

ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Тихончук Сергей Тимофеевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Шифр и наименование специальностей

- 05.13.16 - Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях
- 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



00778821 (X)

Дисертація в виді

Работа выполнена на
 технических системах Одесского государственного
 политехнического университета

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
 Верлань Анатолий Федорович

Официальные оппоненты: член-корреспондент НАН Украины,
 доктор технических наук, профессор
 Мацевитя Юрий Михайлович

доктор технических наук
 Катков Александр Федорович

доктор технических наук, профессор
 Тодорцев Юрий Константинович

Ведущая организация: Киевский политехнический институт

Защита состоится 20 октября 1994 г. в 14.00 час. на
 заседании специализированного совета Д 068.19.01 при
 Одесском государственном политехническом университете
 (270044, г. Одесса, пр. Шевченко 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
 Одесского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "19" сентября 1994 г.

Ученый секретарь
 специализированного совета

Ю. С. Ямпольский

ЛНБ ім. В. Стефаніка
 АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Постоянное повышение требований к качеству решения важных практических задач автоматизации технологических процессов, обработки данных физических экспериментов, управления сложными распределенными объектами в реальном времени и прогнозирования режимов указанных объектов в ускоренном времени требует создания математических моделей рассматриваемых объектов и процессов, а также компьютерных средств их реализации. Применение методов математического и компьютерного моделирования позволяет снизить трудоемкость разработок за счет сокращения объемов натуральных экспериментов, обеспечивает повышение достоверности анализа характеристик, позволяет повысить эффективность решения задач проектирования и создания высокопроизводительных специализированных вычислительных устройств, воспроизводящих характеристики системы в реальном и ускоренном времени и обеспечивающих автоматизацию процессов управления объектами рассматриваемого класса. Без изучения динамики объектов управления, построения адекватных математических моделей и эффективных средств их реализации невозможна практическая реализация заданных алгоритмов управления.

Одним из наиболее универсальных средств анализа процессов, происходящих в исследуемых объектах, является вычислительный эксперимент. Его основу составляет триада: модель - метод («алгоритм») - программа, или математическая модель и цифровые, аналоговые или гибридные средства ее реализации.

Математическая модель, представляющая собой обычно систему алгебраических, дифференциальных или интегральных

уравнений, строится на основе анализа физических процессов, происходящих в объекте, либо на основе данных экспериментального исследования объекта. В связи с ограниченными возможностями существующих аналитических методов неизбежно возникает задача разработки численных методов, алгоритмов и вычислительных структур для реализации полученных математических моделей, т.е. необходимо разработать программные, аппаратные либо программно-аппаратные средства реализации математических моделей.

Во многих случаях полученная математическая модель оказывается настолько сложной, что ее реализация на ЦЕМ требует чрезвычайно больших затрат машинного времени и невозможна в реальном или ускоренном времени. Такая ситуация возникает, в частности, при создании тренажеров для обучения персонала, занятого управлением сложными системами, такими, например, как системы дальнего транспорта газа, атомные электростанции, летательные аппараты и др. В этом случае математическая модель может быть реализована в реальном времени средствами аналоговой или гибридной вычислительной техники. Вопросам построения математических моделей управляемых распределенных объектов и их аппаратной и программной реализации посвящены работы А.Г.Бутковского, Л.И.Гутенмахера, И.З.Згуровского, Ю.М.Мацвигото, В.Е.Прокофьева, Г.Е.Пухова, А.А.Самарского и др.

Задачи определения возмущающих воздействий и идентификации характеристик — и — параметров объектов управления по измеренным откликам относятся к классу обратных задач. Проблема устойчивости решения обратных задач для рассматри-

ваемого класса объектов решается применением методов регуляризации, разработанных А.Б.Бакушинским, А.Ф.Верланем, В.К.Ивановым, М.М.Лаврентьевым, В.А.Морозовым, А.Н.Тихоновым и др.

Необходимо отметить, что задачу разработки и реализации математических моделей сложных управляемых распределенных объектов до настоящего времени нельзя считать в полной мере решенной, так как при разработке математических моделей недостаточно учитывалась специфика их последующей реализации средствами цифровой, аналоговой и гибридной вычислительной техники.

Исследования и разработки по теме диссертации выполнялись в соответствии с тематикой координационного плана АН Украины по комплексной проблеме "Теоретическая электротехника, электроника и моделирование" на 1981 - 1985 г.г. и 1986 - 1990 г.г.; проектами 1-749 "Гибрид" на 1992 - 1993 г.г. и 2.33-99 "Гибрид" на 1994 - 1995 г.г. Государственного фонда фундаментальных исследований Украины по научному направлению "Математика, информатика и механика".

Цель диссертационной работы. Создание методов идентификации и компьютерного моделирования сложных управляемых распределенных объектов, обеспечивающих получение решения в реальном и ускоренном времени, а также алгоритмическая, программная и аппаратурная реализация предложенных методов для повышения качества обработки результатов физических экспериментов, автоматизации технологических процессов и процессов управления техническими объектами.

Достижение поставленной цели требует решения следующих

задач:

1. Разработка методов, алгоритмов, программных и аппаратных средств для обработки экспериментальных данных, необходимых для построения математических моделей, на основе решения некорректных обратных задач.

2. Разработка методов и алгоритмов построения математических моделей управляемых линейных и нелинейных распределенных объектов на основе экспериментальных данных с использованием методов непараметрической и параметрической идентификации.

3. Разработка структур специализированных вычислительных устройств для идентификации и моделирования управляемых распределенных объектов, обладающих возможностями работы в реальном и ускоренном времени.

4. Создание аппаратных и программных моделей для решения прикладных задач исследования управляемых распределенных объектов и прогнозирования их режимов в реальном и ускоренном времени.

Методы исследований базируются на теоретических и методологических основах математического моделирования, методах линейной алгебры, функционального анализа, теории автоматического управления, методах решения некорректно поставленных задач, теории аналогий, методах оптимизации, методах линейной фильтрации.

Научная новизна.

1. Разработан подход к математическому моделированию сложных управляемых распределенных объектов, основанный на использовании методов непараметрической идентификации или ана-

литическом построении модели с последующим применением методов параметрической идентификации с учетом специфики реализации математических моделей программными, аппаратными или программно-аппаратными средствами в реальном времени.

2. На основе предложенных методов регуляризации решения некорректных обратных задач разработаны методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства для обработки экспериментальных данных, ориентированные на реализацию специализированными вычислительными устройствами в реальном времени.

3. Разработана совокупность методов непараметрической и параметрической идентификации управляемых нелинейных распределенных объектов на основе экспериментальных данных, обеспечивающих устойчивость процесса построения математической модели.

4. Разработаны структуры специализированных вычислительных устройств и программные средства, предназначенные для идентификации и реализации математических моделей управляемых распределенных объектов в реальном и ускоренном времени в условиях априорной неопределенности исходных данных.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Предложенные в диссертационной работе методы регуляризации некорректных обратных задач реализованы в виде пакета прикладных программ и ряда специализированных вычислительных устройств, позволяющих решать широкий класс задач интерпретации экспериментальных данных и идентификации объектов с распределенными параметрами.

Программные и аппаратные средства для моделирования управляемых распределенных объектов в реальном и ускоренном

времени, предназначенные для прогнозирования режимов функционирования объектов, используются в качестве советчиков диспетчера и как тренажеры для обучения технического персонала на ряде предприятий:

- в практике диспетчерской службы для оперативного анализа и прогнозирования гидравлических режимов системы газопроводов ПО "Азтрансгаз" (г.Баку, Азербайджан) и ПО "Орэнбургтрансгаз" (г.Орэнбург, Россия);

- в центральном диспетчерском управлении ПО "Казахгазпром" (г.Аксау, Уральской области, Казахстан) для анализа и прогнозирования режимов конденсатопроводов УКПГ16 - ОПГЗ.

Структуры специализированных вычислительных устройств для решения задачи обработки экспериментальных данных в реальном времени использованы в НИИ "Орион" (г.Київ) для обработки результатов испытания лавинопролетных диодов.

На основе предложенных в диссертации структур программно-технических комплексов для автоматизации сбора экспериментальной информации созданы автоматизированные информационные системы, которые используются в диспетчерских службах на Первомайском, Засельском и Заплавском сахарных заводах Украины для контроля и управления параметрами технологического процесса переработки свеклы и производства сахара.

Научные разработки автора по математическому моделированию управляемых распределенных объектов использованы в учебном процессе Одесского государственного политехнического университета при чтении курса лекций по дисциплине "Автоматизация проектирования систем управления".

