На правах рукописи

Васильев Андрей Юрьевич

РАЗРАБОТКА РЕДУЦИРОВАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЯ

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Козлов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Хименко Виталий Иванович,
доктор технических наук, профессор
Юрганов Алексей Анатольевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет»

Защита состоится «27» июня 2013 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 21, 9 учебный корпус (институт информационных технологий и управления), ауд. 121.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Отзывы на автореферат в 2 экз., заверенные гербовой печатью, просьба присылать по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 21, 9 учебный корпус (институт информационных технологий и управления), ауд. 525, ученому секретарю совета Д 212.229.10.

Автореферат разослан «25» мая 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент Богач Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тема диссертационной работы является актуальной в связи с целесообразностью применения редуцированных математических моделей для синтеза робастных управляющих систем на основе аналитических и численных методов оптимального управления.

Методы редукции математических моделей разработаны в работах А.Н. Крылова, Л.А. Мироновского, В.М. Адамяна, Д.З. Арова, М.Г. Крейна, К. Гловера, В.Е. Арнольди, К. Ланцоша, Б.К. Мура и др. Методам и алгоритмам оптимального управления на основе редуцированных моделей посвящены исследования, выполненные Р.И. Габасовым, Ф.М. Кирилловой, В.М. Кунцевичем, А.А. Первозванским, Л.С. Лэсдоном, М. Месаровичем, Я. Такахарой, Д. Мако, В.Г. Гайцгори и др.

Цель и задачи работы. Цель работы заключаются в разработке редуцированных математических моделей электроэнергетических объединений (ЭЭО), аналитико-численных методов для анализа и синтеза робастных систем локально оптимального управления при ограничениях на управления и координаты, в частности, для синтеза систем робастной стабилизации в классе редуцированных моделей и их исследование с помощью комплекса программ.

Задачи, решенные в работе для достижения цели:

1. Разработка структурно инвариантных редуцированных математических моделей электромеханических процессов ЭЭО для аналитического исследования управляемости, наблюдаемости, статической определимости и синтеза робастного управления.

2. Разработка и исследование математических моделей робастных систем локально оптимального управления ЭЭО, которые синтезируются на основе редуцированных моделей, операторов конечномерной оптимизации при ограничениях на координаты и управления, анализ устойчивости замкнутых робастных систем ограничения перетоков активной мощности по линиям электропередач.

3. Разработка численных методов повышения точности редуцированных моделей для систем локально оптимального управления и создание комплекса программ для математического моделирования в инструментальной системе MatLab.

Объектами исследования являются математические модели в виде обыкновенных дифференциальных и разностных, а также алгебраических уравнений, в частности, электромеханических процессов для задач управления частотой и активной мощностью, включающих ограничение перетоков по линиям электропередач ЭЭО.

Методы исследования. В работе использовались теория дифференциальных уравнений, теория автоматического управления, теория оптимизации, функциональный анализ, теория редукции математических моделей.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложены редуцированные математические модели, сформулированные в структурно инвариантной форме в виде линейных дифференциальных уравнений с блочными матрицами, что позволяет исследовать достаточные робастные условия управляемости, наблюдаемости и статической определимости аналитическими методами в условиях высокой размерности векторов состояний, характерной для крупных энергосистем.

2. Разработаны математические модели систем робастного локально оптимального управления с операторами конечномерной оптимизации, определяющие управления в аналитической форме, что позволяет сформулировать условия существования допустимых решений при ограничениях на управления и координаты и достаточные условия устойчивости замкнутых систем робастной стабилизации.

3. Разработаны способы редукции уравнений на основе распределения весов в многомерных системах, позволяющие повысить точность редуцированных моделей.

Практическая значимость. Методики математического моделирования систем локально оптимального управления численными и аналитическими методами позволяют исследовать устойчивость робастных замкнутых систем для различных классов математических моделей систем ограничения перетоков, а также исследовать потокораспределение активной мощности по линиям ЭЭО с учетом отклонения частоты на основе комплекса программ для моделирования в инструментальной системе MatLab.

Достоверность. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием корректных математических моделей и методов и подтверждением результатов вычислительными экспериментами.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. Структурно-инвариантные математические редуцированные модели переходных состояний и статических режимов ЭЭО, условия их управляемости, наблюдаемости и статической определимости.

