

На правах рукописи



Рябов Николай Олегович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ
СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ
ЭНЕРГОБЛОКА**

05 14 03 - Ядерные энергетические установки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор



29 МАЯ 2008

Москва – 2008

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете)

Научный руководитель доктор технических наук
Давиденко Николай Никифорович

Научный консультант. кандидат физико-математических
наук, доцент
Семенов Андрей Артемьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Кавун Олег Юрьевич,
НТЦ ЯРБ
кандидат физико-математических
наук, доцент
Савандер Владимир Игоревич,
МИФИ

Ведущая организация. Всероссийский Научно-
Исследовательский Институт Атом-
ных Электростанций (ВНИИАЭС)

Защита диссертации состоится «25» июня 2008 г в 17 час 00 мин на
заседании диссертационного совета Д212.130 04 МИФИ
по адресу 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан «23» мая 2008 г

Просим принять участие в работе совета или прислать отзывы в
одном экземпляре, заверенном печатью организации, по
адресу МИФИ

Ученый секретарь диссертационного
совета МИФИ, д ф -м н, профессор



И И Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Растущее мировое потребление энергоресурсов приводит к необходимости развития энергетики России. Это развитие предполагается осуществлять, помимо прочего, за счет строительства новых атомных электростанций, увеличения мощностей уже существующих АЭС и продления сроков эксплуатации энергоблоков. Таким образом, планируется возрастание доли электроэнергии, выработка которой приходится на атомную энергетику, при этом возникает необходимость эксплуатации реакторов в условиях переменного графика нагрузки.

Эти обстоятельства делают актуальными задачи совершенствования качества обучения эксплуатационного персонала, а также разработки эффективных алгоритмов управления реактором с целью обеспечения безопасности и экономичности работы АЭС. Предлагаемая вниманию диссертационная работа является вкладом в решение этих важных для практики задач.

При решении упомянутых задач возникает необходимость использовать математические модели динамики атомной станции, в первом случае в составе программ-тренажеров для обучения персонала АЭС, во втором случае – в диагностирующих и прогнозирующих поведение реактора программных комплексах.

В математическом смысле программы, моделирующие динамику ЯЭУ, осуществляют решение некоторой системы дифференциальных уравнений с начальными условиями, записанных для параметров состояния моделируемого объекта (задачи Коши). Следовательно, для повышения эффективности использования динамических моделей целесообразна разработка быстроедействующих методик и программных средств, позволяющих получить начальное состояние модели, соответствующее экспериментальным данным.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключалась в разработке способа идентификации нестационарного состояния реактора на примере моделирования ксеноновых переходных процессов в активной зоне ВВЭР-1000. В процессе работы в этом направлении были решены следующие задачи

- анализ факторов, определяющих характер ксеноновых переходных процессов на основе «точечной» модели с учетом обратной связи по мощности,
- построение модели малой размерности, описывающей детализированную модель реактора в эксплуатационной области значений параметров,
- модификация фильтра Калмана-Бьюси для модели малой размерности ксеноновых переходных процессов,
- численное исследование предлагаемых в диссертации методик и алгоритмов

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

- проведен качественный анализ «точечной» модели ксеноновых переходных процессов в активной зоне ВВЭР-1000 с учетом обратной связи по мощности, в результате впервые выделено два безразмерных параметра, полностью определяющих динамику системы и построена диаграмма типов равновесного состояния реактора,
- впервые предложена методика построения модели малой размерности, аппроксимирующей детализированную модель реактора, с использованием базиса главных компонент,
- впервые предложена новая методика восстановления начального состояния реактора в рамках детализированной модели с использованием

модификации фильтра Калмана-Бьюси, построенного для модели малой размерности,

- получены оценки точности восстановления поля энерговыделения с использованием аттестованного программного комплекса «ПРОСТОР»

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенная методика построения модели малой размерности используется для решения следующих практических задач

- настройки распределенной модели активной зоны в составе тренажера 2 блока КлиАЭС на текущее состояние реактора,
- разработки программного комплекса для оптимизации управления в эксплуатационных режимах реактора подавления ксеноновых колебаний, оптимизации боромассообмена в первом контуре РУ ВВЭР-1000, оптимизации несения нагрузки электрической мощности,
- восстановления трехмерного поля энерговыделения по показаниям вне-реакторных датчиков нейтронного потока

Положения, выносимые на защиту

- результаты качественного анализа «точечной» модели ксеноновых колебаний;
- методика построения малопараметрической модели ксеноновых колебаний,
- методика восстановления пространственных распределений концентраций ксенона и иода,
- результаты сравнения полей энерговыделения в активной зоне реактора, полученных при настройке состояния активной зоны при помощи предлагаемых методик и методик, использующихся на практике