Общий экономический эффект, подтвержденный актами о

внедрении, составляет 1034.9 тыс. руб. (в ценах 1990 г.).

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 4 Международных и 17 Всесоюзных и республиканских конференциях и семинарах, в частности: на Республиканском семинаре "Гибридные вычислительные машины и комплексы" (Одесса, 1976), Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы нелинейной электротехники" (Киев, 1981), Всесоюзном семинаре "Специализированные процессоры параллельного действия для решения краевых задач" (Рига, 1981), Всесоюзной научно-технической конференции "Развитие и использование аналоговой и аналого-цифровой вычислительной техники" (Москва, 1981), Республиканских научно-технических конференциях "Интегральные уравнения в прикладном моделировании" (Киев, 1983; Киев, 1986; Одесса, 1989), Всесоюзных школах-семинарах "Теория и методы решения некорректно поставленных задач и их приложения" (Самарканд, 1983; Саратов, 1985), 3-я Всесоюзной научно-технической конференции "Программное, алгоритмическое обеспечение АСУ ТП" (Ташкент, 1985), Всесоюзной научно-технической конференции "Моделирование-85. Теория. Средства. Применение" (Киев, 1985), Республиканской научно-технической конференции "Функционально-ориентированные вычислительные системы" (Харьков, 1986), научно-технической конференции "Методы и средства проектирования динамических систем с учетом требований корректности и грубости" (Одесса, 1986), Всесоюзной научно-технической конференции "Актуальные проблемы моделирования и управления системами с распределенными параметрами" (Одесса, 1987), 8-я Международной конференции "Применение ЭВМ в тех-

нике и управлении производством, *Compcontrol-87*" (Москва, 1987), Республиканской конференции "Математическое моделирование физических полей" (Саратов, 1988), Международной конференции "Комплексная автоматизация промышленности" (Вроцлав, Польша, 1988), научно-техническом семинаре "Практическая реализация машинных методов решения краевых задач" (Пенза, 1989), 4-я Международной научно-технической конференции "Проблемы комплексной автоматизации" (Київ, 1990), Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование в энергетике" (Київ, 1990), научно-техническом семинаре "Теория идентификации нелинейных динамических объектов" (Торговиште, Болгария, 1990), XI *International Conference on Systems Science* (Wroclaw, Poland, 1992), 1-я Украинской научно-методической конференции "Автоматика, управление и автоматизация технологических процессов, экологического контроля и мониторинг." ТЕКАВТОМАТИКА-93 (Алушта, 1993), 1-я Украинской научно-технической конференции "Автоматика-94" (Київ, 1994).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 63 работы, в том числе 15 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, списка использованной литературы и двух приложений. Работа содержит 284 страницы, включая 251 страницу основного текста, 33 страницы иллюстраций.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Развиг подход к математическому моделированию сложных управляемых распределенных объектов, основанный на учете специфики реализации в реальном времени программными или ап-

паратными средствами математических моделей, полученных с помощью комбинации аналитического подхода и методов идентификации.

2. Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства для решения в реальном времени некорректных обратных задач обработки экспериментальных данных.

3. Методы построения устойчивых к погрешностям экспериментальных исходных данных математических моделей управляемых линейных и нелинейных распределенных объектов на основе методов и алгоритмов непараметрической и параметрической идентификации.

4. Структуры специализированных вычислительных устройств, предназначенных для решения в реальном и ускоренном времени задач идентификации и моделирования сложных управляемых распределенных объектов.

5. Специализированные вычислительные устройства и программные комплексы для прогнозирования режимов функционирования сложных управляемых распределенных объектов в реальном и ускоренном времени на примере систем дальнего транспорта газа и нефтепродуктов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследований, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы выполнен анализ актуальных проб-

лем, методов и средств моделирования управляемых динамических объектов с распределенными параметрами.

Методы математического моделирования и вычислительный эксперимент являются основными средствами исследования сложных управляемых распределенных объектов, которые, как правило, описываются системами дифференциальных уравнений в частных производных. Получению математических моделей пространственно распределенных объектов и разработка методов их реализации является значительно более сложной проблемой, чем аналогичная задача для объектов с сосредоточенными параметрами.

Аналитический подход к построению математических моделей базируется на использовании уравнений сохранения, уравнений переноса, теоретических и эмпирических соотношений с учетом ограничений на параметры процесса. Однако с целью повышения точности математической модели ее параметры необходимо уточнить с использованием методов идентификации, так как реальные параметры объекта всегда отличаются от их теоретической оценки в силу недостаточной точности эмпирических соотношений, а также старения и изменения параметров в процессе функционирования объекта. Решение задачи идентификации основано на использовании экспериментальных данных о реальных режимах функционирования исследуемого объекта, часть из которых может быть измерена только косвенным образом. Получение приближенного устойчивого решения некорректно поставленных обратных задач интерпретации экспериментальных данных и задач идентификации обеспечивается применением специальных методов регуляризации.

Для использования в режиме тренажера или при оперативном управлении объектом анализ математической модели должен выполняться в ускоренном времени, что достигается либо распараллеливанием вычислений на ЦМ, либо использованием аналоговых или гибридных специализированных вычислительных устройств.

Во второй главе для решения обратных задач идентификации интегральных моделей управляемых объектов разработан динамический метод регуляризации некорректных задач, основанный на методе установления решения систем линейных алгебраических уравнений. Характерной чертой предлагаемого метода является его ориентация на реализацию средствами аналоговой и гибридной вычислительной техники в реальном времени.

В линейном случае связь между входным $x(t)$ и выходным сигналом $y(t)$ измерительного преобразователя описывается линейным интегральным уравнением первого рода

$$\int_0^t K(t-\tau) \cdot x(\tau) d\tau = y(t), \quad (1)$$

где $K(t)$ - импульсная переходная характеристика преобразователя.

Аналогично может быть представлено и математическое описание линейных динамических систем с распределенными параметрами, при этом $K(t)$ имеет смысл функции Грина.

В общем случае интегральное уравнение (1) можно рассматривать как частный случай операторного уравнения

$$Ax = y, \quad (2)$$

где оператор A и правая часть y заданы приближенно, т.е. $\|A - \tilde{A}\| \leq \alpha$ и $\|y - \tilde{y}\| \leq \beta$, а определению подлежит переменная x .

Таким образом приходится решать приближенное операторное уравнение

$$\tilde{A}x^* = \tilde{y} \quad (3)$$

Предлагаемый динамический метод регуляризации основан на замене исходного операторного уравнения (3) решением соответствующей задачи Коши

$$\frac{dx^*(t)}{dt} + \tilde{A}^* \tilde{A}x^*(t) = \tilde{A}^* \tilde{y}, \quad x^*(0) = x_0 \quad (4)$$

Показано, что в качестве приближенного устойчивого решения задачи (3) может быть принято значение

$$x^* = x^*(t^*) \quad (5)$$

Здесь значение t^* определяется в зависимости от уровня погрешности исходных данных α и β из дополнительного условия

$$\varphi[\alpha, \beta, x^*(t^*)] \leq \sigma_p \quad (6)$$

где φ - некоторый функционал, определенный на решениях задачи Коши (4), а σ_p - заданный уровень допустимых значений функционала φ .

Имеет смысл искать приближенное решение задачи (3) на множестве t^* таком, что для переменной $x^*(t^*)$ выполняется условие

$$\|\tilde{A}x^*(t^*) - \tilde{y}\| \leq \gamma(\alpha, \beta), \quad (7)$$

где γ - некоторый априорно задаваемый уровень невязки.

Доказана качественная теорема устойчивости динамического метода регуляризации.

Теорема 1. Для любого $\varepsilon > 0$ существует $\tau_0 = \tau_0(\varepsilon)$ такое, что для произвольного $\tau_1 > \tau_0$ найдутся числа $\alpha_0 = \alpha_0(\varepsilon, \tau_1)$ и $\beta_0 = \beta_0(\varepsilon, \tau_1)$ такие, что для $0 \leq \alpha \leq \alpha_0$, $0 \leq \beta \leq \beta_0$ и $\theta, \tau \in [\tau_0, \tau_1]$ выполняется неравенство $\|x(\theta) - x^*(\tau)\| \leq \varepsilon$.

Геометрическая интерпретация динамического метода регуляризации представляет собой пучок траекторий, который может быть получен при вариациях в пределах точности задания оператора λ и правой части y . Все траектории будут начинаться в точке x_0 , направления начального движения изображающей точки каждой траектории будут так же близки, а предельные при $t \rightarrow \infty$ точки всех траекторий будут находиться в эллипсоиде рассеяния решения. Выбор фиксированного значения параметра t^* из некоторого критерия для каждой траектории эквивалентен сечению этого пучка. Согласно приведенной выше теореме 1, множество решений динамическим методом регуляризации в сечении этого пучка траектория будет устойчиво.

