

На правах рукописи
УДК 519.711.3: 621.039.56: 681.51.011

ХОДАКОВСКИЙ ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСЧЕТОВ ДИНАМИКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ,
ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРНЫХ И ДРУГИХ УСТАНОВОК**

Специальность 05.13.18 – Теоретические основы математического моделирования,
численные методы и комплексы программ

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки



Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

МОСКВА – 2000

Работа выполнена в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель	- кандидат технических наук, доцент Козлов О.С.
Официальные оппоненты	- доктор технических наук, профессор Норенков И.П. - кандидат технических наук Хазанович И.М.
Ведущее предприятие	- ГУП НИКИЭТ

Защита диссертации состоится « 10 » октябрь 2000 г. в 13¹⁵ на заседании диссертационного совета Д 053.15.12 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва Б-5, 2-ая Бауманская ул., дом 5.

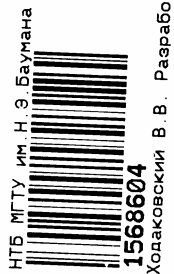
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан « » _____ 2000 г.

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



Волков И.К.



Ходаковский В. В. Разработчик

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Динамические расчеты занимают важное место в проектном обосновании технических систем. В понятие "динамические расчеты" входит как моделирование рабочих процессов в установке, так и расчетное обоснование выбранной системы управления, включая анализ устойчивости, точности, качества переходного процесса, выбор оптимальных параметров и т.д.

Создание программ динамических расчетов требует значительных трудозатрат. Поэтому большое внимание уделяется разработке систем автоматизации динамических расчетов (АДР). Эти системы позволяют в десятки раз сократить время от разработки модели объекта до получения результатов моделирования, повысить надежность результатов расчетов, оптимизировать полученные решения, дают возможность проектировщику сосредоточиться на решении основной задачи и не отвлекаться на разработку программ и алгоритмов. За рубежом и в РФ имеются системы АДР общетехнической направленности для анализа на ЭВМ динамических систем, элементы которых описываются в виде входо-выходных отношений (МОДС, СИАМ, МАСС, Экспресс-Радиус, VisSim, SIMULINK и др.). Эти системы используют структурный метод моделирования, позволяющий формировать модели объектов в виде функциональных схем.

Анализ показывает, что большинство этих программных комплексов (ПК) не позволяют создавать и анализировать модели систем управления большой размерности со сложной топологией структурных схем, например, модель АСУ ТП ядерной энергетической установки (ЯЭУ). В задачах же проектного обоснования безопасности ЯЭУ использование этих ПК ограничено, во-первых, недостаточной эффективностью алгоритмов интегрирования жестких систем алгебро-дифференциальных уравнений, к которым приводит формализация математической модели ЯЭУ или ее элемента, и, во-вторых, отсутствием в библиотеках типовых блоков этих ПК моделей рабочих процессов, протекающих в элементах ЯЭУ.

Таким образом, разработка математического и программного обеспечения для автоматизации исследований динамических процессов в системах автоматического управления (САУ), в элементах ядерных и тепловых энергоустановок, в любых технических системах, описание динамики которых может быть реализовано методами структурного моделирования, является актуальной.

Цель работы.

1. Разработка методики и программных средств для автоматизации процесса формирования структурных схем динамических систем.
2. Разработка численных алгоритмов, обеспечивающих решение задач: моделирования динамических процессов в непрерывных, дискретных и гибридных системах; параметрической оптимизации и идентификации данных.

3. Разработка библиотеки математических моделей типовых элементов систем автоматического управления и рабочих процессов в элементах ЯЭУ.
4. Разработка программных средств, обеспечивающих открытость библиотеки математических моделей.
5. Верификация математического и программного обеспечения и его апробация в задачах проектного обоснования динамики технических систем, включая ЯЭУ.

Научная новизна

1. Разработан метод формирования математических моделей динамических систем большой размерности со сложной топологией структурных схем.
2. Разработан алгоритм, позволяющий определить наличие и состав алгебраических контуров в структурной схеме, минимизировать размер системы нелинейных уравнений, решаемой при развязке контуров.
3. Разработан алгоритм численного расчета якобиана, учитывающий разреженность матрицы связей в графе структурной схемы.
4. Разработаны жестко устойчивые численные алгоритмы интегрирования системы нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ).

На защиту выносятся:

1. Методика структурного моделирования динамических систем, элементы которых описываются в форме входо-выходных отношений.
2. Жестко устойчивые алгоритмы численного интегрирования систем дифференциально-алгебраических уравнений.
3. Библиотека математических моделей динамики типовых элементов САУ и рабочих процессов в элементах реакторных установок.
4. Результаты верификации и апробации разработанного математического и программного обеспечения.

Практическая значимость работы. Разработанное математическое и программное обеспечение реализовано в ПК "МВТУ", который использован:

1. В учебном процессе в МГТУ им. Н.Э.Баумана как инструментальное средство при проведении лабораторных работ по курсам "Управление в технических системах", "Динамика, управление и безопасность ЯЭУ".
2. В проекте модернизации систем тепловой автоматики в контурах многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реакторов типа РБМК-1000 (НИКИЭТ).
3. В проектом обосновании ядерной безопасности АС "УниTERM" (НИКИЭТ).
4. Как средство отработки структуры и алгоритмов управления в АСУ ТП реального времени для энергоблоков с реактором типа ВВЭР в составе моделирующего комплекса "РАДУГА-ЭУ" ("АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ").