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных семинарах и конференциях

- Научная сессия МИФИ (2004, 2006, 2007),
- Международная конференция МАГАТЭ, посвященная 50-летию атомной энергетики (2004),
- Конференция по проблеме физики реакторов ВОЛГА (2004, 2006)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 работ, включая 2 статьи в реферируемых журналах из списка ВАК

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 55 источников. Общий объем работы составляет 111 страниц, содержит 40 рисунков и 2 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен анализ проблемы моделирования концентраций ксенона и иода в задачах управления ядерным реактором. Рассмотрены основные способы описания распределения ксенона и иода в объеме активной зоны, применение различных моделей для построения оптимального управления реактором. Показана необходимость расчета распределений концентраций ксенона и иода для решения различных задач эксплуатации. Рассмотрены основные способы решения этой задачи, отмечены их особенности. Показано, что существующие методы не обеспечивают хорошей точности восстановления трехмерного энергораспределения при наличии ксеноновых колебаний.

На основе анализа существующих методик предложен подход к решению задачи настройки состояния математической модели, описывающей ксеноновые переходные процессы. Схема предлагаемого алгоритма приведена на рис 1

Этот подход заключается в использовании модификации фильтра Калмана-Бьюси для определения начального состояния математической модели по результатам наблюдений. Применение фильтра Калмана возможно только для моделей с небольшим количеством фазовых переменных (менее 100). Поэтому, во-первых, в вектор состояния такой модели включаются только концентрации ксенона и иода и, во-вторых, для уменьшения размерности вектора, описывающего распределения концентраций ксенона и иода, применяется линейное преобразование, использующее базис главных компонент. Поскольку в данной методике кон-

центрации ксенона и иода входят в один вектор состояния, то была разработана методика приведения этих величин к безразмерному виду. После

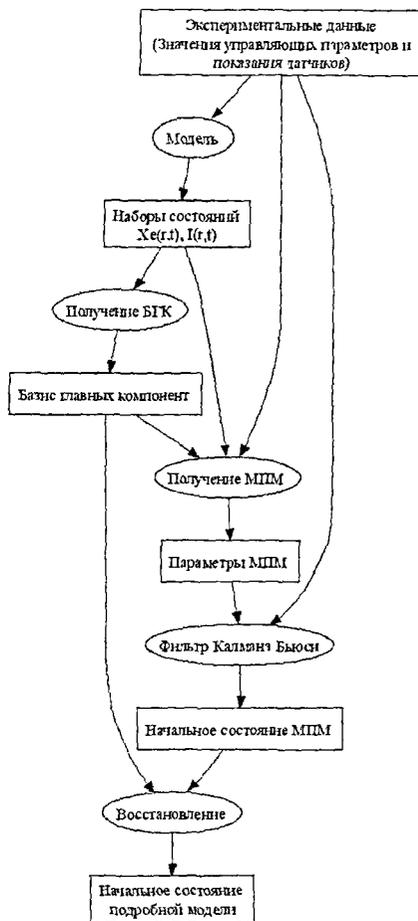


Рис 1. Схема алгоритма получения начального состояния модели МПМ – малопараметрическая модель, БПК – базис главных компонент

получения базиса главных компонент на основе результатов моделирования и экспериментальных данных строится модель ксеноновых переходных процессов, в которой трехмерные распределения ксенона и иода описываются небольшим количеством параметров (порядка 10). Эта модель используется для фильтрации экспериментальных данных, в результате которой получается начальное состояние модели. На рисунке она обозначена как МПМ – малопараметрическая модель

Тестирование методики осуществлялось при помощи программного комплекса «ПРОСТОР», который выступал и в роли настраиваемой модели, и как расчетная модель для создания набора «экспериментальных» данных

Во второй главе приводятся результаты исследования точечной модели ксеноновых процессов с учетом обратной связи по мощности с использованием программного комплекса «ПРОСТОР»

Программный комплекс «ПРОСТОР» представляет собой средство для моделирования пространственно распределенных процессов в реакторной установке ВВЭР-1000. Он состоит из модуля пространственной нейтронной кинетики, модуля теплогидравлики активной зоны и модуля теплогидравлического расчета энергетического оборудования и систем реакторной установки. Этот комплекс использовался автором для проведения расчетов ксеноновых процессов с целью анализа предлагаемых алгоритмов

Модуль нейтронной кинетики основан на двухгрупповом диффузионном приближении кинетики реактора с шестью группами запаздывающих нейтронов. Учитывается изменение изотопного состава топлива, процессы выгорания и образования самария и ксенона. Учитываются обратные связи по теплофизическим параметрам активной зоны.

Модули расчета теплогидравлических процессов в активной зоне и энергетическом оборудовании выполнены на основе одномерной равновесной модели потока. Система уравнений тепломассопереноса решается численно. Рассчитываются поля температур в твэлах.