Получены соотношения для выбора параметра регуляризации t^* в динамическом методе регуляризации в соответствии с критериями невязки, квазианалитического, отклонения и способом эталонного примера.

В третьей главе предложено семейство регуляризирующих алгоритмов интерпретации экспериментальных данных для построения математических моделей в реальном времени.

Процесс измерения описывается операторным уравнением

$$\lambda x = y, \quad (8)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ - исследуемая и наблюдаемая сигналы соответственно, λ - оператор, реализующий аппаратную функцию измерительного преобразователя.

Задача интерпретации экспериментальных данных сводится к определению из уравнения (8) сигнала x , недоступного для непосредственного измерения. В силу некорректности данной задачи в работе предложена модификация метода регуляризации

М.М.Лаврентьева, которая заключается в введении дополнительного члена αc_k в (8)

$$\alpha c_k + \lambda_k = y, \quad (9)$$

где оператор c обеспечивает положительную определенность произведения $c^{-1} \lambda$. Семейство регуляризирующих операторов формируется выбором передаточной функции оператора c в виде

$$W_c^{-1}(p) = \sum_{i=0}^k \Gamma_i p^{-i} \quad (10)$$

при различных значениях k .

Выполнен анализ смещенной ошибки решения уравнения (9), возникающей за счет введения дополнительного члена αc_k , и несмещенной ошибки, являющейся следствием ошибок с дисперсией D_y в измеряемом сигнале y .

При анализе смещенной ошибки показано, что система (9) обладает астабильностью k -го порядка и ошибка ϵ пропорциональна параметру регуляризации α . При анализе несмещенной ошибки получено, что средняя квадратическая ошибка решения ϵ_{δ}^2 обратно пропорциональна $\alpha^{1+\mu}$, где $\mu \leq \lfloor \frac{n+3}{2} \rfloor$, n - порядок передаточной функции, которой описывается оператор λ .

Доказана качественная теорема устойчивости предложенного метода.

Теорема 2. При $D_y \neq 0$ существует $\alpha(D_y) = O\left(D_y^{\frac{h}{1+\lfloor \frac{n+3}{2} \rfloor}}\right)$ такое, что при $\alpha(D_y) \rightarrow 0$ суммарная ошибка системы $\epsilon_{\epsilon}^2 = \epsilon^2 + \epsilon_{\delta}^2$ также стремится к нулю для любого $0 < h \leq 1$.

Таким образом, имея априорную информацию о величинах производных выходного сигнала измерительного преобразователя, можно выбрать порядок корректирующего оператора, а зная

дисперсию помехи - определить параметр регуляризации α с использованием критерия новляки, способа эталонного примера или любого другого известного способа выбора α . Предложенный метод устойчивого восстановления сигнала сохраняет свойство вольтерровости и поэтому позволяет решать поставленную задачу в реальном времени.

Рассмотрим один важный частный случай задачи интерпретации экспериментальных данных - задачу дифференцирования измеряемого сигнала $y(t)$. Такая задача возникает в случае, когда аппаратная функция измерительного преобразователя является чистым интегратором, т.е. процесс измерения описывается следующим уравнением, записанным в преобразованиях Лапласа:

$$\frac{1}{p} \cdot X(p) = Y(p). \quad (11)$$

Доказано, что семейство уравнения

$$\alpha \cdot \frac{p^k}{\sum_{i=0}^k c_i p^i} \cdot X(p) + \frac{1}{p} \cdot X(p) = Y(p), \quad k=0,1,2,\dots \quad (12)$$

обладает регуляризирующими свойствами и позволяет при надлежащем выборе параметра регуляризации α получить устойчивое приближенное решение задачи дифференцирования зашумленного непрерывного сигнала.

Показано, что за счет замены уравнения (11) на (12) удастся повысить порядок астатизма системы на k единиц, уменьшив тем самым смещенную ошибку дифференцирования, а выбором надлежащего значения параметра регуляризации α в соответствии с одним из известных критериев можно уменьшить не смещенную составляющую ошибки, возникающую за счет погреш-

ностей измерения.

Выполнен анализ и проведено сравнение алгоритмов численного дифференцирования зашумленных сигналов, в частности рассмотрены нерекурсивные формулы численного дифференцирования и рекурсивные формулы, полученные при различной дискретизации уравнения (12). Показано, что при численной реализации предложенных алгоритмов дифференцирования наряду с параметром регуляризации α существенное влияние на устойчивость получаемого решения оказывает параметр τ - интервал дискретизации, который можно рассматривать как параметр "естественной регуляризации".

В четвертой главе разработаны методы непараметрической идентификации для построения математических моделей нелинейных динамических объектов в виде отрезка интегростепенного ряда Вольтерра на основе данных эксперимента вход-выход. Особенностью предлагаемых методов является возможность идентификации многомерных ядер Вольтерра при регистрации откликов в условиях тяжелых помеховых ситуаций, что достигается за счет разработки специальных алгоритмов идентификации и использования предложенных методов регуляризации некорректных задач.

Предложен метод детерминированной идентификации нелинейного динамического объекта с использованием пробных импульсных сигналов. Вычислительный алгоритм задается формулой

$$\tilde{h}_n(t_1, \dots, t_n) = \frac{(-1)^n}{n! \omega^n} \sum_{\delta_1, \dots, \delta_n=0}^1 (-1)^{\sum_{i=1}^n \delta_i} y(t, \delta_1, \dots, \delta_n)$$

(13)

где $\tilde{h}_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n)$ - оценка сечения ядра Вольтерра n -го порядка, полученная в результате обработки данных эксперимента; $y(t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n})$ - реакция объекта, измеренная в момент времени t , при действии на входе дельта-импульсов с площадью σ соответственно в моменты времени τ_1, \dots, τ_n (если $\delta_{\tau} = 1$, то импульс действует в момент времени τ , если $\delta_{\tau} = 0$, то импульс отсутствует).

Выполнен анализ погрешностей алгоритма идентификации (13): методической, обусловленной некомпенсированными обработкой составляющими отклика, порядок которого выше порядка оцениваемого ядра; и случайной погрешности, возникающей вследствие наличия погрешностей измерения. Показано, что при уменьшении площади пробных импульсов уменьшается методическая погрешность, однако при этом ухудшается отношение сигнал/шум.

В работе предложен помехоустойчивый детерминированный алгоритм идентификации многомерных ядер Вольтерра с использованием модулированных полиимпульсных пробных сигналов, основанный на методе регуляризации некорректных задач. Алгоритм представлен следующим соотношением

$$\tilde{h}_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n) = \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \sum_{\substack{\delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n} \\ \delta_{\tau_i} = 0}} (-1)^{\sum_{i=1}^n \delta_{\tau_i}} \frac{\partial^n}{\partial \omega^n} y(\omega, t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n}) \Big|_{\omega=0} \quad (14)$$

При такой обработке выходных сигналов объекта методическая ошибка идентификации станет равной нулю, а использование предложенных регуляризирующих алгоритмов численного диф-

ференцирования значительно ослабляет влияние шумов измерительной аппаратуры.

Разработан также помохоустойчивый метод определения ядер Вольтерра при произвольных детерминированных пробных воздействиях. В этом случае сначала выделяется функционал Вольтерра n -й степени посредством вычисления производной n -го порядка отклика нелинейного объекта $y(A, t)$ по коэффициенту усиления A тестового сигнала при $A=0$. Затем для каждого момента времени t решается многомерное интегральное уравнение Вольтерра первого рода относительно искомого ядра Вольтерра. Для обеспечения вычислительной устойчивости предлагаемого алгоритма идентификации при вычислении производной и решении интегрального уравнения используются предложенные методы регуляризации.

В пятой главе работы предложен градиентный алгоритм идентификации параметров нелинейных динамических объектов, когда структура математической модели получена с помощью аналитического подхода. В частности, рассмотрена задача определения пространственного распределения коэффициентов гидравлического сопротивления участка магистрального газопровода по результатам эксплуатации - замерам давлений и расходов в начале и в конце трубы.

Указанные параметры недоступны для непосредственного измерения и зависят от многих факторов, в первую очередь от загрязненности внутренней поверхности трубы вследствие осаждения на ее стенках тяжелых углеводородов. Рассматриваемые параметры мало меняются во времени, поэтому задачу идентификации можно рассматривать как кваэистационарную.