Апробация работы Основные результаты диссертационной работы были представлены на Первой Всероссийской конференции УМО и НМС высшей школы

“Роль УМО и НМС как государственно-общественных объединений в совершенствовании качества высшего и непрерывного образования в России”, г. Москва, 4-7 февраля 1998 г.; на семинаре секции динамики Министерства Российской Федерации по Атомной Энергии по теме “Системы управления и измерительно-вычислительные комплексы для установок с ядерными реакторами”, г. Сосновый Бор, 15 – 19 сентября 1997 г.; на НТС Диссертационного Совета Д 053.15.12 МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 научных работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 190 страницах, содержит 64 рисунка, 22 таблицы. Список литературы включает 64 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы автоматизации динамических расчетов в системах автоматического управления, в элементах ядерных и тепловых энергоустановок, в других технических системах, описание динамики которых может быть реализовано методами структурного моделирования, а также сформулирована цель работы.

В первой главе сформулированы основные требования к системам АДР, дана их классификация, проведен анализ существующих ПК для автоматизации динамических расчетов. В конце главы поставлены основные задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена методика структурного моделирования динамических систем, элементы которых описаны отношениями вида вход–выход.

Разработанная методика позволяет автоматизировать все этапы вычислительного эксперимента: создание математической модели объекта исследования, задание численных параметров модели, формирование сценариев развития переходных процессов, проведение численных расчетов и анализ полученных результатов. На рис. 1 представлена блок–схема методики.

Математическая модель объекта формируется пользователем в виде графической структурной схемы, состоящей из блоков и линий связи между ними.

Блок является фундаментальным понятием структурного моделирования и представляет собой функционально самостоятельную, программно реализованную математическую модель того или иного процесса, явления или устройства. На рис. 2 представлена общая конструкция блока. Параметры блока P определяют коэффициенты в уравнениях математической модели блока. Операторами F и G описывается математическая модель блока, при этом оператор F отвечает за поведение переменных состояния блока X (например, в виде системы уравнений для производных переменных состояния), а при помощи оператора G формируются выходы блока Y . Параметры P , состояния X , операторы F и G являются

внутренними атрибутами блока, а входы U и выходы Y служат для обмена информационными потоками с другими частями структурной схемы. Таким образом, блоки описываются в виде входо-выходных отношений и служат вершинами графа схемы. Линии связи являются дугами графа.

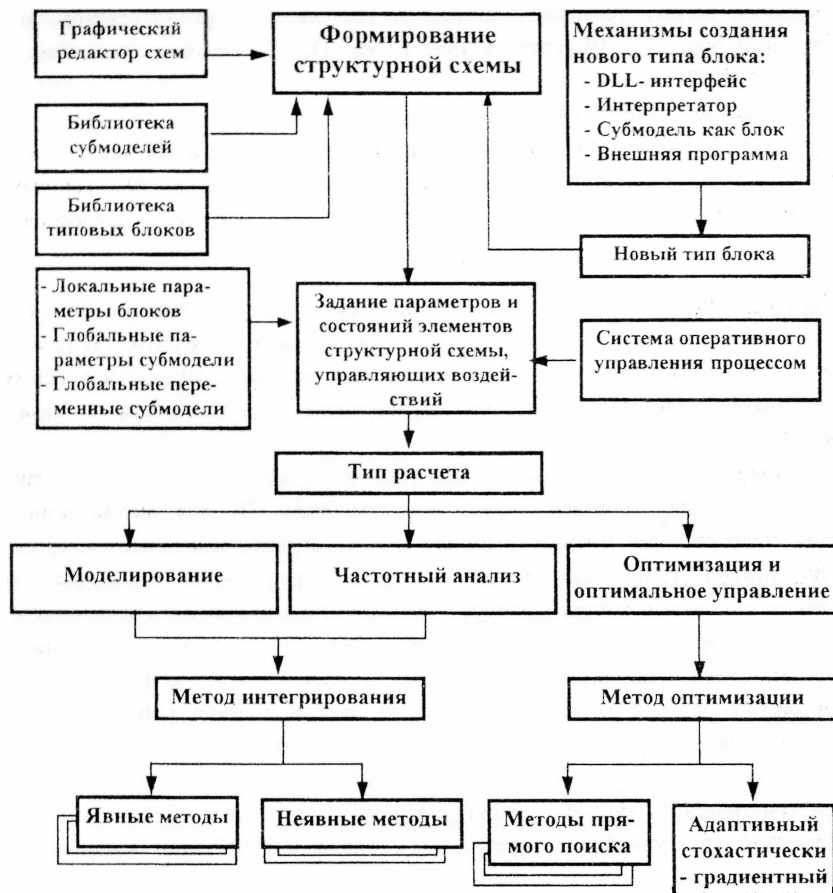


Рис. 1. Блок-схема процесса автоматизации динамических расчетов

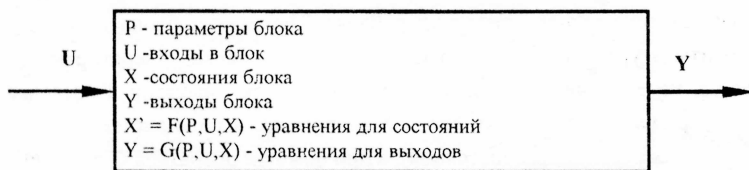


Рис. 2. Общая конструкция блока

В рамках разработанной методики предложена и программно реализована технология, обеспечивающая создание и анализ топологически сложных структурных схем большой размерности (до тысяч блоков, сигналов, параметров).

Блочно-иерархический подход позволяет формировать модель объекта в виде многоуровневых структур неограниченной вложенности. Связь между структурами разных уровней обеспечивается автоматически. Отсутствие ограничений на число входов/выходов блока, размер вектора данных, передаваемых через входы/выходы, позволяет формировать на структурной схеме в виде сигналов потоки информации различной мощности, внутри блоков проводить их векторную обработку и/или преобразование мощности. В результате схема содержит меньше связей, становится возможной реализация нужной конфигурации динамической системы.