2. Аналитико-численные математические модели систем робастного локально оптимального управления с учетом ограничений на координаты, управления, а также достаточные условия устойчивости систем для статических и динамических законов управления на основе операторов оптимизации.

3. Метод распределения весов многомерной модели в пространстве состояний для повышения точности редуцированных систем на основе аппроксимации по сингулярным числам Ганкеля. Комплекс программ, реализующий полученные в работе результаты.

Апробация работы. Основные практические и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIV и XV Всероссийских конференциях «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах» (май 2010 г. и май 2012 г.), на XVII Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах» (февраль 2011 г.).

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в девяти работах, из которых две являются публикациями в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, четыре раздела, основные результаты работы, список использованной литературы. Объём диссертации составляет 120 страниц машинописного текста, 20 рисунков. Список литературы состоит из 50 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено рассмотрению актуальности данной работы, целям работы и постановкам задач.

Первый раздел содержит обзор и анализ исследований по математическому моделированию сложных динамических объектов, анализ методов редукции математических моделей, постановки задач вычисления локально оптимальных управлений и синтеза замкнутых систем локально оптимальной робастной стабилизации.

Второй раздел содержит описание и анализ исследуемых исходных уравнений электромеханических процессов ЭЭО, структура которого учитывает шесть энергетических объединенных энергосистем (ОЭС), представленных узлами, соединенными между собой пятью линиями электропередач (ЛЭП), по которым передается активная мощность (рис. 1).

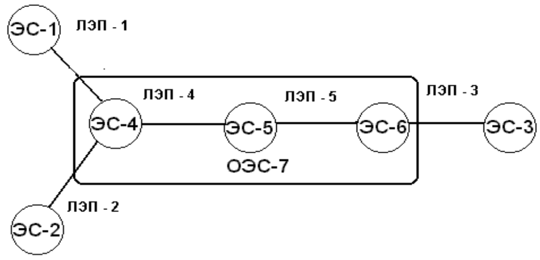


Рис. 1. Обобщенная схема Единой энергетической сети России: ЭС-1 – ОЭС Северо-Запада, ЭС-2 – ОЭС Юга, ЭС-3 – ОЭС Дальнего Востока, ЭС-4 – ОЭС Центра, ЭС-5 – ОЭС Урала, ЭС-6 – ОЭС Сибири

Уравнения ЭЭО в целом с точностью до параметров определяет структурно инвариантную относительно сети и количества ОЭС математическую модель объекта, представленную не редуцированными дифференциальными уравнениями электромеханических процессов с блочными матрицами параметров, которые имеют вид

$$\begin{bmatrix} \Phi' \\ \Omega' \\ \mathrm{P}' \\ \Sigma' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & E_{n\times n} & 0_{n\times n} & 0_{n\times n} \\ -\overline{T}_a R_\rho & -\overline{T}_a T_y & \overline{T}_a & 0_{n\times n} \\ 0_{n\times n} & \overline{T}_\Pi K_\Omega & -\overline{T}_\Pi & \overline{T}_\Pi K_\Pi \\ \overline{T}_C K_1 & \overline{T}_C K_2 & 0_{n\times n} & -\overline{T}_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi \\ \Omega \\ P \\ \Sigma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{n\times m} \\ 0_{n\times m} \\ 0_{n\times m} \\ \overline{T}_C K_C \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0_{n\times m} \\ -\overline{T}_a \\ 0_{n\times m} \\ 0_{n\times m} \end{bmatrix} \mu,$$

$$s = C_0\Phi = (s_1,\ldots,s_l,\ldots,s_g)^T,\ s_l = \rho_{ik}(\varphi_i - \varphi_k). \qquad (1)$$

В (1) обозначено: Φ – вектор отклонений углов отклонения от номинального режима, Ω – вектор отклонений частот, соответствующих производным углов отклонений, P – вектор отклонений мощностей энергетических агрегатов (ЭА), Σ – вектор сигналов вторичного регулятора ЭА; $\overline{T}_a$ – обратная диагональная матрица приведенных постоянных механической инерции роторов ЭА, T_y – диагональная матрица постоянных ускорения, $\overline{T}_\Pi$ – обратная диагональная матрица постоянных времени парового объема, K_Ω – диагональная матрица коэффициентов усиления первичных регуляторов скоростей турбин ЭА, K_Π – диагональная матрица параметров парового объема, $\overline{T}_C$ – обратная диагональная матрица постоянных времени гидравлического усилителя, K_1, K_2 – диагональные матрицы параметров пропорционально-интегрального регулятора частоты, K_C – диагональная матрица коэффициентов усиления управляющих воздействий, u – вектор управляющих воздействий, μ – вектор возмущающих воздействий по нагрузке, R_ρ – матрица синхронизирующих моментов, s – вектор перетоков активной мощности между ОЭС, C_0 – матрица связей между углами отклонения и перетоками мощности.