Пусть заданы граничные условия: давление в начале трубы и расход в конце трубы. В качестве критерия качества идентификации примем интеграл от квадрата разности давления, полученных на выходе реальной системы и ее математической модели

$$I = \int_0^T (p(t, L) - \hat{p}_K(t))^2 dt \quad (15)$$

где $p(t, L)$ - расчетное значение давления на выходе в точке $x=L$ при $A(x)=A_0(x)$ и $B(x)=B_0(x)$; $\hat{p}_K(t)$ - результаты измерения давления на реальном объекте; T - время наблюдения.

Процесс вычисления коэффициентов $A(x)$ и $B(x)$ имеет итерационный характер. Сначала задаются некоторые начальные приближения $A(x)=A_0(x)$ и $B(x)=B_0(x)$, решается прямая задача и вычисляются функции $p(t, x)$ и $q(t, x)$. Затем решается сопряженная задача и, наконец, на заключительном этапе строится градиентная процедура по каждому из искомым параметров

$$B_{k+1}(x) = B_k(x) - \omega_B^k \cdot I_B, \quad (16)$$

$$A_{k+1}(x) = A_k(x) - \omega_A^k \cdot I_A, \quad (17)$$

где I_A и I_B - вариации функционала I по переменным A и B .

Выбрав шаг градиентной процедуры ω_A^k и ω_B^k , получают очередное приближение для искомым параметров $A(x)$ и $B(x)$. Далее процесс вычисления продолжается итерационно до тех пор, пока (по аналогии с динамическим методом регуляризации) функционал качества не станет меньше некоторого наперед заданного малого положительного числа ϵ , зависящего от точности исходных данных δ .

Отметим, что при продолжении итераций решение, получаемое при достижении минимума функционала качества, не обладает свойством устойчивости к погрешностям исходных данных.

Получен алгоритм субоптимальной фильтрации для оценки давления в газопроводе при решении рассматриваемой задачи идентификации параметров линейного участка магистрального газопровода в стохастической постановке. Последующие шаги градиентной процедуры выполняются аналогично предыдущему случаю.

Построен итерационный алгоритм определения места утечки газа в магистральном газопроводе по результатам измерения давления и расходов на концах трубы. При этом математическая модель дополнена членом, учитывающим распределенную по длине трубопровода утечку газа $k(x)$.

Выбором шага градиентной процедуры и количества итераций n можно получить приближенное значение функции $k_n(x)$. Если утечка отсутствует, то $k_n(x)$ представляет собой гладкую функцию, близкую к нулю. Если же на решении появляется участок, где функция $k_n(x)$ имеет колесообразную форму, то это является признаком наличия утечки. Для более точной локализации места утечки процесс градиентного уточнения $k(x)$ повторяется с самого начала с новыми начальными условиями. При этом следует использовать априорную информацию качественного характера о том, что если в трубе есть утечка, то она, как правило, сконцентрирована в одной точке. В качестве новых начальных условий примем функцию

$$k_0(x) = k_n(x) \cdot \delta(x - x_0), \quad (18)$$

где x_0 - место расположения максимума функции $k_n(x)$, полученной на первой глобальной итерации. В случае необходимости можно выполнить несколько таких глобальных итераций, каждая раз уточняя место расположения утечки на газопроводе и ее

интенсивность.

В шестой главе разработаны принципы построения и структуры специализированных устройств для приближенного устойчивого решения обратных задач, которые описываются линейными операторными уравнениями первого рода, в соответствии с динамическим методом регуляризации, а также разработаны структуры устройств для обработки экспериментальных данных в реальном времени.

Устройство для решения операторных уравнения первого рода реализует уравнению (4). Его структурная схема изображена на рис.1. В состав устройства входят: интегрирующий блок БИ, на выходе которого образуется решение $x(t)$; блоки МА и МС, представляющие собой функциональные преобразователи, которые реализуют операторы A и A^* соответственно; суммирующий блок БС, на выходе которого образуется невязка исходного уравнения (3); блок управления БУ, который реализует заданный критерий выбора параметра регуляризации α и блок ключей, предназначенный для остановки процесса интегрирования в момент выполнения критерия останова и фиксации решения, выбранного устройством управления. Отметим, что блок МС

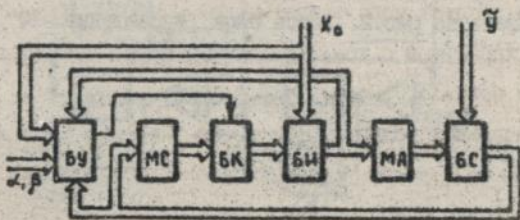


Рис.1. Структурная схема устройства для решения линейных операторных уравнений первого рода динамическим методом регуляризации.

может реализовывать также и некоторый другой оператор с та-
кой, что произведение $s^{-1}A$ будет симметрическим и неотри-
цательно определенным оператором.

Важной особенностью описанного устройства для решения
некорректных операторных уравнений является возможность
автоматического перебора всех возможных значений параметра
регуляризации t от $t=0$ до $t=T+\infty$ (что соответствует изменению
параметра регуляризации α от ∞ до 0).

Отметим, что в зависимости от реализации блоков МА и МС
моделями операторов A и A^* с помощью предложенного устройства
могут решаться ряд конкретных задач, которые сводятся к
уравнению (3). В частности, на основе описанной структуры
могут решаться плохо обусловленные и вырожденные системы ли-
нейных алгебраических уравнений (при этом модели операторов
МА и МС - резистивные матрицы) и обратные по источникам кра-
евые задачи эллиптического типа (МА и МС - резистивные
сетки).

Структурная схема устройства для приближенного устоя-
чивого решения линейного интегрального уравнения Вольтерра
первого рода, реализующего динамический метод регуляризации,
представлена на рис.2. Здесь блок управления БУ управляет

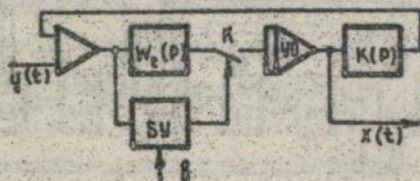


Рис.2. Устройство для моделирования интегрального
уравнения Вольтерра первого рода с разностным
ядром на основе динамического метода
регуляризации.

ключом на входе интегратора УО, а корректирующий блок должен обеспечить устойчивость моделирующей схемы и аperiodический характер переходного процесса. Если в процессе интегрирования невязка исходного уравнения не превышает некоторый априорно заданный уровень δ , определяемый погрешностью исходных данных, то ключ разомкнут и сигнал на выходе УО зафиксирован. Как только уровень невязки превысит величину δ , БУ замыкает ключ и устройство обрабатывает невязку с малой постоянной времени. При уменьшении невязки до уровня δ ключ снова размыкается и таким образом весь участок интегрирования разбивается на ряд интервалов в общем случае неравной длительности с постоянным значением решения на каждом интервале.

На рис.3 представлена структурная схема устройства, предназначенного для решения линейного интегрального уравнения первого рода и реализующего способ построения регулирующих операторов, предложенный в третьей главе диссертации.

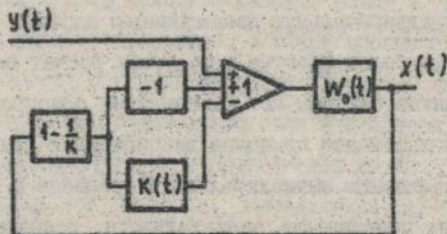


Рис.3. Структурная схема устройства для решения интегральных уравнений со стабилизацией постоянной составляющей и с динамической коррекцией.

Разработана также структура и принципы функционирования устройства для устойчивого приближенного дифференцирования зашумленного сигнала в реальном времени, даны рекомендации

по выбору коэффициентов корректирующего блока, а также рассмотрены возможности создания специализированных вычислительных устройств для решения нелинейных обратных задач.

В седьмой главе сформулированы основные принципы организации моделирующих систем, предназначенных для моделирования нелинейных динамических объектов с распределенными параметрами.

В соответствии с модульным принципом специализированное вычислительное устройство для моделирования сложных систем представляет собой совокупность стандартных моделей-аналогов отдельных элементов исследуемого объекта, соединенных в соответствии с топологией моделируемого объекта, что обеспечивает подобие математической модели исследуемому объекту. Такая структура позволяет обеспечить определенную гибкость, возможность перестройки вычислительной структуры при переходе от одной моделируемой системы к другой.

При использовании модульного принципа на практике нужно выполнить предварительную декомпозицию сложной математической модели на более простые так, чтобы расчет полученных моделей элементов системы мог выполняться одновременно. Таким образом использование принципа декомпозиции фактически ведет к распараллеливанию вычислительного процесса и, следовательно, возникает возможность значительного сокращения времени решения задачи моделирования с помощью, например, мультипроцессорных вычислительных систем, включающих цифровые, аналоговые и гибридные процессоры.