Математическая модель объекта, представляемая в виде структурной схемы, описывается как компонентными уравнениями отдельных блоков, так и топологическими уравнениями (неявно заданными через связи между блоками). Последние используются при определении порядка расчета блоков перед началом процесса моделирования. Сначала сортируются блоки, выход которых зависит только от времени, затем – остальные блоки таким образом, чтобы на момент расчета блока все входы в него были определены. Если после этого этапа остались неотсортированные блоки, то они входят в алгебраические контуры.

Алгоритм развязки алгебраических контуров состоит в следующем: методом определяющих переменных находится минимальное число выходных сигналов блоков, при удалении которых из схемы размыкаются все обратные связи в контурах и максимально уменьшается размер решаемой системы нелинейных алгебраических уравнений (НАУ). Алгоритм развязки контуров иллюстрируется последовательно рис. 3, рис. 4, рис. 5 и рис. 6. Итоговый порядок расчета блоков соответствует их нумерации в схеме.

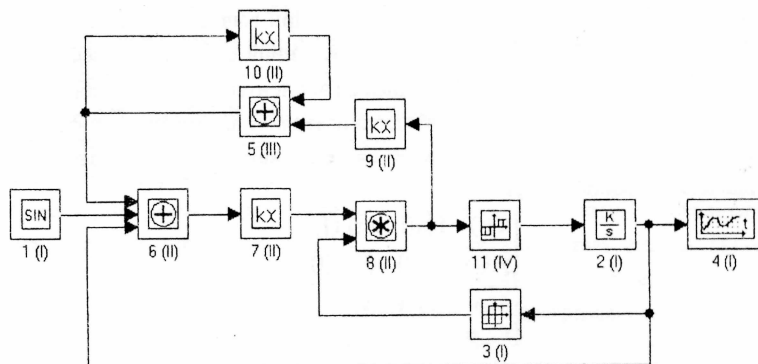


Рис. 3. Исходная структурная схема

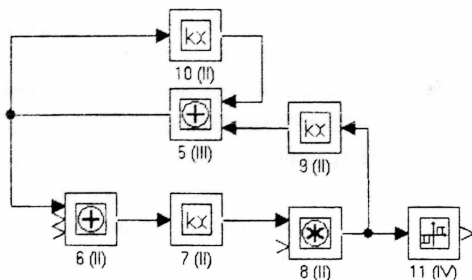


Рис. 4. Структурная схема после первичной сортировки

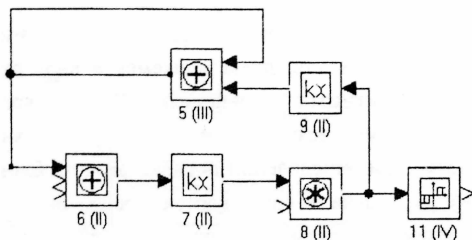


Рис. 5. Пример образования петли при исключении вершины 10

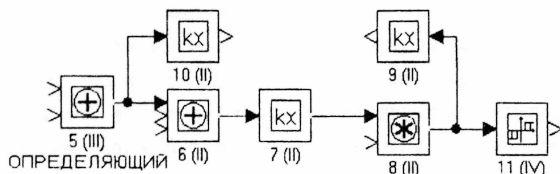


Рис. 6. Определяющий блок и блоки, входящие в алгебраический контур

Разработан новый алгоритм численного расчета якобиана, учитывающий разреженность матрицы связей в графе схемы. При вычислении столбца матрицы Якоби (возмущение по соответствующей переменной состояния) рассчитываются только те блоки, функция влияния которых на элементы данного столбца $\neq 0$.

Таким образом, разработанная методика позволяет автоматически формировать математическую модель объекта в виде системы нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t); \\ y(t) = g(x(t), u(t), y(t), t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_{k+1} = f_d(x_k, u_k); \\ y_k = g_d(x_k, u_k, y_k), \end{cases} \quad (2)$$

где система уравнений (1) описывает непрерывные, а система уравнений (2) – дискретные блоки. Дифференциальные уравнения в (1) приведены к нормальной

форме Коши, что позволяет, в отличие, например, от узлового метода, использовать явные методы интегрирования.

Учитывая, что системы АДР требуют наличия соответствующей базы данных по математическим моделям процессов в элементах технических систем, разработано более 180 надежно функционирующих типовых блоков. Эти блоки входят в состав ПК "МВТУ" в виде ряда библиотек, сгруппированных, в основном, по функциональному признаку. Базовый набор библиотек (*Источники входных воздействий, Данные, Операции математические, Векторные операции, Субструктуры, Динамические звенья, Функции математические, Нелинейные звенья, Логические звенья, Ключи, Дискретные блоки*) образует *Общетеchnическую* библиотеку, блоки которой описывают процессы в типовых элементах САУ, а также реализуют ряд сервисных функций.

Так как невозможно сформировать абсолютно полную библиотеку типовых блоков, разработаны программные средства, обеспечивающие открытость (дополняемость) библиотеки математических моделей. К ним относятся:

1. Блок-интерпретатор, позволяющий создавать на схеме экземпляры блоков с оригинальными математическими моделями, записанными в текстовом виде.
2. Возможность создавать библиотеки макроблоков, реализующих модели процессов в элементах (подсистемах) установок.
3. Специальный блок "DLL" позволяет подключать к структурной схеме dll-приложения. Это дает возможность использовать существующие прикладные программы при их минимальной переработке.
4. Средства синхронного и асинхронного динамического обмена данными с внешними программами (файловый или сетевой протоколы).

