ротора, вычисленному в преобразователе блока «Модель потока», второй – по сигналу скорости с датчика скорости ДС. Потокосцепление ротора ψ_2 сравнивается с сигналом задания $\psi_{2\text{зад}}$ на входе регулятора потока (РПт), а скорость асинхронного электропривода – с сигналом задания $\omega_{1\text{зад}}$ на входе регулятора скорости (РС). В качестве регуляторов токов РТα, РТβ, потокосцепления РПт и скорости РС применены пропорциональные П-регуляторы.

Математическая модель системы управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами и подчиненным регулированием при ориентации вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора описывается системой дифференциальных уравнений шестого порядка вида

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{\omega}_2 = J_2^{-1} f_\text{у};\ \dot{m}_\text{у} = p(\omega_1-\omega_2);\dot{\omega}_1 = J_1^{-1}[M_\text{д} - f_\text{у}];\ \dot{\psi}_2 = T_2^{-1}[L_m i_{1\alpha} - \psi_2];\\
&\dot{i}_{1\alpha} = (\sigma R_1 T_1)^{-1}[u_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha} + \omega_{0\text{эл}}\sigma R_1 T_1 i_{1\beta} - L_m L_2^{-1}\dot{\psi}_2];\\
&\dot{i}_{1\beta} = (\sigma R_1 T_1)^{-1}[u_{1\beta} - R_1 i_{1\beta} - \omega_{0\text{эл}}\sigma R_1 T_1 i_{1\alpha} - L_m L_2^{-1}\omega_{0\text{эл}}\psi_2];\\
&M_\text{д} = 3/2\, p_\text{п} L_m L_2^{-1}\psi_2 i_{1\beta};\ u_{1\alpha} = k_\text{п}\beta_\text{т}[u_\text{пт} - k_\text{т} i_{1\alpha}];\ u_{1\beta} = k_\text{п}\beta_\text{т}[u_\text{с} - k_\text{т} i_{1\beta}];\\
&\omega_{0\text{эл}} = p_\text{п}\omega_1 + \omega_\text{р};\ \omega_\text{р} = L_m L_2^{-1} R_2 i_{1\beta}/\psi_2;\ u_\text{пт} = \beta_\text{пт}[\psi_{2\text{зад}} - k_\text{пт}\psi_2];\ u_\text{с} = \beta_\text{с}[\omega_\text{зад} - k_\text{с}\omega_1],
\end{aligned}\right\}\quad(22)$$

где ψ_2 – проекция пространственного вектора потокосцепления ротора на оси α вращающейся системы координат $\alpha-\beta$; $\omega_\text{р}$ – частота роторной ЭДС; $p_\text{п}$ – число пар полюсов обмотки статора; $p_\text{п}\omega$ – угловая скорость ротора в электрических радианах в секунду; $\omega_{0\text{эл}}$ – угловая скорость вращающейся системы координат $\alpha-\beta$, равная частоте напряжения питания, в электрических радианах в секунду; $M_\text{д}$ – момент асинхронного электропривода; R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора соответственно; L_m – главная индуктивность намагничивающего контура; L_1, L_2 – индуктивности обмоток фаз статора и ротора соответственно; σ – коэффициент рассеяния машины, $\sigma = 1 - L_m^2/L_1 L_2$; T_1, T_2 – постоянные времени обмоток статора и ротора соответственно, $T_1 = L_1/R_1$ и $T_2 = L_2/R_2$; $\beta_\text{т}, \beta_\text{пт}, \beta_\text{с}$ – коэффициенты передачи регуляторов токов РТα, РТβ, потокосцепления РПт и скорости РС соответственно; $k_\text{т}, k_\text{пт}, k_\text{с}$ – постоянные коэффициенты передачи датчиков обратных связей по токам, потокосцеплению и скорости соответственно; $k_\text{п}$ – коэффициент передачи звена чистого запаздывания; $u_{1\alpha}, u_{1\beta}, u_\text{пт}, u_\text{с}$ – выходные напряжения контурных регуляторов токов РТα, РТβ, потокосцепления РПт и скорости РС соответственно; $\omega_\text{зад}, \psi_{2\text{зад}}$ – задающее воздействие скорости и потокосцепления ротора.