В системе (1) учитывается регулятор частоты, что позволяет устранить статическую неопределимость, возникающую в силу особенности матрицы A при отсутствии регуляторов частоты. Далее исследуются свойства наблюдаемости и управляемости по управляющим и возмущающим воздействиям. Все исследования проводятся для аналитического представления модели с целью анализа общих свойств ЭЭО с учетом параметров в блочных матрицах в (1). Вычисление полных матриц управляемости и наблюдаемости при наличии множества входных и выходных сигналов представляется сложной задачей, поэтому исследование управляемости и наблюдаемости проводится по достаточному для корректных выводов множеству первых блочных столбцов соответствующих матриц. Все выводы, выполненные по неполным матрицам, доказательно экстраполируются на полные матрицы управляемости и наблюдаемости. По результатам исследования управляемости и наблюдаемости формулируются следующие теоремы.

Теорема 1. Уравнения динамики ЭЭО вида (1) обладают свойством полной управляемости по управляющим воздействиям тогда, когда ранг матрицы K_C является полным.

Такое достаточное условие теоремы учитывает отсутствие реальной возможности управления режимами ЭЭО всеми ОЭС (узлами сети). Необходимое условие управляемости требует более сложного анализа, поэтому в работе доказано вычислительными экспериментами, что управляемость достигается при наличии хотя бы одного управляющего воздействия.

Теорема 2. Система (1) является полностью наблюдаемой тогда, когда матрица C_0^T имеет полный ранг по столбцам.

Эта теорема содержит только достаточное условие. Достаточные условия управляемости и наблюдаемости являются важными свойствами моделей, поскольку условия теорем предполагаются гарантированно заданными. Также важно отметить, что представленные в работе свойства управляемости и наблюдаемости, включая достаточные условия выполнения этих свойств, являются робастными относительно значений параметров системы, поскольку они рассмотрены и доказаны в аналитическом виде, требующем ненулевых значений параметров, что также предполагается гарантированно заданным в силу исходных физических свойств исследуемых моделей.

Далее в разделе рассматриваются два варианта редуцированных математических моделей ЭЭО в физических координатах. В первой, неполной квазистатической модели, не учитываются отдельные процессы, а учтены наиболее важные компоненты – отклонения частот и углов. Соответствующие редуцированные уравнения ЭЭО имеют вид

$$\begin{bmatrix} \Phi' \\ \Omega' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & E_{n\times n} \\ -\bar{T}_a(R_\rho + K_\Pi K_1) & -\bar{T}_a(T_y + K_\Omega + K_\Pi K_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{n\times m} \\ \bar{T}_a K_\Pi K_C \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0_{n\times m} \\ -\bar{T}_a \end{bmatrix} \mu,$$

$$s = \begin{bmatrix} C_0 & 0_{g\times n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi \\ \Omega \end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Редуцированные уравнения описывают процессы в физических координатах. В четвертом разделе рассматривается вариант уравнений более точной аппроксимации, в которых новые координаты состояния являются абстрактными. Для модели (2) подтверждаются свойства управляемости и наблюдаемости, полностью аналогичные свойствам исходной модели.

Второй вариант редуцированного представления уравнений модели соответствует полной модели статических режимов, соответствующих статическим моделям, определяющим влияние управлений или возмущений по нагрузке на перетоки мощности по линиям ЭЭО. На основе параметров модели (1) матрицы статических моделей влияния от входов (управлений на ОЭС) к выходам (перетокам мощности по линиям между ОЭС) описываются в форме

$$H_u = -C_0 \beta K_\Pi K_C \, , \; H_\mu = C_0 \beta \; , \tag{3}$$

где матрица $\beta = (K_\Pi K_1 - R_\rho)^{-1}$ является обобщением модели метода коэффициентов распределения для случая ненулевых отклонений частоты. Анализ моделей влияния показывает, что статическая неопределимость из обязательного свойства сведена к узкому классу значений коэффициентов, при которых матрица β^{-1} имеет неполный ранг. В силу наличия данного класса значений коэффициентов свойство статической определимости не является робастным для аналитического представления, однако на практике получение класса коэффициентов, приводящих к статической неопределимости, является маловероятным событием.