Для отображения результатов моделирования, а также управления переходным процессом, в том числе и в режиме "on-line", разработаны средства, позволяющие создавать панели приборов. Это придает ПК свойства SCADA-систем.

В третьей главе приведено описание разработанных численных алгоритмов, обеспечивающих моделирование различных (по свойствам решаемой системы уравнений и размерности) динамических систем.

В результате анализа графа структурной схемы автоматически формируется математическая модель объекта исследования в виде системы ДАУ вида (1), (2). Первое векторное уравнение системы (1) является системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Остальные уравнения систем (1) и (2) образуют в общем случае систему нелинейных алгебраических уравнений.

В состав разработанного математического и программного обеспечения процесса моделирования динамических систем входят алгоритмы: интегрирования системы ОДУ; решения системы НАУ; численного расчета матрицы Якоби; решения системы линейных алгебраических уравнений (ЛАУ).

Для решения систем ЛАУ разработан алгоритм, реализующий прямой метод LU-разложения с учетом разреженности матрицы коэффициентов. Преимущества алгоритма проявляются при решении систем ЛАУ большой размерности (~ 100 и более) и разреженности. Для выбора главного элемента в процессе гауссова исключения используется улучшенная обобщенная стратегия Марковица, позволяющая при сохранении устойчивости процесса исключения снизить величину заполнения. Введение барьера (возникающие при LU-разложении новые элементы, модуль которых меньше барьера, принимаются равными 0) позволяет значительно снизить заполнение и уменьшить временную стоимость LU-разложения. Для повышения точности в этом случае предусмотрено итерационное уточнение полученного прямым методом решения. Хранение возникающих в процессе LU-разложения нижней и верхней треугольных матриц позволяет организовать экономичный способ многократного решения системы ЛАУ с неизменной матрицей коэффициентов и разными вектор-столбцами правых частей.

Для решения систем НАУ разработан и реализован алгоритм, основанный на модифицированном методе Ньютона-Рафсона, в котором якобиан пересчитывается только в случаях изменения шага интегрирования или превышения максимального числа итераций (>3). Данный алгоритм используется совместно с алгоритмами: численного расчета матрицы Якоби с учетом разреженности матрицы связей графа структурной схемы; решения системы ЛАУ для разреженных матриц.

Эффективность численного интегрирования системы ОДУ определяется соответствием выбранного алгоритма свойствам решаемой системы уравнений. К определяющим свойствам системы уравнений относятся ее размерность, жесткость и наличие неоднозначности и разрывов. Анализ достоинств и недостатков явных и неявных методов интегрирования позволил сделать вывод, что новая система АДР универсального назначения должна содержать как явные, так и неявные методы.

Во многих реальных задачах система ДАУ обладает большой жесткостью, поэтому разработаны и реализованы явные и неявные жестко устойчивые методы.

Рассмотрим алгоритм явного одношагового адаптивного s-стадийного метода. Решается система ОДУ

$$x' = f(t, x), \quad x(t_0) = x_0. \quad (3)$$

Стадии алгоритма (типа Рунге-Кутты) записываются в виде:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_n, x_n), \quad k_2 = f(t_n + \beta \cdot h, x_n + \beta \cdot h \cdot k_1); \\ k_i &= f(t_n + \beta \cdot h, x_n + (\beta - \alpha) \cdot h \cdot k_1 + \alpha \cdot h \cdot k_{i-1}), \quad i = 3, \dots, s. \end{aligned} \quad (4)$$

Задается последовательность векторов

$$v_i = k_i; \quad v_i = (k_i - k_{i-1}) / (\beta \cdot \alpha^{i-2}), \quad i = 2, \dots, s. \quad (5)$$

Тогда при малых шагах получается приближенное соотношение

$$v_i \approx (h\alpha)^{i-1} \cdot v_1, \quad i = 2, \dots, s, \quad (6)$$

где A - матрица Якоби в текущей точке решения.

Применяя степенной метод, имеем вектор покомпонентных оценок наибольшего по модулю собственного значения матрицы hA в виде

$$z_1 = h \cdot \lambda_1 = v_s / v_{s-1} \quad (7)$$

(предполагается, что операции с векторами выполняются покомпонентно).

Формула шага интегрирования имеет вид

$$x_{n+1} = x_n + h \cdot (v_1 + \dots + v_{s-2} / (s-2)! + c_{s-1} \cdot v_{s-1}). \quad (8)$$

Параметр c_{s-1} задается таким, чтобы метод имел максимальный порядок для мягких компонент и обеспечивал затухание жестких компонент за один шаг. Например, формула шага интегрирования трехстадийного метода имеет вид:

$$x_{n+1} = x_n + h(v_1 + c_2 v_2),$$

$$c_2 = \begin{cases} 1/2 + z_1/6, |z_1| \leq 1.6, \\ -z_1^{-1} - z_1^{-2}, z_1 < -1.6, \\ 1.23z_1^{-1}, z_1 > 1.6. \end{cases} \quad (9)$$

Константы в формуле (9) выбраны из условия непрерывной зависимости c_2 от z_1^{-1} . Параметры α и β также настраиваются в процессе решения. При $\alpha = 1/3$, $\beta = 2/3$ для мягких компонент $|z_1| \leq 1.6$ имеем формулу Рунге-Кутты третьего порядка:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{4}(k_1 + 3 \cdot k_3). \quad (10)$$

Таким образом, параметры явных адаптивных методов настраиваются на решаемую задачу, используя оценки наибольших по модулю собственных значений матрицы Якоби.

Аналогичным образом можно построить метод с покомпонентной оценкой двух наибольших по модулю собственных чисел, обеспечивающий эффективное решение быстроосциллирующих систем.