Исходная следящая система является нелинейной, поэтому для последующих расчетов эталонной модели, наблюдателя и модального управления рассмотрим ее линейное приближение, полученное методом разложения правых частей уравнений (22) в ряд Тейлора в окрестности некоторого решения. Выбрав некоторые значения переменных состояния в установившемся режиме переходных процессов $\omega_1{*}, \psi_2{*}, i_{1\alpha}{*}, i_{1\beta}{*}$ и приняв обозначения

$$\left.\begin{gathered}
a_1 = (R_1 T_1\sigma)^{-1} k_\text{п}\beta_\text{т}\beta_\text{пт};\ a_2 = -(R_1 T_1 T_2\sigma)^{-1}(R_1 T_2 + k_2 L_m + k_\text{п}\beta_\text{т} k_\text{т} T_2);\ a_3 = k_2 R_2;\ a_4 = p_\text{п};\\
a_5 = (R_1 T_1 T_2\sigma)^{-1}(k_2 - k_\text{п}\beta_\text{т}\beta_\text{пт} k_\text{пт} T_2);\ a_6 = (R_1 T_1\sigma)^{-1} k_\text{п}\beta_\text{т}\beta_\text{с};\ a_7 = -(R_1 T_1\sigma)^{-1}(R_1 + k_\text{п}\beta_\text{т} k_\text{т} + k_2^2 R_2);\\
a_8 = -(R_1 T_1\sigma)^{-1} k_2 p_\text{п};\ a_9 = -(R_1 T_1\sigma)^{-1}(k_\text{п}\beta_\text{т}\beta_\text{с} k_\text{с});\ a_{10} = L_m/T_2;\ a_{11} = -/T_2;\ a_{12} = 3 p_\text{п} k_2/(2J_{01});\\
a_{13} = 1/J_{02};\ a_{14} = p_0;\ a_{15} = 1/J_{01};\ b_1 = a_{12} i_{1\beta}{*};\ b_2 = a_{12}\psi_2{*};\ b_3 = a_4 i_{1\beta}{*};\ b_4 = a_5 - a_3 (i_{1\beta}{*})^2 (\psi_2{*})^{-2};\\
b_5 = 2a_3 i_{1\beta}{*}(\psi_2{*})^{-1} + a_4\omega_1{*};\ b_6 = a_9 + a_8\psi_2{*} - a_4 i_{1\alpha}{*};\ b_7 = a_8\omega_1{*} - a_3 i_{1\beta}{*} i_{1\alpha}{*}(\psi_2{*})^{-2};\\
b_8 = -a_4\omega_1{*} - a_3 i_{1\beta}{*}(\psi_2{*})^{-1};\ b_9 = a_7 - a_3 i_{1\alpha}{*}(\psi_2{*})^{-1};\ k_2 = L_m/L_2
\end{gathered}\right\}$$

получим линеаризованное приближение уравнений (22) с некоторыми усредненными параметрами, которое для компактности записано в векторно-матричном виде

$$
\left.
\begin{aligned}
&\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}(u_0 + u_{\mathbf{A}});\;\; y = \mathbf{c}^{\mathrm{T}}\mathbf{x};\\
&\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_{14} & 0 & a_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_{15} & 0 & b_1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_{11} & a_{10} & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & b_4 & a_2 & b_5 \\ 0 & 0 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 \end{bmatrix};\; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_1 \\ a_6 \end{bmatrix};\;\; \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{\mathrm{c}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},
\end{aligned}
\right\} \qquad (23)
$$

где $\mathbf{x} = [\omega_2 \;\; m_{\mathrm{y}} \;\; \omega_1 \;\; \psi_2 \;\; i_{1\alpha} \;\; i_{1\beta}]^{\mathrm{T}}$; $u_0 = \omega_{\text{зад}}$ – задающее воздействие; $u_{\mathbf{A}}$ – адаптивное управление.

На основе полученного линеаризованного объекта (23) с усредненными параметрами, так же как и в третьей главе, составляются методики построения прямой и непрямой адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами. В среде Matlab-Simulink разработаны программы моделирования построенных адаптивных систем, результаты которых при задающих воздействиях $\psi_{2\text{зад}} = 0.1$ Вб, $\omega_{\text{зад}} = 1$ рад/с представлены на рисунках 9 и 10.