Третий раздел посвящен разработке численно-аналитических методов математического моделирования для синтеза робастных локально оптимальных управлений при ограничении перетоков активной мощности по линиям ЭЭО (регуляторов по выходу) на основе различных классов моделей объекта. Робастность данного класса систем понимается как робастная устойчивость, которая имеет место для заданного класса редуцированных моделей. Управления формируются на основе заданного «горизонта прогнозирования» динамики объекта с использованием динамических и статических моделей объектов, определяющих класс редуцированных моделей. Минимизация локального функционала качества осуществляется на основе операторов конечномерной оптимизации (ОКО), которые аналитически определяют решения счетного семейства задач математического программирования. Для сокращения вычислений методика вычисления управления использует «горизонт прогнозирования» на один период процесса управления. Рассматривается задача Коши для разностных уравнений ЭЭО

$$x_{k+1} = H x_k + F_u u_k + F_\mu \mu_k \, , \; s_k = C x_k \, . \tag{4}$$

Стабилизирующие управления формируются на каждом этапе процесса с использованием ОКО вида

$$u_k = \gamma u_{k*} = \gamma \mathrm{O}(s_k) \, , \tag{5}$$

где оператор $\mathrm{O}(s_k)$ задает приближенное аналитическое решение задачи математического программирования, γ представляет собой масштабирующий коэффициент управления. Выражение (5) описывает статический регулятор. Вид оператора $\mathrm{O}(s_k)$ определяется классом модели, характеризующим имеющуюся информацию о поведении объекта. В работе осуществляется расчет ОКО для трех описанных выше классов: полной динамической модели (1), неполной квазистатической модели (2) и полной статической модели (3).

Для постановки задачи вычисления управлений на основе полной динамической модели ЭЭО (1) вводится вектор $z_k = \left[s_{k+1}, u_k \right]^T$, объединяющий переменные задачи конечномерной оптимизации, для которых осуществляется минимизация, и вводятся ограничения. В результате ограничения принимают вид

$$D_z^0 = \{ z_k \mid \bar{A} z_k = \begin{bmatrix} E & -CF_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{k+1} \\ u_k \end{bmatrix} = CHx_k = \bar{b}_k \}, \tag{6}$$

$$D_z^1 = \{ z_k \mid \| z_k \|_2^2 \le r^2 \}. \tag{7}$$

Таким образом, модель для вычисления управлений на основе задач оптимизации в евклидовом пространстве векторов: вычислить

$$z_{k*} = \arg\min \{ \varphi = \| z_k - z_{ec} \|_2^2 \mid \bar{A} z_k = CHx_k = \bar{b}_k ,\ \| z_k \|_2^2 \le r^2 \}. \tag{8}$$

Управления формируются на основе значений перетоков активной мощности, выходящих за пределы установленного диапазона изменений перетоков. Для определения таких значений перетоков вводится оператор типа зоны нечувствительности, имеющий следующий вид

$$\theta(s_{j,k}, s_j^+, s_j^-) = s_{j,k} - \frac{\left| s_{j,k} - s_j^- \right| - \left| s_{j,k} - s_j^+ \right| + s_j^+ + s_j^-}{2}, \tag{9}$$

где $s_{j,k}$ – значение j-того перетока на шаге k, s_j^+ и s_j^- – значения верхнего и нижнего предела установленного диапазона изменений перетоков соответственно. Далее вектор операторов (9) при предполагаемых установленными границах диапазона изменений перетоков будет кратко обозначаться как $\theta(s_k)$.