Для многовариантных расчетов в оперативных условиях с учетом довольно большого объема решаемых задач по прогнози-

рованию реакции управляемых объектов, необходимости постоянного функционирования модели в режиме "советчика диспетчера" целесообразно создавать специализированные гибридные вычислительные устройства, сочетающие высокое быстродействие аналоговых вычислительных структур и высокую точность и гибкость ЦВМ. Эффективность функционирования такого вычислительного комплекса прежде всего будет определяться тем, насколько удачно распределены функции между аналоговой и цифровой частями вычислительной системы в общем процессе решения задачи моделирования конкретного объекта. В частности, во многих практически важных случаях, когда требуемая точность моделирования невысока и определяется точностью исходных данных, получаемых с помощью промышленных измерительных приборов, целесообразно все вычислительные операции передать аналоговой части системы. Функции управления и синхронизации, подготовку и вывод исходных данных, вывод и представление в удобной форме результатов, а также обеспечение сервисных функций следует оставить за цифровой частью системы.

Вопросы взаимодействия аналоговой и цифровой частей в ГВС решаются на техническом и программном уровне с помощью микропроцессорных контроллеров, выполняющих функции сбора информации с аналогового процессора, предварительной ее обработки, передачи данных в ЦВМ, приема данных из ЦВМ и выдачи их для управления аналоговым процессором. Связь между ЦВМ и микропроцессорными контроллерами организована по стандартному последовательному или параллельному каналу связи.

Отметим также, что описанная выше структура имеет самостоятельное значение при создании автоматизированных систем

управления сложными технологическими процессами, а также для решения задач идентификации параметров сложных объектов и процессов.

При решении конкретных задач моделирования сложных нелинейных объектов с распределенными параметрами возникают трудности, связанные с обеспечением адекватности математической модели. Степень адекватности, а следовательно, и качество управления, зависят от степени соответствия исходных данных для моделирования реальным параметрам исследуемой системы, которые часто недоступны для непосредственного измерения на объекте.

Указанная проблема может быть решена с помощью принципа адаптации (подстройки неизвестных параметров модели-аналога) так, чтобы результаты моделирования совпадали с эксплуатационными данными в точках измерения параметров. При этом интегрально будут учтены и другие отличия принятой математической модели от реального исследуемого объекта.

В гибридной вычислительной системе (ГВС) используется также принцип искусственной периодизации решения, поэтому в каждом цикле должно быть предусмотрено время для ввода параметров, адаптации, установки начальных условий и воспроизведения переходного процесса в объекте.

Изложенный подход к построению гибридных адаптивных моделей позволяет создавать ГВС для оперативного управления, эффективного контроля и подготовки персонала; обслуживающего различные сложные пространственно распределенные объекты и технологические процессы.

Восьмая глава посвящена разработке аналогового и гиб-

ридного специализированных вычислительных устройств, которые предназначены для прогнозирования гидравлических режимов газотранспортных систем и используются в качестве тренажера и советчика диспетчера для обеспечения заданного режима газопередачи и бесперебойного газоснабжения потребителей, а также разработке программного комплекса для моделирования движения конденсата по трубопроводу.

Разработанные специализированные вычислительные устройства позволяют моделировать переходные процессы в системах дальнего транспорта газа, которые описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений с распределенными параметрами. С помощью разработанных устройств могут быть решены следующие задачи:

1. Ряд технологических задач, как, например, выбор управляющих воздействий на газопровод при резких изменениях потребления или подачи газа, переключении компрессорных станций, возникновении аварийных режимов; анализ выполнения условий бесперебойного газоснабжения потребителей в переходном процессе; определение статических изменений расходов и давлений при смене стационарных режимов; оценка времени стабилизации газопровода; определение времени для ремонтно-восстановительных работ при отключении отдельных ниток газопровода или газоперекачивающих агрегатов из условия обеспечения бесперебойного газоснабжения потребителей.

2. Обучение (тренаж) диспетчерского персонала, занятого управлением газотранспортной системой.

3. Накопление статистической информации о гидравлических режимах с целью оценки влияния различных факторов на

надежность газоснабжения.

На рис. 4 приведена структурная схема гибридной вычислительной системы, центральной частью которой является аналого-цифровая модель газопровода (АЦМГ), в которой в соответствии с методом прямой аналогии режимы элементов газопровода воспроизводятся независимо управляемыми процессорами аналогов линейных участков (АЛУ), аналогов компрессорных станция (АКС), аналогов источников (АИГ) и потребителей газа (АПГ). Между собой процессоры объединяются блоком задания топологии (БЗТ) согласно графу газотранспортной сис-

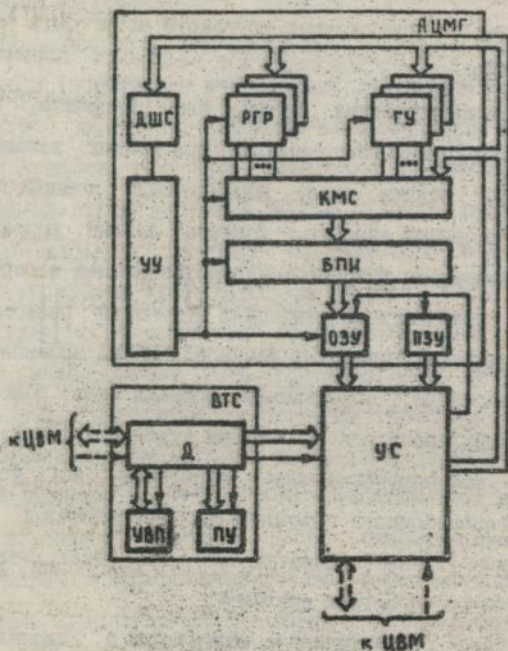


Рис. 4. Структурная схема ГВС.

темы, блоки преобразования информации (БПИ) и синхронизации (БС) обеспечивают информационное и функциональное согласование всех блоков АЦМГ. Кроме того в состав комплекса входят стандартные периферийные устройства: дисплей (Д), устройство внешней памяти (УВП) и печатающее устройство (ПУ). Связь между АЦМГ и Д осуществляется устройством сопряжения (УС).

Каждый процессор содержит (рис.5) собственно модель-аналог (МА) соответствующего элемента газопровода, цифровое запоминающее устройство (ЗУ), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и схему управления (СУ). Кроме того, в состав АЛУ и АКС входят схемы сравнения (СС), адаптации (СА), переключатели (К1-К3) и преобразователь напряжение - ток (ПНТ). Эти схемы предназначены для автоматической настройки параметров МА и позволяют учесть дрейф технологических характеристик газопроводов.

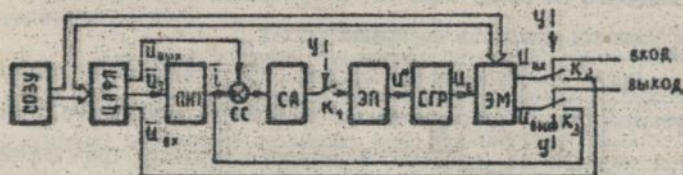


Рис.5. Структурная схема адаптивного процессора.

Исходными данными для прогноза режима газопередачи являются фактическое распределение давления и расхода в газопроводе в начальном режиме, а также законы изменения управляющих и возмущающих воздействий. Рабочий цикл АЦМГ периодически повторяется и состоит из трех этапов: адаптация, подготовка, прогноз. На этапе адаптации процессоры АЛУ и АКС

определяют внутренние параметры, соответствующие реальному состоянию газопровода. На этапе подготовки в аналоговых процессорах и ЭЗТ задаются начальные значения внешних отборов и притоков газа, состояние запорной аппаратуры, схемы обвязки компрессорных станций и другие параметры, характеризующие исходный режим газопровода. На этапе прогноза моделируется развитие нестационарного режима в газопровode, который определяется изменением выходных сигналов АПГ и АИГ, структуры ЭЗТ и параметров компрессорных станций.

Пример решения контрольной задачи прогноза переходного процесса на участке газопровода, включающего две компрессорные станции КС1 и КС2 (переходной процесс вызван отключением КС1), приведен на рис.6. Линиями представлены результаты моделирования на ГВС, точки - данные диспетчерской службы. Кривые 1, 3 - давления на выходе соответственно КС1 и КС2; 2 - давление на входе КС2. По результатам эксплуатации ГВС погрешность прогноза не превышает 3%.