Было рассмотрено точечное приближение модели отравления ксеноном, которое описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений баланса ксенона и иода, дополненной алгебраическим (усредненным по объему активной зоны) уравнением баланса нейтронов в одногрупповом приближении

$$\begin{cases} \frac{dJ}{dt} = -\lambda_J + \gamma_J \Sigma_f \Phi \\ \frac{dX}{dt} = -\lambda_X X - \sigma_X X \Phi + \lambda_J J \\ \left(\nu \Sigma_f - \Sigma_a - l - \sigma_X X + k_\Phi \frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi_0} \right) \Phi = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где X – концентрация ксенона-135, [$1/\text{см}^3$], J – концентрация иода-135, [$1/\text{см}^3$], λ_X, λ_J – постоянные распада ядер ксенона и иода, [$1/\text{с}$], γ_X, γ_J – выход ядер ксенона и иода на один акт деления, σ_X – микросечение захвата нейтронов ксеноном-135, [см^2], Φ – нейтронный поток, [$\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$], Φ_0 – равновесный нейтронный поток, $k_\Phi = \Phi_0 \frac{\partial}{\partial \Phi} (\nu \Sigma_f - \Sigma_a - l)$ – параметр мощностной обратной связи, l – коэффициент утечки нейтронов, Σ_a, Σ_f – макросечения захвата нейтронов и деления ядер, [см^{-1}], ν – выход нейтронов на один акт деления.

Данную систему уравнений можно привести к безразмерному виду, введя следующую замену переменных

$$\left\{ X = \frac{(\gamma_X + \gamma_J) \Sigma_f}{\sigma_X} x, \Phi = \frac{\lambda_X}{\sigma_X} \phi, J = \frac{\gamma_J \lambda_X \Sigma_f}{\lambda_J \sigma_X} j, t = \frac{\tau}{\lambda_X} \right\} \quad (2)$$

Подставляя выражения (2) в уравнения (1), получим безразмерную систему уравнений динамики ксеноновых процессов при наличии обратной связи по мощности

$$\begin{aligned}\frac{dx}{d\tau} &= -(1 + \phi)x + \frac{\phi + \gamma_J}{\gamma + 1}, \\ \frac{d\gamma}{d\tau} &= \lambda(\phi - \gamma), \\ \phi &= f_0(1 + ax)\end{aligned}\tag{3}$$

Здесь введены обозначения

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\lambda_J}{\lambda_X}, \gamma = \frac{\gamma_J}{\gamma_X}, \\ f_0 &= \phi_0 \left(1 + \frac{\Sigma_a + l - \nu\Sigma_f}{k_\Phi} \right), \\ a &= \frac{(\gamma_J + \gamma_X)\Sigma_f}{\Sigma_a + l - \nu\Sigma_f - k_\Phi}\end{aligned}\tag{4}$$

Таким образом, приведение уравнений к безразмерному виду позволило сократить количество параметров, и выявить два безразмерных комплекса a и f_0 , определяющих качественные характеристики системы типы точек равновесия, области устойчивости, области существования колебательного режима. Проведено качественное исследование системы (3) на устойчивость в первом приближении, в результате которого выявлено существование двух точек равновесия системы, из которых лишь одна реализуема для реактора с отрицательной обратной связью, что в большинстве случаев справедливо для ВВЭР-1000. Были также определены собственные числа оператора системы (3), линеаризованного в окрестности физически реализуемой точки равновесия. Собственные числа, в зависимости от параметров a и f_0 , могут быть как действительными, так и комплексными, с действительной частью разного знака. Таким образом, выявлена обусловленность типа равновесного состояния реактора от параметров a и f_0 .

Описанная методика приведения точечной модели к безразмерному виду использовалась для масштабирования распределений концентраций ксенона и йода при построении нормы пространства состояний модели реактора

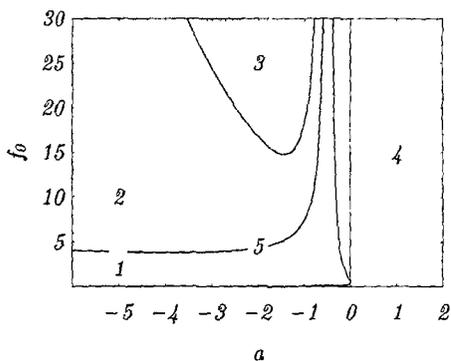


Рис 2 Области параметров, в которых физически возможная точка равновесия реактора принадлежит соответствующим типам

- 1 – устойчивый фокус,
- 2 – неустойчивый фокус,
- 3 – неустойчивый узел,
- 4 – устойчивый узел,
- 5 – центр (граница устойчивости)

построения модели малой размерности (малопараметрической модели) для описания ксеноновых процессов, при допустимых параметрах управления.