При помощи использования функции Лагранжа в задаче оптимизации формулируются уравнения, задающие оптимальный вектор управления на выпуклом множестве допустимых управлений

$$u_{k*} = (1 - \vartheta^*) \breve{u}_{k*} + \vartheta^* \hat{u}_{k*} =$$

$$= (1 - \vartheta^*) T \left[P_A \theta(s_k) + \tilde{P}^0 z_{ec} \sqrt{\frac{\alpha(\theta(s_k))}{\rho}} \right] + \vartheta^* T \left[P_A \theta(s_k) - \tilde{P}^0 z_{ec} \sqrt{\frac{\alpha(\theta(s_k))}{\rho}} \right] =$$

$$= T \left[P_A \theta(s_k) + (1 - 2\vartheta^*) \tilde{P}^0 z_{ec} \sqrt{\frac{\alpha(\theta(s_k))}{\rho}} \right], \tag{10}$$

и уравнения динамики замкнутой системы

$$x_{k+1} = Hx_k + \gamma F_u u_{k*} + F_\mu \mu_k = \tag{11}$$

$$= Hx_k + \gamma F_u T\left[P_A\theta(s_k) + (1-2\vartheta^*)\tilde{P}^0 z_{ec}\sqrt{\frac{\alpha(\theta(s_k))}{\rho}} \right] + F_\mu \mu_k ,$$

где $P_A = \overline{A}^T\left(\overline{A}\overline{A}^T\right)^{-1}$, $\tilde{P}^0 = [E - \overline{A}^T\left(\overline{A}\overline{A}^T\right)^{-1}\overline{A}]$, $T = \left[0_{m\times n} \quad E_{m\times m}\right]$, $\vartheta^* = \dfrac{|\vartheta_0| - |\vartheta_0 - 1| + 1}{2} \in [0, \ 1]$, $\vartheta_0 = \dfrac{1-\sqrt{\rho/\alpha(\theta(s_k))}}{2}$, $\rho = z_{ec}^T\tilde{P}^0 z_{ec}$, $\alpha(\theta(s_k)) = r^2 - \theta^T(s_k)(\overline{A}\overline{A}^T)^{-1}\theta(s_k)$, $\overline{A} = \left[E \quad -CF_u\right]$. Вектор $z_{ec} \neq 0$ представляет собой экономически оправданные значения управлений и координат (только управлений в случае формирования управлений по модели (3)).

Для решения задачи синтеза дискретного локально оптимального статического регулятора (10), (11) доказано утверждение об асимптотической устойчивости.

Утверждение 1. Пусть выполнены следующие условия:

1. Последовательность состояний динамической системы задается линейными разностными уравнениями (4), где матрица объекта H асимптотически устойчива, т.е. $\|H\| \le 1$, множества $D^0 \subset D^l$ непустые для дискретного времени k. Кроме этого предполагается, что $\mu_k = const$.

2. Оператор управления удовлетворяет условию Липшица в области Ω по координатам состояния

$$\| \mathrm{O}(x') - \mathrm{O}(x'') \| \le L_{\mathrm{O}} \| x' - x'' \|, x', x'' \in \Omega .$$

Тогда для устойчивости замкнутой системы с нелинейным регулятором в $\Omega = \Omega(x) \subset R^n$, достаточно, чтобы

$$\| H + \gamma F_u T P_A C H \| +$$
$$+ |\gamma| \cdot \| F_u \| \cdot \| T \| \cdot \| \tilde{P}^0 \| \cdot \|z_{ec}\| \cdot |\rho| \cdot L_{\sqrt{\ }} \cdot \lambda_{\max}((\overline{A}\overline{A}^T)^{-1}) \cdot \|H\| < 1, \quad (12)$$

где нормы векторов и матриц согласованы, т. е. для оператора $y = Gx$ норма образа и прообраза связаны соотношениями $\| y \| \le \| G \| \cdot \| x \|$ с учетом эквивалентности норм векторов в конечномерных пространствах.

В случае формирования управлений на основе информации о неполной квазистатической модели (2) и полной статической модели (3) используются аналогичные рассуждения. Размерности используемых операторов согласуются с размерностями матриц данных моделей, а сами исходные матрицы построения имеют вид

$$\overline{A} = \left[E \quad -C_{red} F_{u,red} \right]$$

для модели (2) и

$$\overline{A} = H_u$$

для модели (3). Таким образом, достаточное условие асимптотической устойчивости (12) сохраняется для построения управлений на основе (2) и (3) с поправкой на размерности операторов и значения $\overline{A}$.

Второй вариант расчета управлений замкнутой системы представлен динамическим регулятором

$$u_{k+1} = u_k + \gamma u_{k*} = u_k + \gamma \mathrm{O}(s_k)\,. \tag{13}$$

Для динамического регулятора в работе проведены аналогичные рассуждения и построения, определено достаточное условие асимптотической устойчивости.