Одним из основных требований, предъявляемых к технологической схеме трубопроводного транспорта конденсата, является обеспечение однофазного жидкого состояния транспортируемой среды на всех участках технологических коммуникаций. Выполнение данного требования обеспечивает не только повышение надежности функционирования транспортной системы, но и снижение энергетических затрат на перекачку, по сравнению с энергозатратами на перемещение двухфазного газожидкостного потока.

Математическую модель трубопроводного транспорта конденсата можно представить в виде совокупности следующих

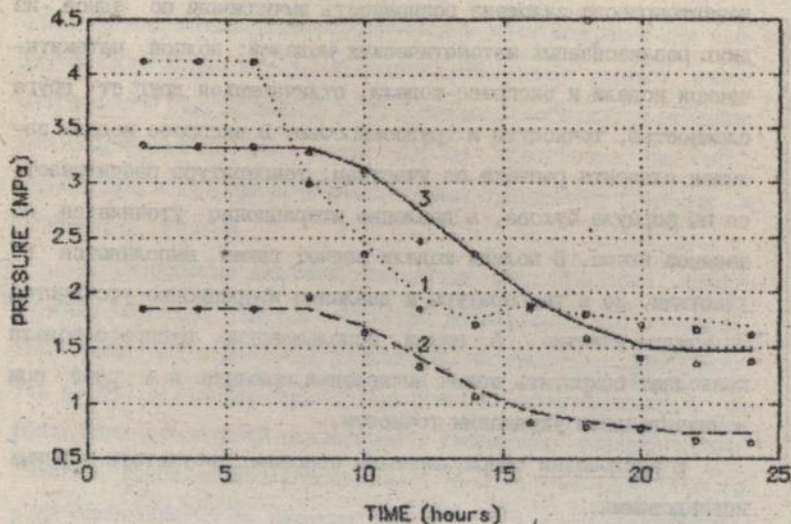


Рис.6. Результаты моделирования аварийной ситуации в газотранспортной системе.

основных блоков:

1. Алгоритм расчета параметров парожидкостного равновесия основан на использовании уравнения Пенга-Робинсона и позволяет определить молярные доли компонентов смеси в паровой и в жидкой фазах для заданного состава смеси при заданных температуре и давлении.

2. Алгоритм теплового расчета конденсатопровода, основанный на интегрировании уравнения энергии.

3. Алгоритм гидравлического расчета конденсатопровода, учитывающий характер течения смеси в трубе: однофазный (газовый или жидкостный режим) или двухфазный (расслоенный или пробковый режим).

В пакете программ расчета гидравлического режима кон-

денсатопровода заложена возможность вычислений по одной из двух реализованных математических моделей: полной математической модели и экспресс-модели, отличающихся друг от друга сложностью, точностью и трудоемкостью. В экспресс модели заложены алгоритмы расчета по участкам, температура рассчитывается по формуле Шухова, а давление итерационно уточняется по неявной схеме. В полной модели расчет также выполняется по участкам, но и температуры и давления итерационно уточняются на каждом участке. В целом использование экспресс-модели позволяет сократить время вычисления примерно в 4 раза при незначительном ухудшении точности.

В заключении сформулированы основные результаты научных исследований.

В приложениях приведена математическая модель конденсатопровода и документы о внедрении результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В диссертации разработаны, обоснованы и исследованы методы идентификации и компьютерного моделирования сложных управляемых распределенных объектов, позволяющие получить решение в реальном и ускоренном времени, их алгоритмическая, программная и аппаратная реализация для повышения качества обработки результатов физических экспериментов, автоматизации технологических процессов и процессов управления техническими объектами. В том числе получены следующие результаты:

1. Разработан подход к математическому моделированию сложных управляемых распределенных объектов, основанный на ис-

пользовании методов непараметрической идентификации или аналитического подхода с последующим применением методов параметрической идентификации и учитывающий особенности реализации полученных математических моделей средствами цифровой, аналоговой и гибридной вычислительной техники в реальном и ускоренном времени.

2. Разработан динамический метод регуляризации некорректных обратных задач и структуры реализующих его специализированных вычислительных устройств, являющийся разновидностью метода регуляризации А.Н.Тихонова и ориентированный на реализацию средствами аналоговой и гибридной вычислительной техники. Приближенное решение операторного уравнения первого рода определяется на решении задачи Коши для соответствующего дифференциального уравнения при надлежащем значении параметра ϵ .

Доказана устойчивость решения некорректных задач, получаемого с помощью динамического метода регуляризации, по отношению к возмущениям исходных данных в пределах заданной точности измерений.

Установлена связь между параметром динамического метода регуляризации ϵ и параметром α в методе регуляризации А.Н.Тихонова. Предложен ряд способов выбора параметра ϵ динамического метода регуляризации.

3. Предложен способ построения семейства регуляризирующих операторов для решения задачи интерпретации экспериментальных данных в реальном времени. Доказана качественная теорема, подтверждающая регуляризирующие свойства полученных алгоритмов, выполнен анализ их устойчивости и сходимости.

4. Для задачи численного дифференцирования получены оценки смещенной и несмещенной составляющих ошибки решения и доказана качественная теорема устойчивости предложенных методов дифференцирования. Разработаны структуры специализированных вычислительных устройств для приближенного устойчивого дифференцирования зашумленного аналогового сигнала.

Рассмотрены вопросы численной реализации методов дифференцирования зашумленных сигналов. Проведено сравнение некурсивных формул численного дифференцирования и различных цифровых реализаций предложенных устойчивых непрерывных алгоритмов. Показано, что шаг дискретизации является при этом параметром "естественной" регуляризации.

5. Предложен помехоустойчивый детерминированный метод идентификации управляемых нелинейных динамических объектов в виде ряда Вольтерра, основанный на испытании исследуемого объекта полиимпульсными сигналами с варьируемыми параметрами (амплитудой, длительностью и задержкой между импульсами) и использовании предложенных методов регуляризации некорректных задач.

Проведен анализ погрешностей предложенного метода идентификации: методической, обусловленной некомпенсированной обработкой вкладом в отклик членов ряда, порядок которых выше порядка оцениваемого ядра, и случайной погрешности, реально существующей при обработке зашумленных данных измерений откликов, а также сформулированы требования к параметрам тестовых импульсных возмущений, обеспечивающие приемлемую на практике точность оценивания ядер Вольтерра.

6. Разработан метод идентификации управляемых нелиней-

ных динамических объектов на основе рядов Вольтерра при произвольных детерминированных пробных воздействиях, заключающийся в выделении функционала Вольтерра n -го порядка с помощью n -кратного дифференцирования и решении многомерного интегрального уравнения относительно искомого ядра. Для обеспечения вычислительной устойчивости предлагаемого алгоритма идентификации при вычислении производной и решении интегрального уравнения используются предложенные методы регуляризации некорректных задач.

7. Создан ряд структур устройств для устойчивого решения линейных интегральных уравнений Вольтерра первого рода, отличающихся сложностью и точностью, реализующих предложенный способ решения задачи интерпретации экспериментальных данных в реальном времени и предназначенных для повышения точности измерения экспериментальных данных, используемых при решении задачи идентификации.

8. Разработаны основные принципы построения гибридных вычислителей, включающие декомпозицию математической модели, реализацию структуры вычислителя в соответствии с модульным принципом, а также принцип адаптации. Разработаны структуры устройств, реализующие предложенные принципы.

Показано, что использование принципа адаптации позволяет не только подстроить параметры математической модели к их реальным значениям, но и интегрально учесть имеющиеся отличия принятой математической модели от реального исследуемого объекта.

9. На основе вариационного подхода построен градиентный алгоритм параметрической идентификации коэффициентов гидрав-

лической емкости и гидравлического сопротивления линейного магистрального газопровода, определения мест утечки газа. В качестве целевой функции используется интегральный квадратичный критерий качества по результатам измерений в одной или в нескольких точках.

В условиях наличия значительных помех в канале измерения, а также для случая стохастической постановки задачи разработан алгоритм, использующий методы субоптимальной квазилинейной фильтрации для оценки текущих параметров газотранспортной системы.

10. Предложена структура микропроцессорной системы для организации связи между аналоговой и цифровой частями системы.

Разработан программно-технический комплекс, включающий в себя ПЭВМ типа IBM PC и микропроцессорный контроллер на базе однокристалльной микро-ЭВМ. Данный комплекс использован для автоматизации сбора экспериментальной информации об исследуемом объекте с целью последующей идентификации его параметров, а также для контроля параметров и управления в реальном времени сложными объектами и технологическими процессами.

Программно-технический комплекс внедрен на ряде сахарных заводов Украины.

11. Разработаны и созданы специализированные аналоговое и гибридное вычислительные устройства, построенные в соответствии с блочно-модульным принципом, реализующие принцип адаптации и предназначенные для решения в ускоренном времени задач моделирования и прогнозирования гидравлического режима

газопроводных систем. Относительная погрешность решения задачи не превышает 2-3%.