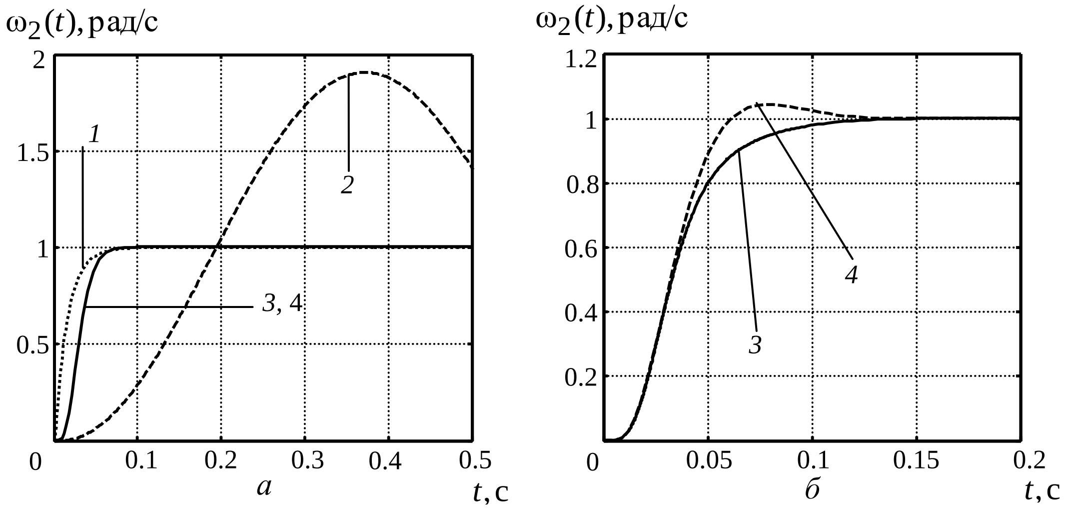

Рисунок 9 – Переходные процессы угловой скорости второго диска при усредненных постоянных параметрах (*а*) и изменении коэффициента упругости (*б*) (*кривая 1* – жесткий объект, *кривая 2* – упругий объект без адаптивного управления, *кривая 3* – прямая адаптивная система, *кривая 4* – непрямая адаптивная система)

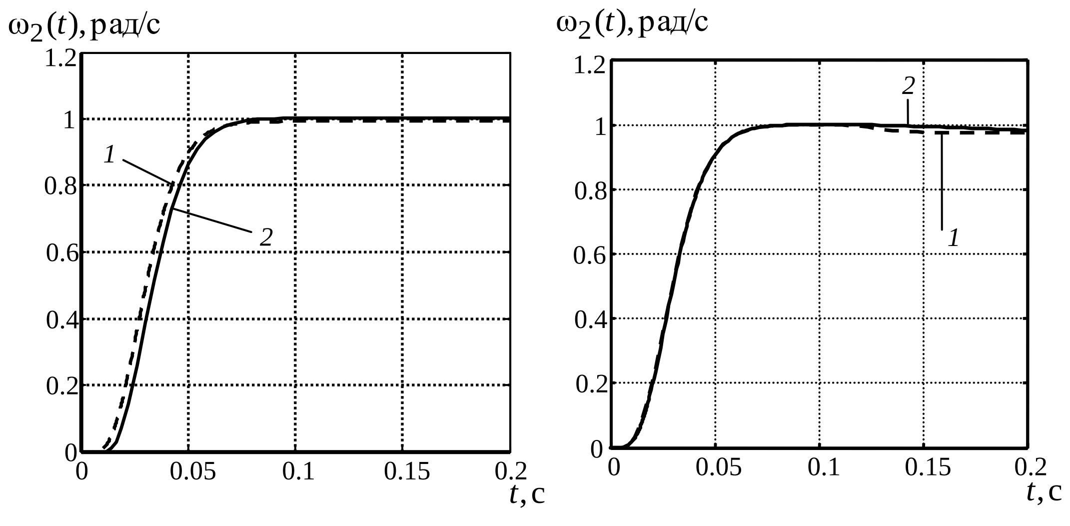

Рисунок 10 – Переходные процессы адаптивных систем управления при наличии нелинейности в виде зазора упругой связи (слева) и постоянного возмущения в моменте t = 0.1 с (справа): *кривая 1* – прямая адаптивная система, *кривая 2* – непрямая адаптивная система

Результаты моделирования показывают, что в адаптивных системах управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами, имеющим более сложное математическое описание, чем электроприводы постоянного тока, успешно подавлены упругие колебания, которые возникали в упругом объекте, повышены быстродействие и точность управления, так же как и в адаптивных системах управления данным объектом с электроприводом постоянного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертации получены основные результаты работы, заключающиеся в следующем:

1. Построены системы адаптивной идентификации и непрямого адаптивного управления с параметрической настройкой для класса линейных конечномерных объектов с неизвестными, но постоянными параметрами и приведены методы регуляризации интегральных законов настройки в условиях, когда неизвестные параметры линейных объектов неизвестным образом функционируют во времени с ограниченными скоростями.

2. Разработана методика построения новых классов полных непрямых адаптивных систем с параметрически настраиваемыми моделями, основанных на методе мажорирующих функций. Рассмотрены способы построения упрощенных адаптивных систем с параметрически настраиваемыми моделями и мажорирующими функциями, когда в структуре адаптивной системы удерживаются только мажорирующие функции старших или превосходящих степеней роста правых частей математических моделей объектов.