Применение полной статической модели соответствует адаптивному управлению, так как динамические параметры неизвестны, а известно аналитическое представление модели в статических режимах, определяемой для типовых значений элементов объекта. Варианты синтеза на основе полной динамической и статической моделей объекта являются предельными, определяющими класс робастности системы в том смысле, что первая соответствует полной информации о динамической модели, вторая – минимальной информации, т.е. о модели статических состояний объекта. Использование редуцированных динамических моделей как интервальных между двумя вариантами позволяет получить соотношения для анализа устойчивости системы ограничения перетоков (перевод этих координат в допустимую область), включая анализ асимптотической устойчивости в случае регулировании перетоков.

Четвертый раздел содержит описание вычислительных экспериментов в инструментальной среде MatLab, подтверждающих теоретические выводы, сформулированные в работе. В разделе используются типовые численные значения параметров моделей (1), (2) и (3), рассмотрены их свойства, а также построены дополнительные редуцированные варианты модели, соответствующие редукции в абстрактных координатах по сингулярным числам Ганкеля. Порядок редукции этих вариантов соответствует порядку модели (2), используемые для редукции методы – уравновешенное сокращение по сингулярным числам Ганкеля и аппроксимация по сингулярному возмущению. Показано, что модель (2), редуцированная в физических координатах аппроксимирует модель (1) достаточно качественно и воспроизводит экспоненциальную составляющую процессов (рис. 2). Показано также, что модели, полученные при редукции в абстрактных координатах, аппроксимируют модель (1) с более точным воспроизведением экспоненциальной и колебательной составляющих динамики (рис. 3).

Приводится метод распределения весов при редукции многомерных систем, позволяющий повысить точность аппроксимации при существенном расхождении норм входных или выходных сигналов между собой. Данный метод позволяет преобразовать редуцированные модели с неудовлетворительными результатами аппроксимации так, что результирующие редуцируемые модели обеспечивают приемлемые результаты для всех связей входов и выходов, либо точный результат для определенной заданной связи вход-выход.

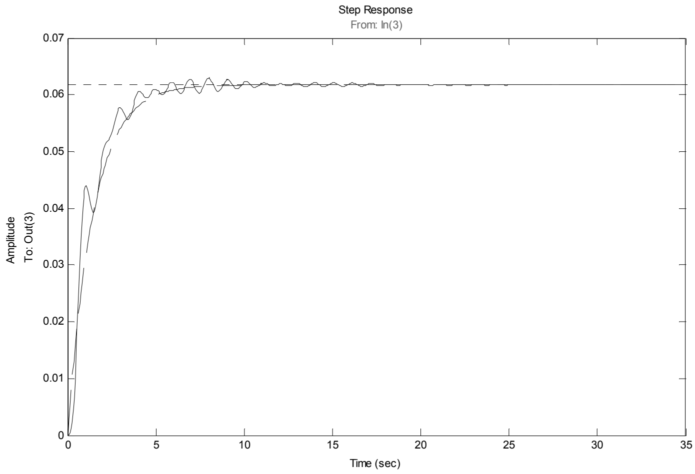


Рис. 2. Сравнение реакций на единичное ступенчатое воздействие исходной модели (1) (сплошная) и редуцированной модели в физических координатах (2) (штриховая)