Аналоговое вычислительное устройство внедрено в диспетчерской службе ПО "Азтрансгаз". Специализированное гибридное вычислительное устройство внедрено в диспетчерской службе ПО "Оренбургтрансгаз".

12. Разработаны математические модели задачи транспорта конденсата по трубопроводу, учитывающие изменение энтальпии и температуры, и алгоритмы, реализующие указанные модели.

На основе полученных результатов создано программное обеспечение для моделирования гидравлических режимов конденсатопроводов на базе IBM PC. Разработан пакет прикладных программ, позволяющий оперативно рассчитывать режимы транспорта конденсата по конденсатопроводу. Описанный комплекс, предназначенный для оптимизации гидравлических режимов конденсатопровода УКПГ16-ОГПЗ, внедрен в диспетчерской службе ПО "Каззахгазпром" (г. Аксай).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гутенмахер Л.И., Тимошенко Ю.А., Тихончук С.Т. О динамическом методе решения некорректных задач // Доклады АН СССР, 1977, т. 237, № 4. - С. 776-778.

2. Гутенмахер Л.И., Тимошенко Ю.А., Тихончук С.Т. Моделирование влияния возмущения на решение систем алгебраических уравнений // Некоторые вопросы моделирования и управления. Вып. 71. - Кишинев: Штиинца, 1974. - С. 15-20.

3. Гутенмахер Л.И., Тимошенко Ю.А., Тихончук С.Т. Моделирование некоторых алгебраических систем, некорректных

по Адамару-Куранту // Электроника и моделирование. - Киев: Наукова думка, 1974, вып.3. - С.88-92.

4. Гутенмахер Л.И., Тимошенко Ю.А., Тихончук С.Т. Динамический метод моделирования некоторых некорректных систем // Электроника и моделирование. - Киев: Наукова думка, 1976, вып.11. - С.102-103.

5. Гутенмахер Л.И., Тимошенко Ю.А., Тихончук С.Т. О динамическом методе решения плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений // Электроника и моделирование, вып.13. - Киев: Наукова думка, 1976. - С.73-74.

6. Гутенмахер Л.И., Тимошенко Ю.А., Тихончук С.Т. Применение динамического метода для моделирования некоторых обратных задач разработки нефтяных месторождений // За технический прогресс. - Баку, 1976, №7. - С.21-26.

7. Гутенмахер Л.И., Тимошенко Ю.А., Тихончук С.Т. О задаче идентификации коэффициентов гидравлических сопротивлений кольцевого газопровода // Экономика газовой промышленности. - М.:ВНИИГазпром, 1976, №10. - С.7-13.

8. Gutenmacher L.I., Timoshenko Y.A., Tikhonchuk S.T. On the Dynamic Method of Modelling Incorrect Problems, // Soviet Math. Dokl. Vol.18, №6, 1977. - P.1485-1486.

9. Миргород В.Ф., Тихончук С.Т. Регуляризирующий алгоритм и структура устройства для численного дифференцирования в реальном времени // Теория и методы решения некорректно поставленных задач и их приложения. Сборник научных трудов. - Новосибирск, 1983. - С.203-205.

10. Гибридный вычислительный комплекс для прогноза нестационарных режимов магистральных газопроводов. / Ю.М.Бас-

триков, В.И.Великий, С.Т.Тихончук и др. // Труды 2 научно-техн. конф. советских и польских молодых ученых - выпускников высш. учеб. завед. СССР. - Вроцлав, 1986. - С.186-190.

11. Тихончук С.Т. Регуляризованные алгоритмы дифференцирования зашумленных сигналов в реальном масштабе времени // Электронное моделирование, 1991, №1. - С.48-51.

12. Тихончук С.Т., Фрид А.В. Метод адаптивного гибридного моделирования нелинейных объектов с распределенными параметрами в условиях неопределенности исходных данных // Электронное моделирование, 1991, №4. - С.85-88.

13. Tikhonchuk S.T. Regularized Methods for Differentiating Noisy Signals in Real Time. - Electron. Modeling. Vol.9(1), 1992. - P.81-88.

14. Tikhonchuk S.T., Frid A.V. A Method for Adaptive Hybrid Modeling of Nonlinear Distributed-Parameter Entities in Conditions of Source Data Uncertainty. - Electron. Modeling. Vol.9(4), 1992. - P.767-773.

15. Устройство для моделирования систем линейных алгебраических уравнения. А.С. 612258 (СССР) / Л.И.Гутенмахер, Ю.А.Тимошенко, С.Т.Тихончук // Бюл.изобретений, 1978. - №23.

16. Устройство для решения обратных задач теории поля. А.С. 741288 (СССР) / Л.И.Гутенмахер, Ю.А.Тимошенко, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретений, 1980. - №22.

17. Дифференцирующее устройство. А.С. 744630 (СССР) / Л.И.Гутенмахер, С.Т.Тихончук // Бюл.изобретений,1980. - №24.

18. Устройство для решения систем алгебраических уравнения. А.С. 758183 (СССР) / Л.И.Гутенмахер, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретений, 1980. - №31.

19. Устройство для решения операторных уравнений. А.С. 763921 (СССР) / Л.И.Гутенмахер, Ю.А.Тимошенко, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретения, 1980. - №34.

20. Устройство для решения интегральных уравнений. А.С. 928682 (СССР) / А.Ф.Верлянь, Л.И.Гутенмахер, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретения, 1982. - №17.

21. Устройство для моделирования движения газа в газопроводах. А.С. 1092532 (СССР) / Ю.М.Бастриков, В.И.Великий, В.Е.Прокофьев, С.Т.Тихончук, А.В.Фрид // Бюл. изобретения, 1984. - №18.

22. Дифференцирующее устройство. А.С. 1101845 (СССР) / В.Ф.Миргород, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретения, 1984. - №25.

23. Устройство для определения среднего значения нестационарного случайного процесса. А.С. 1112378 (СССР) / В.Ф.Миргород, В.С.Ситников, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретения, 1984. - №33.

24. Адаптивное дифференцирующее устройство. А.С. 1128974 (СССР) / В.Ф.Миргород, В.С.Ситников, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретения, 1984. - №44.

25. Следящая система. А.С. 1211690 (СССР) / В.Ф.Миргород, В.С.Ситников, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретения, 1988. - №18.

26. Устройство для моделирования движения газа в газопроводах. А.С. 1228497 (СССР) / Ю.М.Бастриков, В.И.Великий, В.Е.Прокофьев, С.Т.Тихончук, А.В.Фрид // Бюл. изобретения, 1988. - №15.

27. Устройство для решения систем линейных алгебраических уравнений. А.С. 1285310 (СССР) / В.Ф.Миргород,

В.Д.Павленко, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретений, 1986. - №9.

28. Устройство для решения линейных интегральных уравнений (его варианты). А.С. 1278899 (СССР) / А.Ф.Вермань, В.Ф.Миргород, С.Т.Тихончук // Бюл. изобретения, 1986. - №7.

29. Устройство для моделирования компрессорной станции магистрального газопровода. А.С. 1462370 (СССР) / Ю.М.Бастриков, В.И.Великий, С.Т.Тихончук и др. // Бюл. изобретения, 1989. - №8.

30. Миргород В.Ф., Ситников В.С., Тихончук С.Т. Регуляризованный алгоритм векторного восстановления на основе аппроксимационного моделирования // Деп. УкрНИИТИ 5.03.84 № 414УК-Д84.

31. Павленко В.Д., Тихончук С.Т. Интегральная диагностика аналоговых электронных компонентов на основе нелинейных непараметрических моделей // Деп. УкрНИИТИ 9.07.86, №1176УК-84.

32. Михайлов Д.Б., Тихончук С.Т. Регуляризованный метод восстановления зашумленных сигналов в реальном времени // Деп. УкрНИИТИ 11.03.91, № 313-УК91. - 16с.

33. Гутенмахер Л.И., Тихончук С.Т. Динамический метод моделирования обратных краевых задач // Тез. докл. 4 Республ. сем. "Методы и средства решения краевых задач". - Рига, 1978. - С.30.

34. Павленко В.Д., Тихончук С.Т. Помехоустойчивый детерминированный алгоритм идентификации нелинейных объектов на основе рядов Вольтерра // Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. "Проблемы нелинейной электротехники". - Киев: Наукова думка, 1981, Ч.3. - С.77-79.