При решении задачи принимается во внимание, что в эксплуатационных режимах маневрирования мощностью реактора управление происходит в строго регламентированных пределах. Ограничение управляющих воздействий на реактор приводит к тому, что в нем реализуются не все возможные состояния, а лишь некоторое их подмножество. Это значит, что существуют некоторые характерные распределения концентраций ксенона и иода, реализующиеся при эксплуатации. Поэтому задача построения модели малой размерности рассматривалась как задача аппроксимации множества характерных переходных процессов.

Поставленная задача решалась в несколько этапов

На рис 2 приведена диаграмма типов решений уравнений рассматриваемой модели ксеноновой динамики. Были проведены расчеты по трехмерной модели комплекса «ПРОСТОР», которые подтвердили проведенный анализ. Таким образом, предложен простой способ, позволяющий по интегральным свойствам активной зоны определить стабильность реактора по отношению к ксеноновым колебаниям.

В третьей и четвертой главах рассматривается задача

- 1) Выделение в качестве вектора состояния модели реактора из всего множества параметров, описывающих состояние реактора, только концентраций ксенона и иода («физическая редукция»)
- 2) Выбор подпространства небольшой размерности таким образом, чтобы любое состояние реактора, реализующееся в ходе характерного процесса, представлялось в новых координатах с наименьшей среднеквадратичной погрешностью
- 3) Выбор структуры оператора динамической модели описывающей переходные процессы в этом подпространстве
- 4) Определение коэффициентов модели методом наименьших квадратов

При выборе базиса подпространства, в котором характерные состояния аппроксимируются с наименьшей среднеквадратичной ошибкой, решалась следующая задача минимизации. Дальнейшие формулировки построены для предположения, что состояние активной зоны может быть представлено в виде вектора конечной размерности, однако все рассуждения могут быть обобщены и на непрерывный случай

Пусть имеется матрица $X = \{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N\}$, составленная из векторов, описывающих точки на фазовых траекториях характерных переходных процессов. Нужно определить такую матрицу $B = \{\vec{b}_1, \vec{b}_2, \dots, \vec{b}_m\}$, $m < N$, составленную из ортогональных векторов из того же пространства, что и \vec{x}_i , которая обеспечивает минимум среднеквадратичной ошибки описания состояний \vec{x}_i в базисе, состоящем из векторов \vec{b}_j

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N \|\vec{x}_i - \vec{p}_i\|^2, \quad (5)$$

где $\vec{p}_i = \sum_{j=1}^m (\vec{x}_i, \vec{b}_j) \vec{b}_j$ – проекция вектора \vec{x}_i на подпространство, определяемое B

Как оказалось, решением этой задачи является базис главных компонент, элементы которого определяются по формуле

$$\vec{b} = X\vec{w}_i, \quad i = 1, \quad m, \quad (6)$$

где \vec{w}_i – собственные вектора матрицы $Q = X^T X$, соответствующие первым m собственным числам

Также была рассмотрена аппроксимация состояний реактора с помощью базиса собственных векторов линеаризованного в окрестности

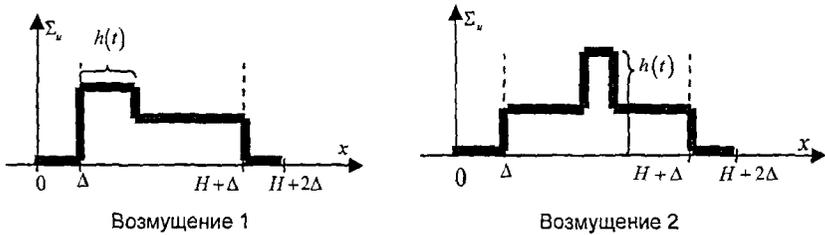


Рис. 3. Имитируемые возмущения сечения поглощения

равновесия оператора модели. Было показано, что такой подход применять для описания характерных режимов реактора нецелесообразно. Это можно объяснить тем, что изменение управляющих параметров приводит к изменению равновесного состояния и, соответственно, набора собственных векторов.