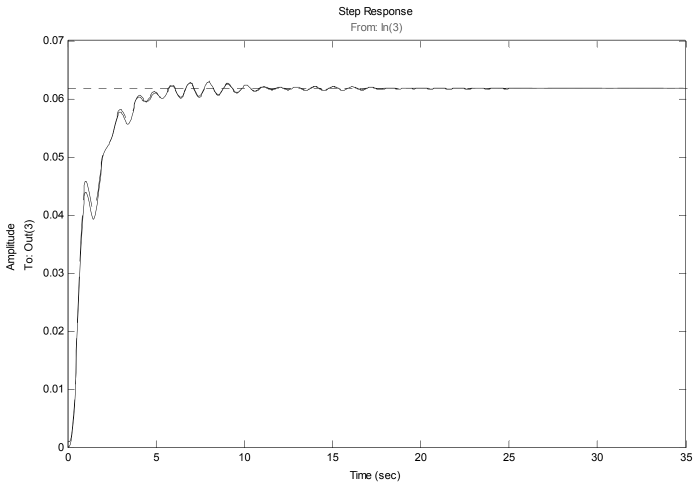
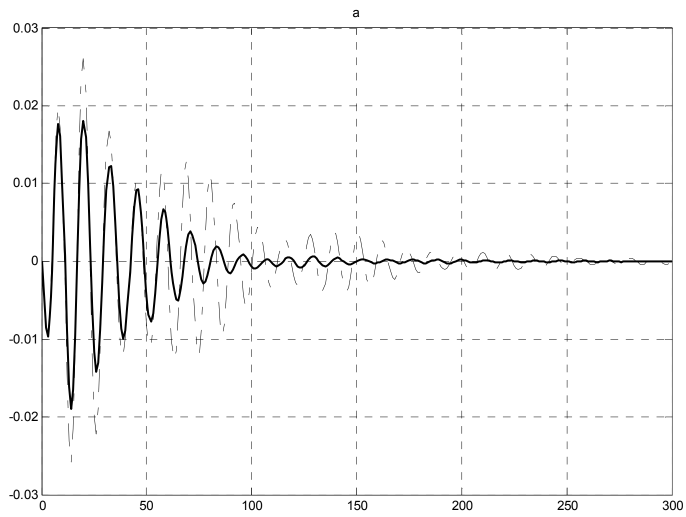


Рис. 3. Сравнение реакций на единичное ступенчатое воздействие для исходной модели (1) (сплошная) и редуцированной (штриховая) моделей в абстрактных координатах

Сущность метода заключается в предварительной обработке редуцируемой системы таким образом, чтобы нормы входных и выходных сигналов совпадали, проведением процедуры редукции и дальнейшем восстановлении исходных весов для редуцированной системы.

В четвертом разделе также вводится метод, позволяющий осуществлять преобразование методов синтеза регуляторов так, что регуляторы по вектору состояния преобразуются в регуляторы по выходным переменным при помощи процедуры редукции.



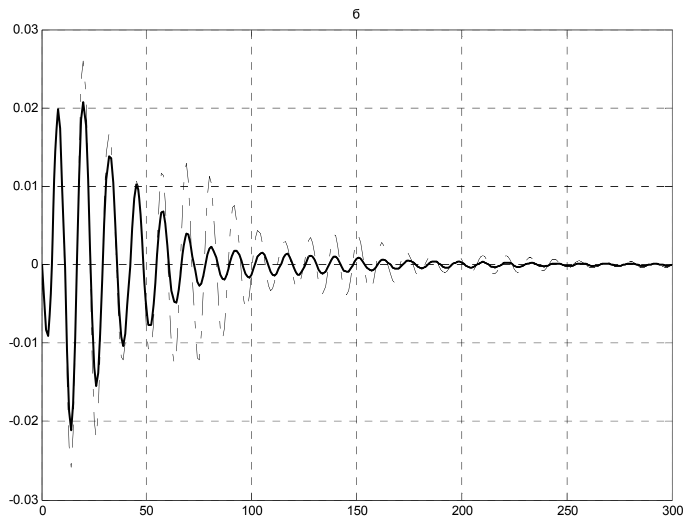


Рис. 4. Переходные процессы изменения мощности по первой линии (рис. 1) при ограничении перетока в робастной локально оптимальной системе с пропорциональным регулятором и вычислением управлений на основе динамической (а) и статической (б) моделей ЭЭО. Тонкой линией показано поведение модели в отсутствие управлений

Сущность метода заключается в том, что исходная модель сокращается до такого порядка, что число координат состояния равно числу выходных переменных, и дальнейшем переносе управляющего сигнала с помощью матрицы связи выходных переменных с координатами состояния.

Далее для преобразованных к разностным уравнениям моделей осуществляется синтез локально оптимальных дискретных регуляторов при наличии ограничений на координаты. Один из результатов исследования, иллюстрирующий работоспособность системы локально оптимального управления для случая модели (11) приведен на рис. 4 для двух классов моделей, рассматриваемых при построении управлений.

Вычислительный эксперимент завершается оценками асимптотической устойчивости для математических моделей с детерминированными параметрами. Также оцениваются связи между нормами возмущений и управлений, абсолютными значениями параметра γ и нормами управлений. Одна из таких зависимостей представлена на рис. 5.