Сравнительный анализ разработанных методов с методами интегрирования других аналогичных ПК на классических примерах жестких задач показал их высокую эффективность. В таблице приведено сопоставление времени численного решения известного уравнения Ван-дер-Поля

$$x''(t) + \text{eps} \cdot [x^2(t) + a] \cdot x'(t) + x(t) = 0, \text{ при } t \in [0, 4 \cdot \text{eps}] \text{ и } x(0) = 2; x'(0) = 0 \quad (11)$$

некоторыми из вышеописанных методов интегрирования в ПК "МВТУ" и в зарубежном ПК SIMULINK (версия 1.3с) на компьютере Pentium II/300 МГц. Символ " ∞ " в таблице соответствует фактически "бесконечному" времени расчета (очень маленький шаг интегрирования), а прочерк - остановке расчета вследствие численной неустойчивости алгоритма.

Все разработанные методы интегрирования включены в ПК "МВТУ", для каждого из них даны краткое описание и рекомендации по применению.

Время решения уравнения Ван-дер-Поля в ПК "МВТУ" и в ПК SIMULINK

Метод	Параметр жесткости, с							
	10^1	10^2	10^3	10^5	10^8	10^{10}	10^{19}	10^{20}
Рунге-Кутта 4-5 (класс.)	0.8	14	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Адаптивный-1	0.3	0.4	0.6	0.9	2	3	23	130
Гира (модиф.)	0.4	0.5	0.7	1.3	1.7	1.9	3	3.2
Адаптивный неявный	1.1	1.5	2	2.5	3.2	3.7	5.5	6
Диагонально неявный	0.8	1.0	1.4	2	2.5	3	4.5	5
Рунге-Кутта (SIMULINK)	0.1	15	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Адамса (SIMULINK)	0.2	15	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Гира (SIMULINK)	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	—	—

В четвертой главе дана постановка задачи параметрической оптимизации динамических систем, выбраны методы и описаны разработанные алгоритмы.

Задача параметрической оптимизации имеет следующую постановку. Пусть x – вектор параметров проектируемой динамической системы, которые можно изменять в процессе оптимизации для обеспечения заданного качества, а $Q(x)$ – вектор показателей (критериев) качества, получаемый в результате моделирования при заданных значениях параметров. Требуется найти вектор параметров $x^* = [x_1^*, \dots, x_n^*]^T$, удовлетворяющий ограничениям на параметры вида $x_{j \min} \leq x_j \leq x_{j \max}$, $j = 1, \dots, n$, при котором критерии качества удовлетворяют требованиям в виде ограничений $Q_{i \min} \leq Q_i(x) \leq Q_{i \max}$, $i = 1, \dots, m$. (m – число частных критериев, n – число оптимизируемых параметров). После нормировки частных критериев в виде

$$q_i(x) = \begin{cases} 0, Q_{i \min} \leq Q_i(x) \leq Q_{i \max}, \\ (Q_i(x) - Q_{i \max}) / (Q_{i \max} - Q_{i \min}), Q_i(x) > Q_{i \max}, \\ (Q_{i \min} - Q_i(x)) / (Q_{i \max} - Q_{i \min}), Q_i(x) < Q_{i \min}. \end{cases} \quad (12)$$

происходит их свертка в общий критерий качества в форме

$$\Phi_p(q_1, \dots, q_m) = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_i^p \right]^{1/p}, \quad (13)$$

где при $p = 0, 1, 2$ и ∞ имеем мультипликативный (среднегеометрический), аддитивный, квадратичный и минимаксный критерии, соответственно.

Решение задачи организовано в виде двухэтапной диалоговой итерационной процедуры. Первый этап состоит во вводе или корректировке задания. На втором этапе запускается программа многокритериальной оптимизации (в соответствии с выбранным методом), цель которой – сведение общего критерия качества (13) к нулю. В ходе расчета промежуточная информация о критериях и оптимизируемых параметрах выводится на экран. Пользователь либо ждет окончания очередного

этапа, либо прерывает его досрочно. Корректировка заключается в изменении набора оптимизируемых параметров и критериев и/или пределов в ограничениях.

В работе показано, что при оптимизации по результатам моделирования предпочтительнее методы нулевого порядка, в которых решение о переходе в новую точку поиска основано на сравнении значений критерия в двух точках.

В алгоритмах Поиск-2 и Поиск-4 при одном оптимизируемом параметре ($n = 1$) реализованы метод деления шага пополам и метод квадратичной интерполяции, соответственно, а при $n > 1$ - метод преобразований матрицы направлений и метод преобразований вращения и растяжения-сжатия, соответственно. В алгоритме Simplex реализован метод "деформируемого многогранника" Нелдера и Мида.

В конце главы приведен пример синтеза оптимального ПИД-регулятора.

В пятой главе рассмотрены математические модели и методы расчета динамических процессов в элементах ядерных энергетических установок.

Для моделирования нейтронно-физических процессов в ядерном реакторе создана специализированная библиотека *Кинетика нейтронов*. Математические модели блоков этой библиотеки получены на основании известных уравнений кинетики "точечного" реактора в односкоростном приближении. Библиотека содержит 3 блока. Первый блок реализует классическую точечная модель с постоянным источником нейтронов, второй – модель мгновенного скачка, а третий – модель с переменным во времени источником нейтронов.

Блоки разработанной специализированной библиотеки *Теплообмен* реализуют в линейной, радиально-цилиндрической и сферической геометриях следующие математические модели теплообмена в элементах конструкций энергоустановок: термосопротивление; тонкая стенка; твэл; одномерная теплопроводность. Модели позволяют учесть нестационарность внутреннего энерговыделения, граничных условий (1...3 рода) и теплофизических свойств конструкционных материалов.