Поскольку собственные вектора часто используются для представления состояния реактора, то было проведено сравнение точности представления состояния модели реактора в базисе главных компонент и в базисе собственных векторов. Рассматривалась одномерная одноступенчатая диффузионная модель реактора

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(x, t)}{\partial t} = \nabla D \nabla \Phi(x, t) + (\nu \Sigma_f - \Sigma_{a0} - \Sigma_u(x, t)) \Phi(x, t), \quad (7)$$

где D – коэффициент диффузии, v – средняя скорость нейтронов, $\Phi(x, t)$ – поток нейтронов, ν – количество нейтронов на одно деление, Σ_f – сече-

ние деления, Σ_{a0} – сечение поглощения без возмущения, $\Sigma_u(x,t) = \Sigma_{u0}h(t)$ – возмущение сечения поглощения, имитирующее управляющее воздействие

На рис 3 изображены формы функции $\Sigma_u(x,t)$, используемые при имитации управляющего воздействия при проведении численного эксперимента. Возмущение 1 имитирует деформацию высотного поля нейтронов,

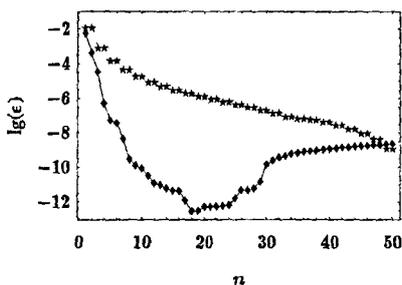


Рис 4. Сравнение ошибок проектирования на БГК (♦) и базис собственных векторов (*)

возмущение 2 имитирует деформацию радиального поля нейтронов при перемещении стержней СУЗ в центральной области активной зоны. Были рассчитаны наборы состояний, соответствующие таким возмущениям, для которых был рассчитан базис главных компонент. Также был рассчитан базис собственных

векторов невозмущенного оператора модели реактора. После этого была проведена оценка точности аппроксимации состояний для этих двух случаев. На рис 4 изображены зависимости точности аппроксимации разными методами в зависимости от количества векторов в базисе. Точность в данном случае вычислялась как максимальное отклонение аппроксимированного вектора от исходного

$$\epsilon_n = \frac{\max_{i,j} \left| \varphi_i^j - \sum_{k=1}^n (\vec{\varphi}_i, \vec{b}_k) b_k^j \right|}{\max_{i,j} |\varphi_i^j|} \quad (8)$$

Как видно из рис 4, точность аппроксимации состояния модели в 100 раз выше при использовании базиса, составленного из 4 главных компо-

Использование 8 главных компонент даст выигрыш по точности в 10^4 раз. Таким образом, проведенное исследование показало целесообразность использования метода главных компонент для построения модели малой размерности.

В четвертой главе рассматривается задача идентификации оператора модели малой размерности для ксеноновых переходных процессов.

Состоянием \vec{y} модели малой размерности является вектор проекций распределений ксенона и иода на вектора базиса главных компонент

$$\vec{y} = B^T \vec{x}, \quad (9)$$

где $B = \{\vec{b}_1, \dots, \vec{b}_m\}$ – матрица, столбцами которой являются вектора базиса, а элементами вектора \vec{x} являются концентрации ксенона и иода в расчетных ячейках, выраженных в безразмерных единицах, определенных в главе 2.

Малопараметрическая модель описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающих управляющие параметры. Так как в физической модели ксеноновых процессов эта система разрешима относительно производных концентраций ксенона и иода, то в основу малопараметрической модели была положена следующая структура задачи Коши

$$\begin{cases} \frac{d\vec{y}}{dt} = \hat{L}(\vec{u})\vec{y}, \\ \vec{y}(0) = \vec{y}_0, \end{cases} \quad (10)$$

где $\hat{L}(\vec{u})$ – оператор малопараметрической модели, $\vec{u} = \{u_1, \dots, u_p\}$ – вектор управляющих параметров, \vec{y}_0 – начальное условие, которое в дальнейшем изложении опущено.

Для идентификации оператора $\hat{L}(\vec{u})$ необходима априорная информация о нем. Эту информацию можно получить из исходной физической мо-

дели и результатов численного моделирования переходных ксеноновых процессов. На основе исходной физической модели производится выбор структуры оператора, а результаты численного моделирования позволяют определить коэффициенты оператора заданной структуры.

Если подставить проекцию состояния \vec{x} на подпространство, определяемое выбранным базисом, в исходную систему уравнений, и затем выделить компоненты вектора состояния малопараметрической модели, то можно получить следующую структуру малопараметрической модели.

$$\frac{dy_i}{dt} = \sum_{k=1}^m a_i^k y_k + \sum_{k,j=1}^m d_i^{jk} y_k y_j + \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^p h_i^{jk} y_k u_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

Данная модель, теоретически, должна хорошо описывать переходные процессы, вызванные как сильными, так и слабыми возмущениями. Однако при попытках получить модель данной структуры возникала следующая ситуация: при устойчивом состоянии исходной модели малопараметрическая модель получалась неустойчивой. Это связано с плохой обусловленностью задачи идентификации параметров малопараметрической модели.