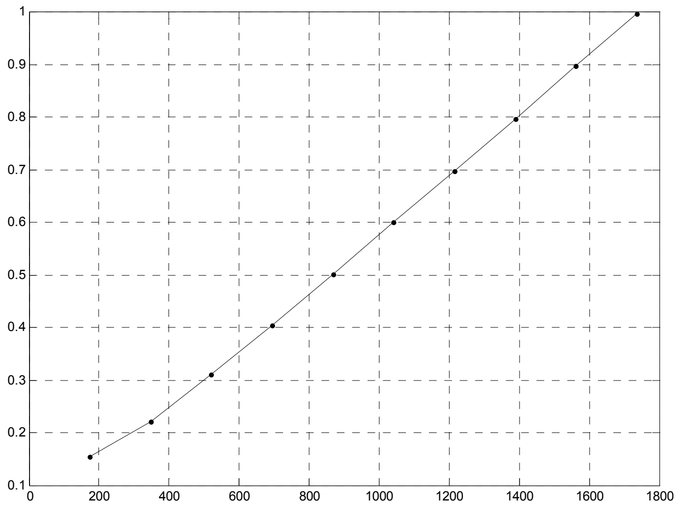


Рис. 5. Связь между евклидовыми нормами управляющего сигнала и возмущающего сигнала на первом узле ЭЭО (рис. 1) для случая замкнутой системы (11)

Приложение содержит комплекс программ в инструментальной системе MatLab, выполняющий рассматриваемые в работе вычислительные эксперименты.

Заключение. В диссертации получены основные результаты:

1. Разработанные и исследованные структурно инвариантные редуцированные математические модели ЭЭО определяют достаточный класс робастности для синтеза локально оптимальных систем ограничения перетоков активной мощности, что позволяет гарантировать управляемость, наблюдаемость и статическую определимость моделей.

2. Разработанные модели систем локально оптимального управления для статических и динамических регуляторов на основе операторов оптимизации позволяют выполнить синтез с учетом ограничений на координаты и управления, включающий достаточные условия устойчивости (в частности, асимптотической устойчивости) в классе предлагаемых редуцированных моделей ЭЭО.

3. Разработан комплекс программ в инструментальной системе MatLab, реализующий разработанные модели для анализа и синтеза, включающие редуцированные модели, операторы оптимизации управлений и методики исследования.

4. Проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие корректность результатов моделирования на основе предложенных моделей и методов для систем ограничения перетоков на основе средств разработанного программного комплекса.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Васильев А.Ю., Куприянов В.Е. Методы редукции линейных математических моделей. Фундаментальные исследования и инновации в технических ун-тах: Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высш. шк., СПб, Изд-во СПбГПУ, 2009.

2. Васильев А.Ю., Куприянов В.Е. Обзор методов редукции с применением подпространства Крылова. Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских ун-тах: Материалы XIV Всероссийской конференции, т.1, СПб, Изд-во СПбГПУ, 2010.

3. Васильев А.Ю., Куприянов В.Е. Весовой подход к решению задачи редукции многомерных систем. Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: Материалы XVII Международной научно-методической конференции, т.1, СПб, Изд-во СПбГПУ, 2011.

4. Васильев А.Ю., Козлов В.Н., Куприянов В.Е. Методы редукции динамических систем (с приложениями в энергетике) / под ред. В.Н. Козлова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 109 с.

5. Васильев А.Ю. Редукция многомерных систем на основе распределения весов входных и выходных сигналов. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2(120), 2011. – с. 118-123.

6. Васильев А.Ю., Куприянов В.Е. Синтез регуляторов по выходу для линейных объектов. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 6.1 (138), 2011. – с. 170-172.

7. Васильев А.Ю., Козлов В.Н. Синтез управления для энергосистемы на основе редукции моделей с сохранением статических режимов. Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XV Всероссийской научно-методической конференции. Санкт-Петербург. Т.2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – с. 52-54.

8. Васильев А.Ю. Условия асимптотической устойчивости систем стабилизации с операторами допустимых решений и оптимизации // в кн. Козлов В.Н. Негладкие системы, операторы оптимизации и устойчивость. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2012. – с. 74-78.

9. Васильев А.Ю. Синтез стабилизирующего робастного управления частотой и активной мощностью энергообъединения на основе редуцированной модели. Семнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Сборник тезисов – СПб.: Издательство РГГМУ, 2012. – с.123.