Модель термосопротивления сводится к алгебраическим, а модели тонкой стенки и твэла – к обыкновенным дифференциальным уравнениям. В численном алгоритме решения задачи одномерной теплопроводности используется абсолютно устойчивая неявная консервативная конечно-разностная схема Кранка-Николсона второго порядка точности по времени и пространственной координате.

Разработанная библиотека моделей позволяет исследовать теплогидравлику однофазной или гомогенной двухфазной жидкости в рамках точечных моделей. В качестве примера рассмотрена динамика сборного парового коллектора (расчетная схема – рис. 7, а структурная схема в ПК "МВТУ" – рис. 8). На входе в коллектор – рабочее тело из трубной системы многосекционного прямоточного парогенератора; выход коллектора связан с регулятором пара турбогенераторной установки (ТГУ) и с системой аварийного расхолаживания (САР).

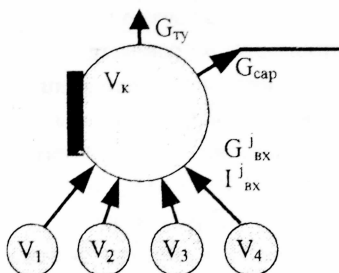


Рис. 7. Расчетная схема коллектора

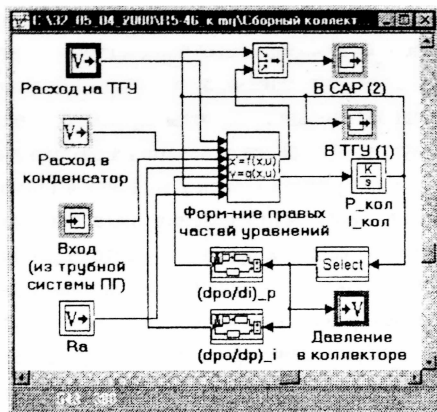


Рис. 8. Структурная схема в ПК "МВТУ"

В модели коллектора использованы уравнения неразрывности и энергии для рабочего тела с учетом: сжимаемости среды, фазовых переходов, работы сил давления и присоединенной массы металла. Процесс формирования правых частей уравнений динамики коллектора посредством "Нового" блока показан на рис. 9.

```

Редактор интерпретатора математических функций
input dtу,dkon,u2[6],dGv_p,dGi_p,z[2],Ra;          (ОПИСАНИЕ ВХОДОВ)
Ipg1=u2[2]; Dpg1=u2[3]; P18=z[1]; I18=z[2];        (ПЕРЕПРИСВОЕНИЕ)
(ВЫЧИСЛЕНИЕ СВОЙСТВ ВОДЫ/ПАРА, ОБЪЕМОВ, РАСХОДОВ И ПРОЧЕГО...)
Ts2=steamps(P18,wT); Is12=waterps(P18,wH); Is22=steamps(P18,wH);
r1=Is22-Is12; Vs12=waterps(P18,wV); Vs22=steamps(P18,wV);
f_p=if(I18-Is22,0,0,1); f_s=1-f_p; Vgp=vV17+vV18+u2[4]+Ra;
dVgp=u2[5]; Dpg=Dpg1;
(ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР)
V18_pp=steampH(P18,I18,wV);
mmmm_pp=steampH(P18,I18,wPr)*steampH(P18,I18,wLam)/steampH(P18,I18,wMu);
dGi_pp=-dGi_p/(V18_pp*V18_pp); dGv_pp=-dGv_p/(V18_pp*V18_pp);
(ПАРО-ВОДЯНАЯ СМЕСЬ)
mmmm_s=steamps(P18,wPr)*steamps(P18,wLam)/steampH(I18,wMu);
V18_s=Vs12+(Vs22-Vs12)*(I18-Is12)/r1; dGi_s=(Vs12-Vs22)/r1/(V18_s*V18_s);
dV1=Vs12-waterps(P18+dP,wV); dV2=Vs22-steamps(P18-dP,wV);
dGv_s0=-(dV1+(dV2-dV1)*(I18-Is12)/r1)/(V18_s*V18_s)/dP;
dGv_s=if(dGv_s0-1e-8,1e-8,1e-8,dGv_s0);
V18=f_p*V18_pp+f_s*V18_s; mmmm=f_p*mmmm_pp+f_s*mmmm_s;
dGi=f_p*dGi_pp+f_s*dGi_s; dGv=f_p*dGv_pp+f_s*dGv_s;
(ВЫЧИСЛЕНИЕ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ И ВЫДЕЛЕНИЕ ПРАВЫХ ЧАСТЕЙ ДИФФ. УРАВНЕНИЙ)
a12=(I18*dGv-0)/(1/V18+I18*dGi+mCmPG/(mmmm*(vV17+vV18)));
a21=dGi/dGv; b2=(Dpg-dty-dkon-dVgp/V18)/(Vgp*dGv);
b1=(Dpg1*Ipg1-(dty+dkon)*I18)/(vV17+vV18)*(1/V18+I18*dGi)+mCmPG/(mmmm);
Det1=b1-b2*a12; Det2=b2-b1*a21; Det=1-a12*a21; I18'=Det1/Det; P18'=Det2/Det;
dzdt[1]=P18'; dzdt[2]=I18'; (ФОРМИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ПРАВЫХ ЧАСТЕЙ)
D2V=(Dpg-dty)*(Dpg-dty)*V18; (ФОРМИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА НА САР)
output D2V,dzdt[2],Vgp; (ОПИСАНИЕ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ)

```

Рис. 9. Формирование правых частей уравнений динамики сборного коллектора

Теплофизические свойства теплоносителя, необходимые для замыкания основных уравнений теплогидравлики, рассчитываются по интерполяционным таблицам блоками библиотеки *Свойства* или специальными функциями в интерпретаторе математических функций (в блоке "Новый"). Генерация таблиц выполняется специальной программой, позволяющей рассчитывать различные теплофизические свойства теплоносителей (вода и водяной пар, природный газ, смеси идеальных газов произвольного состава) в заданном диапазоне давлений и температур с заданной погрешностью интерполяции свойств.