Лучшую обусловленность при идентификации параметров дает линейная модель, которая хорошо описывает колебательные процессы, вызванные небольшими управляющими воздействиями. Модель такой структуры имеет вид:

$$\frac{dy_i}{dt} = \sum_{k=1}^m a_i^k y_k + \sum_{j=1}^p b_i^j u_j + c_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

Структура модели (12) использовалась далее.

Для решения задачи идентификации начальных условий, необходима модель показаний реакторных датчиков или их функционалов, которая также была представлена в виде линейной аппроксимации исходной модели:

$$\mu_i = \sum_{k=1}^m f_i^k y_k + \sum_{j=1}^p g_i^j u_j + d_i, \quad i = 1, 2, \dots, h, \quad (13)$$

где h – количество датчиков, μ_i – показания i -го датчика, f_i^j, d_i – неизвестные постоянные параметры

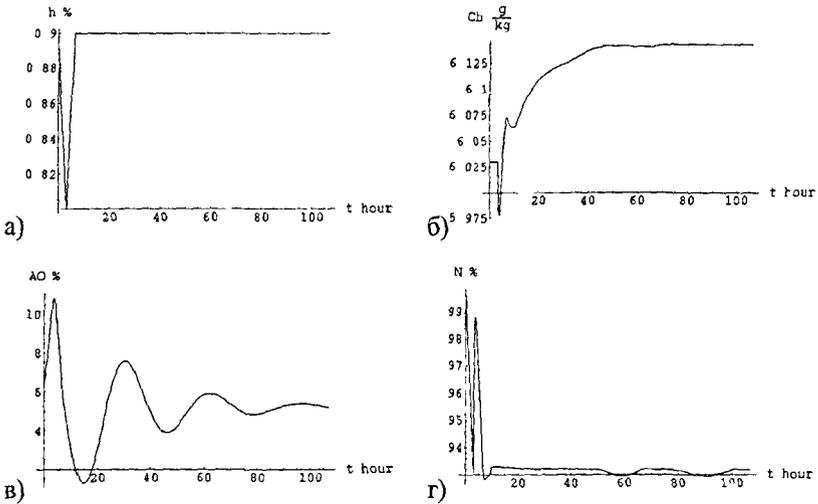


Рис 5 Интегральные параметры реактора при возмущении 10 групп СУЗ и изменением концентрации борной кислоты а) положение 10 группы СУЗ, б) концентрация борной кислоты, в) аксиальный офсет, г) интегральная мощность

При решении задачи идентификации параметров модели, описываемой уравнениями (12) – (13), использовался метод наименьших квадратов. Для этого рассчитывались переходные процессы, в результате которых получался набор $X = \{\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_q\}$ из q состояний в разные моменты времени, соответствующие значениям управляющих параметров $U = \{\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_q\}$ и показаний датчиков $M = \{\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_q\}$. На основе полученной последовательности состояний строился базис главных компонент $B = \{\vec{b}_1, \dots, \vec{b}_m\}, m \leq q$. После этого рассчитывались проекции состояний X на вектора базиса B как $Y = B^T X$. Далее аппроксимировались производные проекций по времени, и решалась задача наименьших квадратов для определения параметров малопараметрической модели

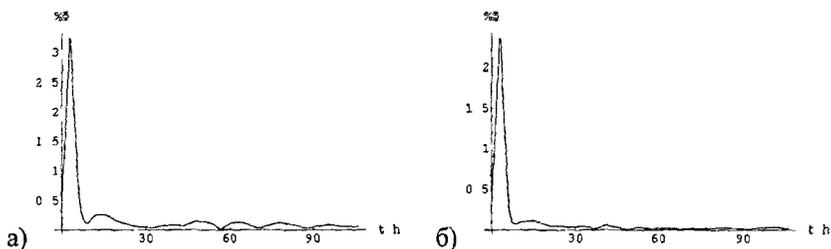


Рис 6 Среднеквадратичная ошибка описания поля нейтронов малопараметрической моделью а) 2 базисных вектора, б) 4 базисных вектора.

Для проверки предложенного способа построения малопараметрической модели были проведены расчеты для нескольких колебательных процессов

На рис 5 представлены графики изменения во времени основных параметров реактора для одного из тестовых процессов. Применением к этому процессу описанной выше процедуры были получены линейные модели малой размерности для 2 и 4 базисных векторов. Были получены оценки точности описания этих процессов полученными моделями. Графики ошибок в описании поля нейтронов приведены на рис 6.

Из этих графиков видно, что ошибка сильно увеличивается во время внесения возмущения, при отсутствии возмущений ошибка меняется слабо, составляя в среднем 0,1%. Также можно заметить, что пик ошибки меньше для модели более высокой размерности. Это объясняется тем, что базис главных компонент хорошо описывает характерные состояния системы, то есть состояния, которые встречаются более часто. В данном случае наблюдалось единичное возмущение реактора 10 группой СУЗ, и соответствующие этому возмущению состояния не характеризуют рассмотренный процесс.