35. Павленко В.Д., Тихончук С.Т. Применение сеточных

процессоров для решения нелинейных обратных краевых задач параболического типа // Тез. докл. Всесоюз. семинара "Специализированные процессоры параллельного действия для решения краевых задач" - Рига, 1981. - С.61-62.

36. Тихончук С.Т., Бастриков Ю.М., Фрид А.В. Принципы построения и структура гибридной модели газотранспортной системы - В кн.: Развигие и использование аналоговой и аналого-цифровой вычислительной техники. - М.: НТО РЭС, 1981. - С.139-140.

37. Павленко В.Д., Тихончук С.Т. Идентификация многомерных ядер Вольтерра на основе метода регуляризации некорректных задач // Тез. докл. Республ. научно-техн. конф. "Интегральные уравнения в прикладном моделировании". - Киев, 1983, ч.1. - С.194-195.

38. Миргород В.Ф., Тихончук С.Т. Метод устойчивого моделирования линейных интегральных уравнений 1 рода // Тез. докл. научно-техн. конф. "Интегральные уравнения в прикладном моделировании" - Киев, 1983, ч.2. - С.150-151.

39. Миргород В.Ф., Тихончук С.Т. Алгоритмы численного дифференцирования в реальном времени и структуры дифференцирующих устройств // Тез. докл. "Теория и методы решения некорректно поставленных задач и их приложения" - Новосибирск, 1983. - С.144.

40. Тихончук С.Т., Павленко В.Д. Идентификация нелинейных динамических объектов в виде рядов Вольтерра во временной области // Тез. докл. "Теория и методы решения некорректно поставленных задач". - Саратов, 1986. - С.142-143.

41. Алгоритмы численного дифференцирования в задачах

оценки состояния и их аппаратные реализации / В.Е. Прокофьев, В.С.Ситников, С.Т.Тихончук и др. // Тез. докл. 3 Всесоюзной научно-техн. конф. "Программное, алгоритмическое обеспечение АСУ ТП". - Ташкент, 1985.

42. Адаптивные гибридные модели магистральных газопроводов / В.Е.Прокофьев, Ю.М.Бастриков, С.Т.Тихончук и др. // Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. "Моделирование-85. Теория, Средства, Применение". - Киев, 1985, Ч.3. - С.79-80.

43. Принципы построения вычислительных систем для моделирования магистральных газопроводов / Ю.М.Бастриков, В.И. Великий, С.Т.Тихончук и др. // Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. "Функционально ориентированные вычислительные системы". - Харьков, 1986.

44. Павленко В.Д., Тихончук С.Т., Стадник Т.В. Регуляризованные алгоритмы детерминированной идентификации нелинейных многомерных динамических объектов // Тез. докл. Всесоюзной научно-техн. конф. "Методы и средства проектирования динамических систем с учетом требования корректности и грубости" (сборник трудов). - Москва, 1986. - С.60-61.

45. Павленко В.Д., Тихончук С.Т. Идентификация нелинейных динамических объектов в виде рядов Вольтерра для произвольных детерминированных пробных воздействиях // Тез. докл. 2-ой Респ. научно-техн. конф. "Интегральные уравнения в прикладном моделировании". - Киев, 1986, Ч.1. - С.183-187.

46. Тихончук С.Т., Коломияченко Т.Л. Регуляризованный алгоритм дифференцирования зашумленных сигналов // Тез. докл. 2-ой Респ. научно-техн. конф. "Интегральные уравнения в прикладном моделировании". - Киев, 1986, Ч.2. - С.221-222.

47. Бастриков Ю.М., Великий В.И., Тихончук С.Т., Фрид А.В. Гибридный вычислительный комплекс для прогноза систем магистральных газопроводов // Материалы 8 Межд. конф. "Применение ЭВМ в технике и управлении производством" COMPCONTROL-87. - Москва, 1987, Ч.1/3. - С.431-434.

48. Адаптивное моделирование трубопроводных систем / Ю.М.Бастриков, В.И.Великий, С.Т.Тихончук и др. // Тез. докл. Респ. конф. "Математическое моделирование физических полей". - Саратов: СГУ, 1988.

49. Павленко В.Д., Молдавский В.В., Тихончук С.Т. Восстановлении функции источника процесса теплопередачи на основе данных эксперимента // Тез. докл. Респ. конф. "Математическое моделирование физических полей". - Саратов: СГУ, 1988.

50. Гвоздева И.М., Тихончук С.Т. Алгоритмы идентификации внешних воздействий в системах с распределенными параметрами // Тез. докл. Респ. конф. "Математическое моделирование физических полей". - Саратов: СГУ, 1988.

51. Алгоритм оперативного управления магистральными газопроводами / Ю.М.Бастриков, В.И.Великий, С.Т.Тихончук и др. // Межд. конф. "Комплексная автоматизация промышленности". - Вроцлав, 1983, Ч.3. - С.284-287.

52. Тихончук С.Т., Павленко В.Д., АLEXIN Н.Б. Метод детерминированной идентификации нелинейных динамических систем, устойчивых к погрешностям измерений // Тр. 4 Междунар. конф. "Проблемы комплексной автоматизации". Секция 3. - Киев, 1980. - С.172-176.

53. Тихончук С.Т., Михайлов Д.Б. Регуляризованный алгоритм решения интегрального уравнения Вольтерра первого рода

// Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. "Математическое моделирование в энергетике". Часть 4. - Киев, 1990. - С.127-128.

54. Павленко В.Д., Тихончук С.Т. Регуляризованные алгоритмы детерминированной идентификации нелинейных динамических объектов во временной области // Тез. докл. научно-техн. сем. "Теория идентификации нелинейных динамических объектов. Состояние и перспективы развития". - Торговиште, НРБ, 1990. - С.41-43.

55. Тихончук С.Т. Градиентный алгоритм идентификации коэффициентов гидравлических сопротивлений газопроводов // Тез. докл. научно-техн. сем. "Теория идентификации нелинейных динамических объектов. Состояние и перспективы развития". - Торговиште, НРБ, 1990. - С.48-51.

56. Tikhonchuk S.T. Stable methods of solving inverse problems for control systems // Intern. Conf. on Systems Science "Systems Science 11", Abstracts of Papers. - Wroclaw, 1992. - P.169.

57. Бастриков Ю.М., Великий В.И., Тихончук С.Т. Программно-технический комплекс для контроля и управления сложными объектами и технологическими процессами // Тез. докл. I Укр. научно-техн. конф. по автомат. управлению "Автоматика-94". Том 2. - Киев, 1994. - С.283.

Tikhonchuk S.T. The methods and means of mathematical simulation in tasks of researches of controlled distributed objects.

The dissertation on receiving of doctor scientific degree of technical sciences on specialties 05.13.16 - Application of computers, mathematical simulation and mathematical methods in scientific researches and 05.13.05 - Elements and devices of computers and control systems, Odessa state politechnical university, Odessa, 1994.

63 scientific works, including 15 author certificates, are protected which contain the theoretical researches of developed identification methods and mathematical simulation of complex controlled distributed objects, as well as results of experimental researches. These methods enable to receive the solution in real and accelerated time. It was established, that the offered methods of experimental data interpretation and identification of linear and nonlinear objects have regularized properties. The structures of specialized computers, intended for realizations of offered methods of experimental data processing, identification and simulation in real and accelerated time are developed. The received results application on series of gas and petroleum transport enterprises were carried out. It is represented data about their efficiency in service while.

Тихончук С.Т. Методи і засоби математичного моделювання в задачах дослідження управляємих розподілених об'єктів.

Дисертація на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук з спеціальностей 05.13.16 - Застосування обчислювальної техніки, математичного моделювання і математичних методів в наукових дослідженнях та 05.13.05 - Елементи і пристрої обчислювальної техніки і систем управління, Одеський державний політехнічний університет, Одеса, 1994.

Захищається 63 наукові роботи, в тому числі 15 авторських свідчень, які містять теоретичні дослідження розроблених методів ідентифікації і математичного моделювання складних управляємих розподілених об'єктів, які дозволяють одержувати рішення в реальному і прискореному часі, а також результати експериментальних досліджень. Встановлено, що запропоновані методи інтерпретації експериментальних даних і ідентифікації лінійних і нелінійних об'єктів мають регуляризуючі властивості. Розроблено структури спеціалізованих обчислювальних пристроїв, що реалізують запропоновані методи обробки експериментальних даних, ідентифікації і моделювання в реальному і прискореному часі. Здійснено впровадження здобутих результатів на ряді підприємств по транспорту газу і нафтопродуктів, приведені дані про їх ефективність в процесі експлуатації.

Ключові слова: математичне моделювання, ідентифікація, методи регуляризації, спеціалізовані обчислювальні прилади.

July