3. Разработаны непрямые адаптивные системы с параметрической настройкой для управления нелинейными нестационарными объектами первого и второго порядков. С использованием пакета Matlab – Simulink разработаны программы моделирования таких систем, результаты исследований по которым подтверждают высокую работоспособность непрямых адаптивных систем в задачах обеспечения повышения быстродействия и точности управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

4. Разработаны прямые и непрямые адаптивные системы с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателями для управления электроприводом постоянного тока с упругими и нелинейными свойствами. В Matlab – Simulink разработаны соответствующие программы моделирования для широкого спектра прикладных задач. Результаты исследований по разработанным программам подтверждают работоспособность адаптивных систем и более высокую эффективность непрямых адаптивных систем по сравнению с прямыми адаптивными системами в задачах подавления упругих колебаний, достижения повышенных быстродействия и точности управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

5. Разработана математическая модель асинхронного электропривода с упругими и нелинейными свойствами при ориентации вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора.

6. По принципу подчиненного управления составлены расчетные уравнения электромеханических следящих систем с асинхронным электроприводом при учете зазоров в упругих связях.

7. В Matlab – Simulink разработаны модели прямых и непрямых адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателями для управления асинхронным электроприводом с упругими и нелинейными свойствами. Результаты исследований подтверждают работоспособность адаптивных систем и более высокую эффективность непрямых адаптивных систем по сравнению с прямыми адаптивными системами в задачах подавления упругих колебаний, достижения повышенных быстродействия и точности управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

Все решенные задачи направлены на практическое применение полученных в диссертационной работе результатов в задачах разработки нового поколения беспоисковых адаптивных регуляторов, обеспечивающих значительное повышение устойчивости, точности и быстродействия реальных промышленных электромеханических систем.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Н. К. Чьен, В. В. Путов, В. Н. Шелудько, Е. В. Белградская. Непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления линейными стационарными объектами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2011. – Вып.7. – С.71–80.

2. Nguyen Kiem Chien, Viktor V. Putov, Viktor N. Sheludko, Anastasiia D. Stotchaia. The indirect adaptive control systems with parametrically customized models for control of nonlinear non-stationary objects // Template and guidelines for Proceedings of the IEEE North West Russia Section v2. СПб.: 2011. – С.39–42.

3. Н. К. Чьен, В. В. Путов, В. Н. Шелудько. Сравнительное исследование непрямых и прямых адаптивных систем с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2012. – Вып.2. – С.58–65.

4. Н. К. Чьен, В. В. Путов, В. Н. Шелудько, С. Г. Герман-Галкин. Сравнительное исследование прямой и непрямой адаптивных систем управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2012. – Вып.5. – С.82–86.

5. Н. К. Чьен, С. В. Гаврилов, Ч. С. Киен, Д. К. Фыонг. Компьютерная технология построения управления мехатронными системами // «Естественные и технические науки», № 1. Изд-во: «Компания Спутник +», 2006. С. 207-212.

6. Н. К. Чьен, С. В. Гаврилов, Д. К. Фыонг. Исследование прямой беспоисковой адаптивной системы с сигнальной настройкой для управления автономным электрогидравлическим следящим приводом (АЭГСП) // «Естественные и технические науки», № 1. Изд-во: «Компания Спутник +», 2007. С. 97-102.

7. Nguyen Kiem Chien, Viktor V. Putov, Viktor N. Sheludko, Anastasiia D. Stotchaia, Vladimir V. Lebedev. Direct and indirect adaptive control systems of induction electric drive with elastic and nonlinear properties // Template and guidelines for Proceedings of the IEEE North West Russia Section v1. СПб.: 2012 (в печати).

В других изданиях:

8. Н. К. Чьен, В. В. Путов, В. В. Лебедев, Ч. А. Зунг, В. Я. Короп. Нейронечеткая система управления трехмассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами // Известия государственного электротехнического университета, Серия «Автоматизация и управление». – СПб., 2007. – Вып.1. – С.20–26.

9. Н. К. Чьен, В. П. Казаков, Е. В. Белградская, Х. М. Тханг. Непрямые адаптивные системы управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом с параметрически настраиваемыми моделями // XIII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2011 г. СПб.:2011.

10. Н. К. Чьен, В. Н. Шелудько, А. С. Пекаровский, Е. В. Белградская. Адаптивные системы управления объектами первого и второго порядков с применением гауссовых функций // Международный сборник научных трудов «Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах» 2011 год, г. Магнитогорск.

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

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

13. Н. К. Чьен, В. К. Фыонг, Д. В. Ба. Прямые адаптивные системы управления линейными объектами первого порядка с применением нейронных сетей // Материалы конференции «63-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета». 26 января - 6 февраля 2010, Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 179-184.

14. Н. К. Чьен, В. П. Казаков, А. С. Пекаровский, В. К. Фыонг. Разработка адаптивных аналитических и интеллектуальных систем управления упругим электромеханическим объектом // XI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2010 г. СПб.:2010.

15. Н. К. Чьен, В. П. Казаков, А. С. Пекаровский, В. К. Фыонг. Разработка систем управления двухкоординатным роботом-манипулятором и механическим объектом в двухосном кардановом подвесе // XI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2010 г. СПб.:2010.

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