В пятой главе диссертации демонстрируется использование фильтра Калмана-Бьюси на основе малопараметрической модели, для решения задачи определения концентраций ксенона и иода. При использовании этого

метода, систему уравнений модели (12), (13) удобно рассматривать в векторно-матричном виде

$$\begin{cases} \frac{d\vec{y}}{dt} = A\vec{y} + B\vec{u} + \vec{c}, \\ \vec{\mu} = F\vec{y} + G\vec{u} + \vec{d}, \\ \vec{y}(0) = \vec{y}_0, \end{cases} \quad (14)$$

где A, B, F, G – матрицы, \vec{c}, \vec{d} – постоянные векторы, определяемые при решении задачи наименьших квадратов, описанной в четвертой главе, \vec{y}_0 – начальное условие

Если провести дискретизацию этой системы уравнений для моментов времени $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{s-1} < t_s = T$, где T – длительность переходного процесса, то дискретный аналог задачи Коши (14) будет иметь вид.

$$\begin{cases} \vec{y}_{k+1} = A_k \vec{y}_k + B_k \vec{u}_k + \vec{c}_k \\ \vec{\mu}_{k+1} = F_k \vec{y}_{k+1} + G_k \vec{u}_{k+1} + \vec{d}_k \end{cases} \quad (15)$$

С другой стороны, этим моментам времени соответствуют экспериментальные показания датчиков $\{\vec{\mu}_0^e, \vec{\mu}_1^e, \dots, \vec{\mu}_s^e\}$. Задача состоит в определении такого начального условия \vec{y}_0 , чтобы среднеквадратичное отклонение показаний датчиков, рассчитанных по модели (15), от экспериментальных показаний, было минимально, т е

$$\vec{y}_0 = \arg \min_{\vec{y}_0} \sum_{k=1}^s \|\vec{\mu}_k^e - \vec{\mu}_k(\vec{y}_0)\|^2 \quad (16)$$

Линейность используемой модели позволяет получить явную формулу для вычисления начальных условий. Эта формула имеет вид

$$\vec{y}_0 = X^+ \vec{p},$$

$$X = \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 A_1 \\ \vdots \\ F_s \left(\prod_{k=1}^s A_k \right) \end{pmatrix},$$

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} \vec{\mu}_0^e - \left(F_0 (B_0 \vec{u}_0 + \vec{c}_0) + G_0 \vec{u}_1 + \vec{d}_0 \right) \\ \vec{\mu}_0^e - \left(F_1 \sum_{k=0}^1 A_k (B_k \vec{u}_k + \vec{c}_k) + G_1 \vec{u}_2 + \vec{d}_1 \right) \\ \vdots \\ \vec{\mu}_0^e - \left(F_s \sum_{k=0}^s \left(\prod_{j=k+1}^s A_j \right) (B_k \vec{u}_k + \vec{c}_k) + G_s \vec{u}_{s+1} + \vec{d}_s \right) \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где символом X^+ обозначена псевдообратная матрица. Вектор \vec{p} , имеет блочную структуру. составляющие его блоки – векторы-столбцы – записаны друг под другом в указанном порядке

Для оценки выигрыша в точности расчета поля энерговыделения, который может быть получен, был проведен ряд расчетов. Рассматривался ксеноновый переходный процесс, полученный с помощью программного комплекса «ПРОСТОР» имитацией псевдослучайных возмущений управляющих параметров. На основании расчета этого процесса строилась малопараметрическая модель. Затем проводилось сравнение точности в определении нейтронных полей при восстановлении концентраций ксенона и иода следующими способами

1. Воспроизведение процесса управления, начиная с равновесных начальных условий. В случае, когда колебания затухают, моделируемые параметры состояния будут сходиться к экспериментальным параметрам, если модель адекватно описывает реакторную установку.
2. Воспроизведение процесса с равновесных начальных условий с поддержанием наблюдававшихся мощности и оффсета внесением дополни-

тельных возмущений в значения управляющих параметров – положения рабочей группы СУЗ и концентрацию борной кислоты

- 3 Воспроизведение процесса, начиная с начальных условий, полученных по предлагаемому алгоритму.
- 4 Совместное использование 2 и 3 способа
- 5 Расчет процесса, начиная с реальных начальных концентраций ксенона и иода. Данный расчет проводился для оценки предельной погрешности, вызванной тем предположением, что динамика установки описывается только изменениями концентраций ксенона и иода.