В шестой главе представлены результаты апробации ПК "МВТУ", созданного на базе разработанного математического и программного обеспечения.

ПК "МВТУ" использован при расчетном обосновании проекта модернизации системы тепловой автоматики реакторов типа РБМК. Структурная схема одного из вариантов системы представлена на рис. 10.

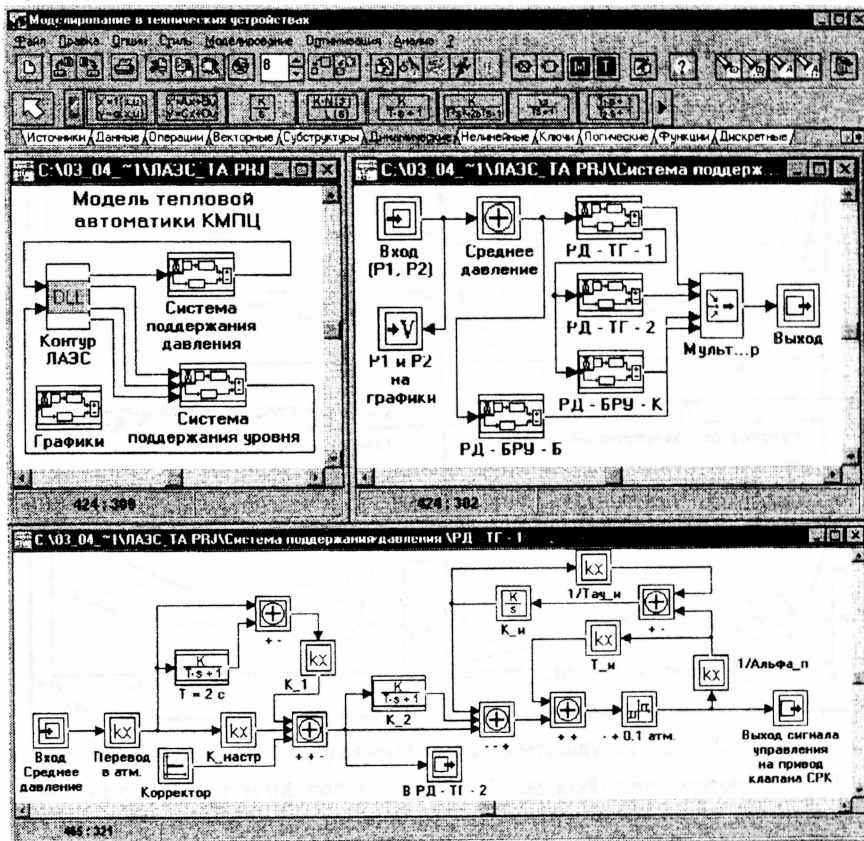


Рис. 10. Моделирование системы тепловой автоматики в ПК "МВТУ"

Блок “Контур ЛАЭС” на структурной схеме связан с внешней отраслевой программой, написанной на языке ФОРТРАН и скомпилированной как dll-библиотека. Программа рассчитывает теплогидравлику контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реактора РБМК-1000.

Через выходы блока “Контур ЛАЭС” в систему тепловой автоматики передаются значения технологических параметров (давлений, уровней, расходов, нейтронной мощности). На входы блока “Контур ЛАЭС” поступают логические управляющие сигналы на перемещение исполнительных механизмов. Субмодели “Система поддержания давления” и “Система поддержания уровня” имеют несколько уровней вложенности и описывают динамику устройств в логической части системы тепловой автоматики. Модель набрана полностью из типовых блоков *Общетехнической* библиотеки. Общее количество блоков – более 300. Субмодели “РД-ТГ-1” и “РД-ТГ-2” реализуют логику поддержания давления пара в барабан-сепараторах, а субмодели “РД-БРУ-К” и “РД-БРУ-Б” – логику аварийного сброса пара. На рис. 11 представлены результаты моделирования режима БУСМ-1.

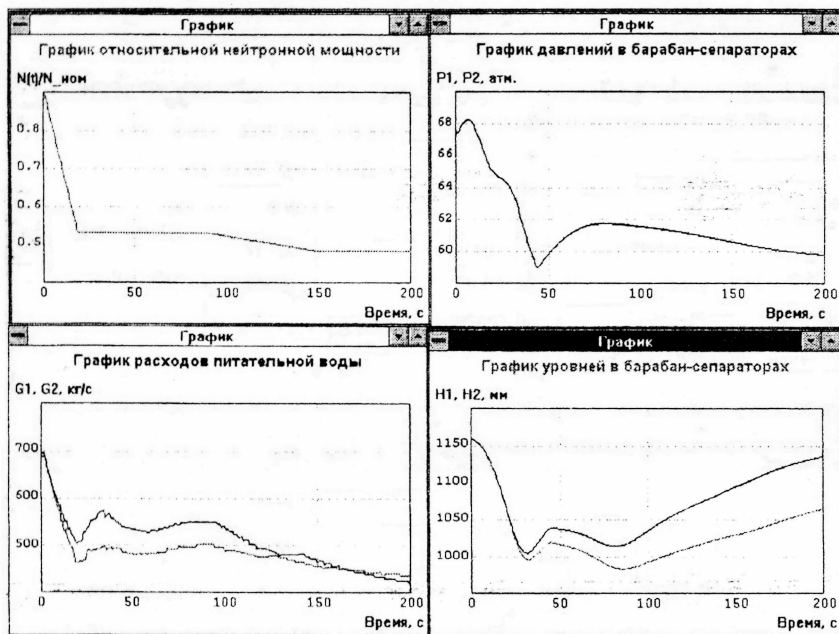


Рис. 11. Результаты моделирования режима БУСМ-1

На компьютере типа Pentium II с частотой 300 МГц время расчета этой ситуации в 16...20 раз меньше модельного времени, что позволяет использовать ПК для решения подобных задач в функциональных или понятийных тренажерах.