Расчет среднеквадратичной ошибки воспроизведения за интервал времени $[T_1, T_2] \subseteq [0, T]$ проводился по формуле

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varphi_i(\vec{y}_0, t) - \varphi_i^e(t))^2 dt, \quad (18)$$

где $\varphi_i^e(t) = \Phi_i^e(t) / \bar{\Phi}^e(t)$ – «экспериментальный» нейтронный поток в i -й расчетной ячейке в момент времени t , отнесенный к среднему по активной зоне эталонному нейтронному потоку в тот же момент, $\varphi_i(\vec{y}_0, t) = \Phi_i(t) / \bar{\Phi}^e(t)$ – восстановленный нейтронный поток, отнесенный к среднему эталонному нейтронному потоку.

Изменение погрешности определения поля нейтронов во времени носит убывающий характер. Динамику ошибки можно условно разбить на две фазы: фазу быстрого убывания и асимптотическую фазу. В таблице представлены значения ошибок, рассчитанных по формуле (18), для разных способов настройки модели. Нумерация способов соответствует нумерации, приведенной выше.

Таблица Погрешности настройки модели разными методами ($T=100$ ч), %

Интервал \ Метод настройки	1	2	3	4	5
$[0, T]$	65	30	18	19	10
$[T/4, T]$	30	10	3	4	0,3

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В настоящей работе предложена методика, позволяющая провести настройку состояния динамической модели активной зоны на текущее состояние реактора для воспроизведения ксеноновых переходных процессов

По результатам диссертационной работы можно сделать следующие выводы

- 1 В результате качественного анализа «точечной» модели ксеноновых переходных процессов с учетом обратной связи по мощности впервые было выделено 2 безразмерных параметра, полностью определяющих динамику системы. Кроме этого, удалось построить диаграмму типов равновесного состояния реактора, которая согласуется с результатами расчетов по пространственной модели активной зоны
- 2 Впервые предложена методика построения модели малой размерности, аппроксимирующей детализированную модель реактора с использованием базиса главных компонент
- 3 Впервые предложена методика восстановления начального состояния полномасштабной модели с использованием модификации фильтра Калмана-Бьюси, построенного для модели малой размерности
- 4 Показано, что использование фильтра Калмана-Бьюси, построенного на основе малопараметрической модели, позволяет в примерно 10 раз, по сравнению с другими подходами, уменьшить погрешность расчета поля нейтронов при моделировании ксеноновых переходных процессов
- 5 Разработанные методики применены для решения следующих практических задач

- идентификации пространственных распределений ксенона и иода в активной зоне ВВЭР-1000,
- при разработке оптимального аналога системы АКЭ (аппаратура контроля энерговыделения, используется в составе АКНП на 3 блоке Калининской АЭС) для восстановления поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 по показаниям боковых ионизационных камер
- при разработке программного комплекса «Блок оптимизации борного регулирования» («БОБР») для оптимального управления при маневрировании мощностью реактора

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Рябов Н О., Семенов А А Алгоритм настройки распределенной динамической нейтронно-физической модели при воспроизведении пространственных ксеноновых колебаний // Сборник трудов научной сессии МИФИ 2004, том 8, С 195–196
2. N O Ryabov, A A Semenov Algorithm of Spatial Xenon Oscillations Identification // International Conference on Fifty Years of Nuclear Power – the Next Fifty Years P 223–224
3. Рябов Н О , Семенов А А Проекционный метод определения распределений концентраций ксенона и иода в активной зоне ВВЭР-1000 по экспериментальным данным // Материалы конференции по проблемам физики реакторов ВОЛГА-2004 С 230–232
4. Рябов Н О , Семенов А А Расчетно-аналитическое исследование динамических систем, описывающих ксеноновые колебания // Сборник трудов научной сессии МИФИ 2006, том 8 С. 105–106
5. Рябов Н О , Семенов А А Исследование точечной модели ксеноновых колебаний // Известия вузов Ядерная энергетика №2 2006 С 66 – 73

- 6 Рябов Н О , Семенов А А Метод восстановления объемного энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 по показаниям боковых ионизационных камер Физические проблемы топливных циклов ядерных реакторов // Сборник докладов конференции Волга-2006 С 234-235
- 7 Рябов Н О , Семенов А А Об одном методе восстановления объемного энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 по показаниям боковых ионизационных камер // Сборник трудов научной сессии МИФИ 2007, том 8 С. 57–58
- 8 Семенов А А., Рябов Н О., Шукин Н.В , Харитонов В С Использование модели малой размерности для восстановления поля энерговыделения в активной зоне по показаниям боковых ионизационных камер // Известия вузов Ядерная энергетика №4 2007 С 47 – 54

Подписано в печать 21 05 2008 г.
Печать трафаретная

Заказ № 452
Тираж 70 экз

Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш , 36
(495) 975-78-56, (499) 788-78-56
www.autoreferat.ru