ПК "МВТУ" использован в проектном обосновании ядерной безопасности 5-ти контурной АС "УниTERM", предназначенной для электро- и теплоснабжения удаленных районов. Моделировались как штатные переходные режимы (маневр мощности АС расходом питательной воды (ПВ) и т.п.), так и проектные аварийные ситуации (отключение нагрузки; режимы "стоп-вода", "стоп-пар" и др.).

Результаты расчетов по определению предельной скорости маневрирования мощностью установки посредством изменения расхода ПВ в контуре потребителей приведены на рис. 12. Данные по относительной нейтронной мощности (рис. 12,а), температуре пара на выходе в контур потребителей (рис. 12,б), максимальному периоду разгона реактора (рис.12,в) и величине перерегулирования (рис. 12,г) получены при скоростях 0.3, 0.5 и 0.7 %/с (обозначения 1, 2 и 3, соответственно).

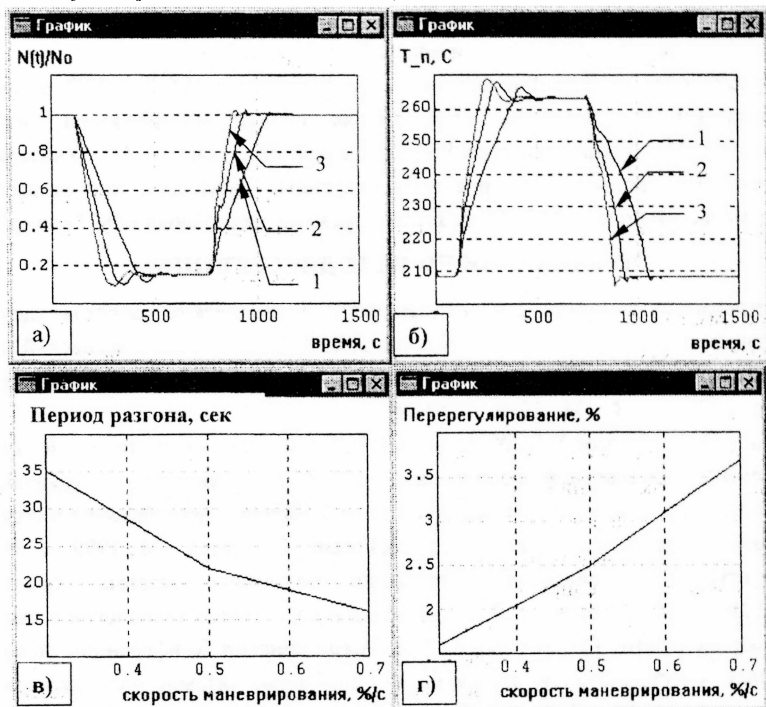


Рис. 12. Изменение параметров АС при разных скоростях маневрирования

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика структурного моделирования динамических систем, элементы которых описаны в форме входо-выходных отношений. В методике:
 - предложен метод формирования и последующего анализа топологически сложных структурных схем большой размерности;

- предложен способ автоматического получения математической модели объекта в виде системы дифференциально–алгебраических уравнений;
 - разработан алгоритм, позволяющий диагностировать наличие и определить состав алгебраических контуров, минимизировать размер системы нелинейных алгебраических уравнений, решаемой при развязке контуров;
 - разработан алгоритм численного расчета якобиана, учитывающий разреженность матрицы связей в графе структурной схемы.
2. Создана библиотека математических моделей, описывающих: динамику типовых элементов САУ; нестационарные процессы нейтронной кинетики, теплообмена и теплогидравлики в элементах ЯЭУ в рамках сосредоточенного представления.
 3. Разработаны численные алгоритмы, обеспечивающие: моделирование динамических процессов в непрерывных, дискретных и гибридных системах; параметрическую оптимизацию и идентификацию данных.
 4. Разработанные методики и алгоритмы реализованы в ПК "МВТУ", который использован при расчетных обоснованиях: проекта модернизации системы тепловой автоматики реакторов РБМК; ядерной безопасности АС "УниTERM" в переходных режимах и в проектных аварийных ситуациях; при разработке динамической модели АСУ ТП реального времени энергоблока АЭС "Бушер".

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Программный комплекс для автоматизации динамических расчетов ядерных энергетических установок / О.С.Козлов, Д.Е. Кондаков, В.В.Ходаковский и др. // Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. статей. –М., 1999. –С.53-54.
2. Козлов О.С., Копосов Е.Б., Ходаковский В.В. Создание математической модели динамики бимодальной космической ЯЭДУ применительно к разработке методологии оценки ресурса активной зоны // Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. статей. –М., 1999. –С.54-55.
3. Структурное моделирование динамики подземных газовых хранилищ / В.Г.Зайцев, О.С.Козлов, В.В.Ходаковский и др. // Новые технологии в газовой промышленности: Сб. тез. докл. 2-ой Всероссийской Конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России. –М., 1997. – С. 27-28.
4. Моделирование подземных хранилищ газа / В.Г.Зайцев, А.И.Игошин, В.В.Ходаковский и др. // Газовая промышленность. –1999. –№9. –С.33-34.